

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Influência do carregamento precoce na retração por secagem do  
concreto**

**Lucília Maria Bernardino da Silva**

Porto Alegre  
2016

LUCÍLIA MARIA BERNARDINO DA SILVA

**INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO PRECOCE NA  
RETRAÇÃO POR SECAGEM DO CONCRETO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Porto Alegre  
2016

**LUCÍLIA MARIA BERNARDINO DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO PRECOCE NA  
RETRAÇÃO POR SECAGEM DO CONCRETO**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Construção, e aprovada em sua forma final pela professora orientadora pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de dezembro de 2016.

Prof. Denise Coitinho Carpena Dal Molin  
Doutora pela Universidade de São Paulo  
Orientadora

Carlos Torres Formoso  
PhD pela University of Salford  
Coordenador do PPGEC

**BANCA EXAMINADORA**

Geilma Lima Vieira  
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Angela Borges Masuero  
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Fernanda Macedo Pereira  
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho  
aos meus pais, Nereu (*in Memoriam*) e Marília,  
aos meus amados Júlio, Letícia e Renata,  
e às amigas Simone e Geilma.

“O potencial da humanidade é infinito e todo o ser tem  
uma contribuição a fazer por um mundo mais grandioso.  
Estamos todos nele juntos. Somos UM.”

*Helena Petrovna Blavastsky*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, instituição na qual atuo como engenheira, pela oportunidade de qualificação e de aprimoramento profissional. Agradeço à Escola de Engenharia, na pessoa do seu Diretor, Professor Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, e ao Departamento de Engenharia Civil, através da Professora Wai Gehling, pelo apoio recebido durante a realização desta tese.

Principalmente, agradeço pelas inúmeras oportunidades de aprendizado e pelo reconhecimento que sempre recebi de todos os professores do NORIE, grupo de pesquisa do qual muito me orgulho de integrar. Em especial, agradeço aos professores Denise, Angela, Bonin, Ana Paula, Sattler, Formoso e Isatto, pela amizade, convivência e pelo apoio constante, ao longo de tantos anos. Agradeço também ao professor João Masuero, pela sua disponibilidade e pelos grandes ensinamentos adquiridos.

Ao colega Nei Vasque, obrigada pelas valiosas e competentes contribuições, que certamente foram fundamentais para o êxito deste trabalho. Ao colega Fontes, obrigada pelo interesse, competência e apoio, durante a etapa experimental da pesquisa.

A todos os alunos de mestrado e doutorado do NORIE, agradeço pela oportunidade de convivência e colaboração recíproca. Foram tantos colegas, ao longo dos anos, que seria impossível nominá-los aqui. Aos colegas do GMAT, agradeço pela convivência, troca de experiências, respeito e amizade. Em especial, agradeço às queridas Natália e Carina, pela disponibilidade! Laís, obrigada pela simpatia e generosidade! Tua ajuda chegou em um momento muito importante.

Obrigada aos Laboratoristas Airton e Gilmar, e a todos os bolsistas de iniciação científica, pelo inestimável esforço e pelas inúmeras contribuições na etapa experimental da tese. Querido Airton, obrigada pela amizade e pelo carinho.

Sou sinceramente grata a todos os colegas que prestaram todo o apoio necessário à realização da tese, em especial às colegas Liliani, Carmen e Ana Luiza, da Secretaria do PPGEC, e Raquel, da Secretaria do DECIV. Agradeço também a todos os colegas da BIBENG, na pessoa de sua Bibliotecária-Chefe, June Scharnberg.

Agradeço também às instituições e às pessoas que, de alguma forma, possibilitaram o enriquecimento do trabalho, como o Núcleo de Assessoria Estatística - NAE da UFRGS e Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Agradeço, ainda, ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas – LAMIR da UFPR,

de modo especial ao Físico Thiago Gomes da Silva, por sua extrema disponibilidade e valiosas contribuições à tese.

Meu inenso carinho e gratidão às queridas Franciele, Fernanda, Marlova, Adriana e Cris. A todas as jurássicas, obrigada pela torcida!

Geilma, obrigada pelo apoio durante a etapa experimental deste trabalho, por todas as valiosas contribuições! Obrigada, principalmente, pelo carinho e amizade. Divido contigo esta conquista!

Querida Ana Paula, obrigada por tuas importantes dicas para o trabalho, e também, pelo respeito, apoio e admiração recíprocos que nasceram de nossa convivência diária!

Aguida, querida amiga, com quem tanto aprendi, obrigada pela tua competência e generosidade. Trabalhar contigo foi sempre uma oportunidade de crescimento! Obrigada pela amizade e pelo apoio de sempre!

Angela, não tenho palavras para expressar minha gratidão! Obrigada pelo apoio incondicional, pelo incentivo, por não teres deixado que eu desistisse nunca e, principalmente, pela tua amizade!

Rosana, amiga de todas as horas... São tantos anos de convivência e amizade! Obrigada por tuas palavras de apoio e incentivo, por tua luz, por tua alegria contagiante, que tornaram essa jornada mais leve e me ajudaram a prosseguir.

Denise, agradeço por tudo que aprendi contigo ao longo desses anos de convivência! Não só por seres brilhante como professora e pesquisadora, mas pela pessoa generosa que és! Obrigada por teres sempre acreditado no meu potencial. Foi uma honra enorme ter trabalhado sob tua orientação!

Simone, querida amiga, palavras não seriam suficientes para expressar o quanto sou grata por toda a tua dedicação e apoio constantes. Por tua amizade sincera! Aprendi muito contigo... Pessoas como tu nos fazem acreditar em um mundo melhor!

Aos meus queridos pais, pelo esforço e dedicação. Especialmente à minha mãe, pela torcida para o sucesso na concretização deste trabalho.

Agradeço aos meus queridos e amados Julinho, Letícia e Renata que, com seu amor incondicional, não me deixaram desistir ao longo do caminho... Vocês sempre terão meus melhores momentos e todo meu amor!

Acima de tudo, agradeço a Deus, Fonte Inesgotável de Amor, pela existência e oportunidade constante de aprimoramento e evolução.

Bernardino da Silva, Lucília Maria  
INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO PRECOCE NA RETRAÇÃO  
POR SECAGEM DO CONCRETO / Lucília Maria Bernardino da  
Silva. -- 2016.  
252 f.

Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Denise Carpena Coitinho Dal  
Molin.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS,  
2016.

1. carregamento precoce do concreto. 2. retração  
por secagem. 3. autocicatrização de microfissuras. I.  
Dal Molin, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Denise Carpena Coitinho,  
orient. II. Título.



## RESUMO

BERNARDINO DA SILVA, L.M. A influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto. 2016. Tese (Doutorado em Construção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Apesar dos avanços tecnológicos e do conhecimento disponível sobre o concreto e suas propriedades, muitas estruturas apresentam-se degradadas prematuramente. Assim, são necessárias frequentes intervenções para reparo havendo, em consequência, consumo de quantidades expressivas de materiais, com importantes impactos financeiros e ambientais. A preocupação crescente com o desempenho das estruturas de concreto tem incentivado vários segmentos da sociedade a buscarem soluções que assegurem sua durabilidade. Nesse sentido, muitas pesquisas acadêmicas vêm sendo desenvolvidas para melhor entender o comportamento do concreto frente a diferentes condições de uso, considerando-se suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Esta pesquisa teve por objetivo analisar o desempenho de concretos frente à retração por secagem, após terem sido submetidos ao pré-carregamento. Foram utilizados os cimentos CP V ARI e CP IV, nas relações a/c 0,35, 0,50 e 0,70, e adotadas as idades de cura de 7 e 28 dias. Nas idades 1, 3 e 7 dias, os concretos foram submetidos a carregamentos de 25%, 50% e 75% da carga média de ruptura à tração na flexão (NBR 12142, ABNT, 2010). Realizou-se o ensaio para determinação da retração por secagem (ASTM C157/C157M-08, 2014e1), em concretos de referência e nos pré-carregados. Foram também realizadas análises complementares, como determinação da velocidade da onda ultrassônica (NBR 8802, ABNT, 2013), porosimetria por intrusão de mercúrio e microtomografia de raios X. Comparando-se o desempenho dos concretos pré-carregados ao dos concretos de referência, o cimento CP V ARI apresentou redução da retração média, exceto para a relação a/c 0,35 com cura de 7 dias. Nos concretos com cimento CP IV, a retração média diminuiu para a relação a/c 0,70, com ambas as idades de cura. O pré-carregamento provocou, em maior ou menor grau, a associação de dois diferentes efeitos. Por um lado, a compactação ocasionou a quebra dos compostos menos resistentes da matriz, havendo um efeito físico de redução dos vazios capilares, além da exposição de grãos anidros. Em paralelo, ocorreu a microfissuração do concreto, favorecendo, também, a exposição de grãos anidros. A cura por imersão possibilitou a continuidade da hidratação, com a formação de novos produtos resistentes na matriz, reduzindo as porosidades total e efetiva e, portanto, a taxa da retração do concreto. Além da densificação da matriz, a cura prolongada possibilitou a

hidratação dos grãos anidros de cimento expostos nas paredes das microfissuras, favorecendo a sua autocicatrização (*self-healing*), o que contribuiu com a recuperação da capacidade resistente dos concretos, frente aos esforços da secagem. Assim, a associação destes fatores promoveu a redução da retração por secagem nos concretos estudados, principalmente nos mais porosos.

Palavras-chave: *Carregamento precoce do concreto; retração por secagem; autocicatrização de fissuras; desempenho do concreto*

## ABSTRACT

BERNARDINO DA SILVA, L.M. A influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto. 2016. Tese (Doutorado em Construção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The growing concern with the performance of structures has encouraged several segments of society to find solutions to improve concrete durability. Several studies have been made to provide a better understanding of the mechanical properties and concrete durability in different conditions. This study assessed the drying shrinkage performance of preloaded concrete. Cement types CP V ARI, equivalent to Portland type III (ASTM C150/C150M-16e1) and CP IV, equivalent to Portland type IP (ASTM C595/C595M-16) were used with  $w/b = 0.35, 0.50$  and  $0.70$  and curing ages of 7 and 28 days. At the ages of 1, 3 and 7 days, concrete mixes were subject to loads of 25%, 50% and 75% of their mean ultimate flexural strength (Brazilian Standard NBR 12142, ABNT, 2010). Drying shrinkage in reference and preloaded concrete was determined according to ASTM C157/C157M-14e1. Additional tests included ultrasound pulse velocity (NBR 8802, ABNT, 2013), mercury intrusion porosimetry (MIP) and X-ray microtomography. Preloaded CP V ARI cement concrete showed a drop in mean shrinkage when compared with the reference mix, except for the mix with  $w/b = 0.35$  cured for 7 days. For CP IV cement, mean shrinkage dropped with  $w/b = 0.70$  for both curing ages. Early loading caused a compaction effect, promoting the weakest compounds of the matrix to be broken, filling the capillary voids. In this process some anhydrous grains probably were exposed. On the other hand, microcracking also occurred, leaving unhydrated grains exposed in the microcracks walls. Due to immersion curing, the availability of water promoted the hydration continuity. New resistant hydrates filled the large voids and reduced the total and effective porosities in the cement matrix. The hydration of anhydrous grains in the microcracks walls had led to self-healing, with partial resistance capacity recovery. The combined effect of these factors promoted the drying shrinkage reducing, mainly for the more porous concretes.

Keywords: *concrete preloading; drying shrinkage; self-healing of cracks, performance of concrete*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mecanismos primários da hidratação.....	42
Figura 2: Grão anidro e camada de C-S-H – processo topoquímico.....	43
Figura 3: Representação esquemática do desenvolvimento da microestrutura da pasta de cimento Portland.....	45
Figura 4: Distribuição do tamanho dos poros em pastas com diferentes teores de pozolana natural, nas idades de 28, 90 e 365 dias .....	49
Figura 5: Representação esquemática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento..	51
Figura 6: Modelo de pastas de cimento hidratadas: (a) cimento Portland e (b) cimento Portland pozolânico .....	52
Figura 7: Imagens obtidas através de microscopia de elétrons retroespalhados, mostrando as duas morfologias do C-S-H .....	54
Figura 8: Modelos da estrutura do C-S-H e sua porosidade.....	55
Figura 9: Definição de elementos com volume representativo para a modelagem <i>bottom-up</i> abordando várias escalas de análise inter-relacionadas para materiais cimentícios.....	57
Figura 10: Modelo da estrutura molecular do C-S-H.....	57
Figura 11: Modelo da nanoestrutura do C-S-H .....	58
Figura 12: Distribuição do tamanho dos poros.....	68
Figura 13: Modelo da microestrutura do gel de C-S-H (silicato hidratado de cálcio) .....	70
Figura 14: Água capilar e água de gel .....	72
Figura 15: Volumes das fases constituintes da pasta de cimento Portland, a partir da hidratação.....	75
Figura 16: Constituição física: (a) concreto fresco e (b) endurecido .....	79
Figura 17: Aspecto do poste de concreto (a), precipitados presentes na superfície (b) e no interior da fissura (c).....	83
Precipitados: (b) superfície e (c) no interior da fissura .....	83
Figura 18: Imagens obtidas através de análise de microscopia .....	83
(a) Depósito de calcita na superfície da fissura.....	83
(b) Etringita no interior da fissura .....	83
Figura 19: Mecanismos de autocicatrização natural no concreto.....	84

Figura 20: Hidratação de partículas de cimento anidro .....	86
Figura 21: Representação esquemática da hidratação adicional nas áreas adjacentes à fissura .....	88
Figura 22: Volume ocupado pelo cimento, água e produtos de hidratação, quando o cimento Portland hidrata num sistema fechado .....	89
Figura 23: Volume ocupado pelo cimento, água e produtos de hidratação, quando o cimento Portland estiver exposto a uma fonte externa de água, durante a sua hidratação.....	90
Figura 24: Dispositivos utilizados para a aplicação de compressão, no estudo de ter Heide e Schlangen (2007, p.8).....	91
Figura 25: Tensão/deformação dos cp's submetidos ou não à força de compressão durante o período de cicatrização, em comparação aos cp's fissurados (na idade de 2 semanas), sem cicatrização. ....	92
Figura 26: Principais fatores que influenciam a retração por secagem do concreto .....	103
Figura 27: Efeito da UR% na retração por secagem de argamassas com diferentes relações água/cimento.....	109
Figura 28: Relação entre a perda de água na pasta e a umidade relativa .....	111
Figura 29: Representação esquemática da secagem da pasta de cimento hidratada .....	113
Figura 30: Poro capilar durante a secagem.....	113
Figura 31: Movimento da água entre as lamelas do C-S-H.....	116
Figura 32: Tensões superficiais aplicadas a uma gota de água .....	116
Figura 33: Efeito da dessorção na tensão superficial .....	117
Figura 34: Curvas típicas de tensão-deformação para o agregado, pasta de cimento e concreto submetidos à compressão axial.....	120
Figura 35: Comportamento tensão-deformação do concreto convencional sob compressão uniaxial .....	122
Figura 36: Reversibilidade da retração por secagem, após ciclos de secagem/molhagem.....	127
Figura 37: Reversibilidade da fluência, após ciclos de carregamento/descarregamento .....	127
Figura 38: Desenvolvimento da tensão (a); Descrição conceitual da relaxação (b).....	128
Figura 39: Linha de tempo da duração do ensaio, conforme idade de cura (7 e 28 dias) .....	132
Figura 40: Distribuição granulométrica do agregado miúdo (NBR NM 248, ABNT, 2003)	137
Figura 41: Distribuição granulométrica do agregado graúdo (NBR NM 248, ABNT, 2003)	138

Figura 42: Detalhamento do pré-carregamento dos cp's.....	143
Figura 43: Sistema de controle de temperatura e umidade da sala (a); (b) armazenamento dos cp's sobre estrados.....	144
Figura 44: Aparato para medição do comprimento dos cp's.....	145
Figura 45: Representação esquemática de um cp com os pinos.....	146
Figura 46: Realização do ensaio de tração na flexão: NBR 12142 (ABNT, 2010).....	148
(a) Aparato utilizado.....	148
(b) Aspecto da prensa.....	148
Figura 47: Ruptura no terço médio de um dos cp's ensaiados.....	149
Figura 48: Distribuição granulométrica agregado miúdo (NBR NM 248, ABNT 2003).....	152
Figura 49: Distribuição granulométrica do agregado graúdo (NBR NM 248, ABNT, 2003).....	153
Figura 50: Representação esquemática dos pontos de extração das amostras dos cp's pré-carregados (a); aspecto das amostras para o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio e para a análise de microtomografia de raios X (b).....	155
(a) Pontos de extração.....	155
(b) Amostras.....	155
Figura 51: Microtomógrafo de Raios X com computador de gerenciamento.....	159
Figura 52: Estágios de aquisição, reconstrução e geração de modelos tridimensionais da análise de microtomografia de raios X.....	159
Figura 53: Representação esquemática da posição dos transdutores nos cp's e dos pontos de leitura.....	162
Figura 54: Retração dos concretos de referência no tempo de secagem TS=64 semanas: CP V ARI.....	166
Figura 55: Retração dos concretos de referência no tempo de secagem TS=64 semanas: CP IV.....	166
Figura 56: Efeito isolado da variável <i>tempo de secagem</i> : CP V ARI.....	172
Figura 57: Efeito isolado da variável <i>tempo de secagem</i> : CP IV.....	172
Figura 58: Percentuais da retração média, em função da retração final.....	173
Figura 59: Efeito isolado da variável <i>idade de cura</i> : CP V ARI.....	174
Figura 60: Efeito isolado da variável <i>idade de cura</i> : CP IV.....	175

Figura 61: Coeficiente de difusão da água em materiais cimentícios, em função da idade de cura .....	176
Figura 62: Efeito isolado da variável <i>relação a/c</i> : CP V ARI.....	177
Figura 63: Efeito isolado da variável <i>relação a/c</i> : CP IV .....	178
Figura 64: Efeito da porosidade total em função da relação a/c, para diferentes graus de hidratação (0,5; 0,7 e 0,9) em pastas de cimento Portland .....	178
Figura 65: Efeito da relação a/c na perda de umidade durante a secagem .....	179
Figura 66: Efeito da interação das variáveis <i>tempo de secagem</i> e <i>idade de cura</i> : CP V ARI	181
Figura 67: Efeito da interação das variáveis <i>tempo de secagem</i> e <i>idade de cura</i> : CP IV .....	181
Figura 68: Efeito da interação das variáveis <i>tempo de secagem</i> e <i>relação a/c</i> : CP V ARI.....	182
Figura 69: Efeito da interação das variáveis <i>tempo de secagem</i> e <i>relação a/c</i> : CP IV .....	182
Figura 70: Efeito da interação das variáveis <i>idade de cura</i> e <i>relação a/c</i> : CP V ARI.....	184
Figura 71: Efeito da interação das variáveis <i>idade de cura</i> e <i>relação a/c</i> : CP IV.....	184
Figura 72: Efeito do tempo de cura úmida (dias) na difusão de umidade de concretos com cimento Portland comum.....	186
Figura 73: Efeito da interação das variáveis <i>tempo de secagem</i> , <i>idade de cura</i> e <i>relação a/c</i> na retração por secagem: CP V ARI .....	187
Figura 74: Efeito da interação das variáveis <i>tempo de secagem</i> , <i>idade de cura</i> e <i>relação a/c</i> na retração por secagem: CP IV .....	187
Figura 75: Efeito do tempo de cura úmida (dias) na difusão de umidade de concretos com cimento Portland comum.....	188
Figura 76: Efeito isolado da variável <i>pré-carregamento</i> na retração por secagem: CP V ARI .....	189
Figura 77: Efeito isolado da variável <i>pré-carregamento</i> na retração por secagem: CP IV....	190
Figura 78: Pré-carregamento (%) X resistência à compressão (MPa).....	190
Figura 79: Resistência à compressão (MPa) para concretos com CP V ARI e CP IV, para três níveis de pré-carregamento (CAR): 0%, 50% e 75% e idades de cura: 7 e 28 dias.....	192
Figura 80: Comparação das resistências à compressão axial em cp's moldados e em testemunhos das vigas com cimento CP V ARI.....	193
Figura 81: Interação das variáveis <i>tempo de secagem</i> e <i>pré-carregamento</i> na retração por secagem: CP V ARI.....	196

Figura 82: Interação das variáveis <i>tempo de secagem</i> e <i>pré-carregamento</i> na retração por secagem: CP IV .....	196
Figura 83: Interação das variáveis <i>idade de cura</i> e <i>pré-carregamento</i> na retração por secagem: CP V ARI .....	199
Figura 84: Interação das variáveis <i>idade de cura</i> e <i>pré-carregamento</i> na retração por secagem: CP IV .....	199
Figura 85: Interação das variáveis <i>relação a/c</i> e <i>pré-carregamento</i> : CP V ARI.....	201
Figura 86: Interação das variáveis <i>relação a/c</i> e <i>pré-carregamento</i> : CP IV.....	202
Figura 87: Volume (%) das fases constituintes dos concretos com CP V ARI, nas relações a/c 0,35, 0,50 e 0,70, para diferentes graus de hidratação: (a) 25%; (b) 50% e (c) 100% .....	205
Figura 88: Volume (%) das fases constituintes dos concretos com CP IV, nas relações a/c 0,35, 0,50 e 0,70, para diferentes graus de hidratação: (a) 25%; (b) 50% e (c) 100% .....	207
Figura 89: Interação das variáveis tempo de secagem, idade de cura e pré-carregamento: CP V ARI .....	209
Figura 90: Interação das variáveis tempo de secagem, idade de cura e pré-carregamento: CP IV .....	209
Figura 91: Interação das variáveis <i>tempo de secagem</i> , <i>relação a/c</i> e <i>pré-carregamento</i> : CP V ARI .....	210
Figura 92: Interação das variáveis <i>tempo de secagem</i> , <i>relação a/c</i> e <i>pré-carregamento</i> : CP IV .....	211
Figura 93: Interação das variáveis <i>idade de cura</i> , <i>relação a/c</i> e <i>pré-carregamento</i> : CP V ARI .....	212
Figura 94: Interação das variáveis <i>idade de cura</i> , <i>relação a/c</i> e <i>pré-carregamento</i> : CP IV ...	212
Figura 95: Efeito isolado da variável <i>idade de pré-carregamento</i> na retração por secagem: CP IV .....	214
Figura 96: Efeito da interação das variáveis <i>tempo de secagem</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> na retração por secagem: CP IV .....	215
Figura 97: Interação das variáveis <i>idade de cura</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> : CP V ARI	216
Figura 98: Interação das variáveis <i>relação a/c</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> : CP V ARI.....	217
Figura 99: Interação das variáveis <i>relação a/c</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> : CP IV .....	217
Figura 100: Interação das variáveis <i>pré-carregamento</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> : CP V ARI .....	218



Figura 101: Interação das variáveis <i>pré-carregamento</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> : CP IV .....	219
Figura 102: Interação das variáveis <i>tempo de secagem</i> , <i>relação a/c</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> : CP V ARI.....	220
Figura 103: Interação das variáveis <i>idade de cura</i> , <i>relação a/c</i> , e <i>idade de pré-carregamento</i> : CP V ARI .....	221
Figura 104: Interação das variáveis <i>idade de cura</i> , <i>relação a/c</i> , e <i>idade de pré-carregamento</i> : CP IV .....	221
Figura 105: Efeito da interação das variáveis <i>idade de cura</i> , <i>pré-carregamento</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> : CP V ARI.....	223
Figura 106: Interação das variáveis <i>relação a/c</i> , <i>pré-carregamento</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> : CP V ARI.....	223
Figura 107: Interação das variáveis <i>relação a/c</i> , <i>pré-carregamento</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> : CP IV .....	224
Figura 108: Aumento/redução percentual da retração por secagem dos concretos pré-carregados em relação aos de referência, em função dos níveis de pré-carregamento (25%, 50% e 75%) .....	225
Figura 109: Retração final (TS=64 semanas) dos concretos com CP V ARI, nas relações a/c 0,35; 0,50 e 0,70, considerando-se as idades de cura no intervalo entre 7 e 28 dias.....	228
Figura 110: Retração final (TS=64 semanas) dos concretos com CP IV, nas relações a/c 0,35; 0,50 e 0,70, considerando-se as idades de cura no intervalo entre 7 e 28 dias.....	229
Figura 111: Variação da retração por secagem no TS=64 semanas para incrementos de carregamento de 5%, considerando-se as relações a/c 0,35; 0,50 e 0,70, para as idades de cura (a) 28 dias e (b) 7 dias .....	230
Figura 112: Variação da retração por secagem no TS=64 semanas para incrementos de carregamento de 5%, considerando-se as relações a/c 0,35; 0,50 e 0,70, para as idades de cura (a) 28 dias e (b) 7 dias .....	231
Figura 113: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64 semanas, em função dos níveis da variável <i>idade de pré-carregamento</i> , sendo (a) CAR=25%; (b) CAR=50%; (c) CAR=75%: CP V ARI, cura 28 dias .....	232
Figura 114: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64 semanas, em função dos níveis da variável <i>relação a/c</i> , sendo (a) CAR=0%; (b) CAR=25%; (c) CAR=50%; (d) CAR=75%: CP V ARI, cura 28 dias .....	233
Figura 115: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64 semanas, em função dos níveis da variável <i>idade de pré-carregamento</i> , sendo (a) CAR=25%; (b) CAR=50%; (c) CAR=75%: CP V ARI com cura de 7 dias.....	235

Figura 116: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64, em função dos níveis da variável <i>relação a/c</i> , considerando-se (a) CAR=0%; (b) CAR=25%; (c) CAR=50%; (d) CAR=75%: CP V ARI, cura 7 dias.....	236
Figura 117: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64, em função dos níveis da variável <i>idade de pré-carregamento</i> , considerando-se (a) CAR=25%; (b) CAR=50%; (c) CAR=75%: CP IV, cura 28 dias .....	237
Figura 118: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64 semanas, em função dos níveis da variável <i>relação a/c</i> , considerando-se (a) CAR=0%; (b) CAR=25%; (c) CAR=50% e (d) CAR=75%: CP IV: cura 28 dias.....	238
Figura 119: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64 semanas, em função dos níveis da variável <i>idade de pré-carregamento</i> , considerando-se (a) CAR=25%; (b) CAR=50%; (c) CAR=75%: CP IV, cura 7 dias.....	239
Figura 120: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ) para o tempo de secagem TS=64, em função dos níveis da variável <i>relação a/c</i> , considerando-se (a) CAR=0%; (b) CAR=25%; (c) CAR=50% e (d) CAR=75%: CP IV, cura 7 dias .....	240
Figura 121: Resistência à tração, ao longo do tempo, na flexão dos concretos com cimento CP V ARI .....	242
Figura 122: Resistência à tração, ao longo do tempo, na flexão dos concretos com cimento CP IV .....	242
Figura 123: Porosidade total (%) dos concretos com CP V ARI, relação a/c=0,50, pré-carregados na idade de 3 dias e submetidos a duas idades de cura (3 e 28 dias) .....	245
Figura 124: Comparação entre a porosidade total (%) e a retração residual ( $\times 10^{-6}$ ): CP V ARI, relação a/c=0,50, pré-carregados na idade de 3 dias e submetidos a duas idades de cura (3 e 28 dias) .....	246
Figura 125: Porosidade total (%) X resistência à compressão axial (MPa): CP V ARI, relação a/c=0,50, pré-carregados na idade de 3 dias e submetidos a duas idades de cura (3 e 28 dias) .....	247
Figura 126: Volume de mercúrio intrudido (ml/g) <i>versus</i> diâmetros de poros (nm) de amostras de concretos pré-carregados (SUP e INF) e concretos de referência, sendo (a) Idade de cura = 3 dias e (b) Idade de cura = 28 dias .....	248
Figura 127: Volume de mercúrio acumulado (ml/g) <i>versus</i> diâmetros de poros ( $\mu\text{m}$ ) das amostras de concretos pré-carregados (SUP e INF) e concretos de referência, sendo (a) Idade de cura = 3 dias e (b) Idade de cura = 28 dias .....	249
Figura 128: Volume de mercúrio (%) de acordo com as faixas de diâmetro ( $\mu\text{m}$ ) dos poros, sendo (a) Idade de cura = 3 dias e (b) Idade de cura = 28 dias .....	251

Figura 129: Porosidade de gel (%) e porosidade capilar (%) para as amostras de referências (REF) e amostras pré-carregadas (SUP e INF, para as idades de cura (3 e 28 dias).....	253
Figura 130: Percentuais de volume de mercúrio intrudido nos poros com diâmetros menores e maiores do que 0,05 $\mu\text{m}$ , para as idades de cura (3 e 28 dias): amostras de referências (REF) X média amostras pré-carregadas (SUP e INF).....	254
Figura 131: Diâmetros críticos (nm) das amostras de referência e pré-carregadas SUP e INF, nas idades de cura de 3 e 28 dias .....	255
Figura 132: Aspecto do <i>software</i> CTAn. Em (a) tem-se uma das imagens de projeção da amostra; (b) corresponde ao conjunto de fatias tomográficas em sequência referentes à secção transversal da imagem em (a); e (c) corresponde à fatia tomográfica marcada pela linha em vermelho na imagem em (a) e selecionada em (b). .....	257
Figura 133: Definição da área de interesse na seção transversal da Amostra 30, identificando a região correspondente à argamassa (após a exclusão da brita) .....	258
Figura 134: Imagem de binarização da mesma amostra, obtida a partir a determinação, no histograma, do intervalo de tons de cinza, referente à fase sólida do concreto dentro da região de interesse .....	258
Figura 135: Janela de análise 3D da amostra INF, considerando a binarização para o concreto, demonstrada na Figura 141.....	259
Figura 136: Conteúdo do arquivo de texto gerado a partir da análise 3D para a fase binarizada, utilizando somente os dados básicos do <i>software</i> CTAn. ....	259
Figura 137: Imagem de renderização 3D da amostra REF curada por 3 dias (Amostra 22)..	260
Figura 138: Porosidade percentual das amostras de referência (REF) e pré-carregada (car=75%) obtidas por microtomografia de raios X (MICROT) e porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), para idades de cura=3 e 28 dias.....	261
Figura 139: Velocidade de propagação da onda ultrassônica para os concretos curados por 7 e 28 dias.....	263
Figura 140: Comparação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s) para os concretos de referência e pré-carregado ea retração residual ( $\times 10^{-6}$ ) para as idades de cura de 7 e 28 dias .....	265
Figura 141: Efeito do carregamento precoce associado à cura por imersão em água.....	274

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	.....	45
Equação 2	.....	47
Equação 3	.....	48
Equação 4	.....	53
Equação 5	.....	76
Equação 6	.....	76
Equação 7	.....	77
Equação 8	.....	77
Equação 9	.....	84
Equação 10	.....	84
Equação 11	.....	85
Equação 12	.....	85
Equação 13	.....	85
Equação 14	.....	85
Equação 15	.....	86
Equação 16	.....	86
Equação 17	.....	119
Equação 18	.....	124
Equação 19	.....	146
Equação 20	.....	146
Equação 21	.....	148
Equação 22	.....	148
Equação 23	.....	162
Equação 24	.....	264

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características da hidratação das fases do cimento .....	46
Quadro 2: Métodos utilizados para caracterizar a estrutura de poros nos materiais cimentícios, de acordo com a faixa de tamanhos de poros onde são aplicáveis .....	62
Quadro 3: Classificação do tamanho dos poros .....	63
Quadro 4: Volumes das fases constituintes de um concreto com cimento Portland, traço 1:2:3, relação a/c 0,55, para $\alpha = 100\%$ .....	78
Quadro 5: Evolução das resistências do concreto. ....	93
Quadro 6: Leis de Kelvin e Laplace .....	114
Quadro 7: Convenção adotada para identificação dos cp's prismáticos .....	141
Quadro 8: Variações da retração média em função dos níveis da variável <i>relação a/c</i> : CP V ARI e CP IV .....	180
Quadro 9: Valores das deformações médias (expansão/retração), para TS=1 semana .....	183
Quadro 10: Retrações médias dos concretos ( $\times 10^{-6}$ ) com CPV ARI: interação das variáveis <i>tempo de secagem e pré-carregamento</i> .....	197
Quadro 11: Retrações médias dos concretos ( $\times 10^{-6}$ ) com CP IV: interação das variáveis <i>tempo de secagem e pré-carregamento</i> .....	197
Quadro 12: Variações entre os níveis da variável <i>idade de cura</i> para cada nível da variável <i>pré-carregamento</i> : CP V ARI e CP IV .....	200
Quadro 13: Comparação entre os valores de retração média dos concretos com CP V ARI: <i>relação a/c X pré-carregamento</i> .....	202
Quadro 14: Variação dos valores de retração média, comparando-se os concretos de referência com os concretos pré-carregados, para cada nível da variável <i>relação a/c</i> - CP V ARI.....	202
Quadro 15: Comparação entre os valores de retração média de acordo com a interação das variáveis: <i>relação a/c e pré-carregamento</i> para os concretos com – CP IV .....	203
Quadro 16: Variação dos valores de retração média, comparando-se os concretos de referência com os concretos pré-carregados, para cada nível da variável <i>relação a/c</i> - CP IV .....	203
Quadro 17: Volumes dos constituintes do concreto, considerando-se as <i>fases resistente e não resistente</i> .....	204
Quadro 18: Valor médio das variáveis .....	228
Quadro 19: Classificação da compacidade concreto em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica conforme 8802 (ABNT, 1994).....	263

Quadro 20: Aumento/Redução percentual da retração média, em relação aos concretos de referência, devido à variação dos níveis de pré-carregamento, para as relações a/c e idades de cura adotadas: CP V ARI e CP IV .....	276
Quadro 21: Aumento/Redução percentual da retração média dos concretos pré-carregados nas idades de 3 e 7 dias, em relação aos pré-carregados na idade de 1 dia, para as relações a/c e idades de cura adotadas: CP V ARI e CP IV .....	277
Quadro 22: Variações (%) da velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s) e da retração média por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), em função da idade de cura (7 dias $\rightarrow$ 28 dias), para os dois níveis de pré-carregamento (0% e 75%) .....	278
Quadro 23: Redução (%) da porosidade total, em função da idade de cura (3 dias $\rightarrow$ 28 dias), carregamento: 0% e 75% .....	279
Quadro 24: Diâmetro crítico (nm), em função da idade de cura (3 dias $\rightarrow$ 28 dias), carregamento: 0% e 75% .....	279
Quadro 25: Valores da porosidade total (%) dos concretos pré-carregados e de referência, obtidos através das análises de porosimetria por intrusão de mercúrio e de microtomografia de raios X, para a idade de cura de 28 dias .....	280

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Níveis das variáveis independentes ou fatores controláveis.....	132
Tabela 2: Matriz experimental do projeto experimental – ETAPA 1.....	133
Tabela 3: Número de combinações, considerando a idade de cura .....	133
Tabela 4: Caracterizações química, física e mecânica do cimento CP V ARI.....	135
Tabela 5: Caracterizações química, física e mecânica do cimento CP IV .....	136
Tabela 6: Caracterização física do agregado miúdo.....	137
Tabela 7: Caracterização física do agregado graúdo .....	138
Tabela 8: Traços unitários e consumo de materiais: CP V ARI.....	139
Tabela 9: Traços unitários e consumo de materiais: CP IV .....	139
Tabela 10: Níveis das variáveis independentes – ETAPA 2 .....	150
Tabela 11: Caracterizações química, física e mecânica do cimento CP V ARI.....	151
Tabela 12: Caracterização física do agregado miúdo.....	152
Tabela 13: Caracterização física do agregado graúdo .....	153
Tabela 14: Traços unitários e o consumo de materiais - ETAPA 2 .....	154
Tabela 15: Posição do cp de onde foram extraídas as amostras.....	155
Tabela 16: Parâmetros do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.....	157
Tabela 17: Amostras encaminhadas para análise de microtomografia de raios X .....	158
Tabela 18: Avaliação estatística através da ANOVA: CP V ARI.....	169
Tabela 19: Avaliação estatística através da ANOVA: CP IV .....	170
Tabela 20: Modelos de regressão desenvolvidos para os cimentos CP V ARI e CP IV, considerando-se os valores da retração final (TS=64 semanas).....	227
Tabela 21: Características físicas das amostras de referência (REF), das amostras extraídas da parte superior (SUP) e inferior (INF) dos concretos (CP V ARI) curados por 3 e 28 dias ....	244
Tabela 22: Volume de mercúrio intrudido (%) de acordo com diferentes faixas de diâmetro ( $\mu\text{m}$ ) dos poros, para as idades de cura (3 e 28 dias).....	250
Tabela 23: Comparação entre as porosidades (%) das amostras, para as idades de cura (3 e 28 dias) .....	253

Tabela 24: Porosidade percentual das amostras, para as idades de cura (3 e 28 dias), de acordo com a análise de microtomografia de raios X .....	261
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----



## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – American Iron and Steel Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

CEM - Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

LAMTAC – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído da UFRGS

MCT –Ministério da Ciência e Tecnologia

MEV – Microscopia Eletrônica de Varreduraentro de Microscopia

NORIE - Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação da UFRGS

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UR – Umidade relative do ambiente (%)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	30
1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA .....	33
1.2 ORIGINALIDADE DO TEMA .....	37
1.3 OBJETIVOS .....	38
1.3.1 Objetivo geral .....	38
1.3.2 Objetivos específicos .....	38
1.4 LIMITAÇÕES .....	38
1.5 ESTRUTURA DA TESE .....	39
<b>2 DESENVOLVIMENTO DA MICROESTRUTURA DA PASTA ENDURECIDA A PARTIR DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO</b> .....	41
2.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND E FORMAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA PASTA ENDURECIDA .....	41
2.1.1 Efeito de adições minerais na microestrutura .....	46
2.1.1.1 Reações pozolânicas .....	47
2.1.2 Interface pasta-agregado .....	49
2.2 ESTRUTURA DA PASTA DE CIMENTO ENDURECIDA .....	51
2.2.1 Sólidos na pasta de cimento hidratada .....	52
2.2.1.1 C-S-H .....	53
2.2.1.2 CH .....	58
2.2.1.3 Sulfoaluminatos de cálcio .....	59
2.2.1.4 Grãos anidros .....	59
2.2.2 Porosidade da pasta endurecida .....	59
2.2.2.1 Caracterização e classificação do sistema de poros .....	60
2.2.2.2 Tipos de poros .....	64
2.2.3 Água da pasta endurecida .....	69
2.2.3.1 Água quimicamente combinada .....	69
2.2.3.2 Água adsorvida .....	70
2.2.3.3 Água interlamelar .....	70
2.2.3.4 Água capilar .....	71

2.2.4 Principais fatores que afetam a estrutura de poros .....	72
2.2.4.1 Grau de hidratação.....	72
2.2.4.2 Relação água/cimento.....	73
2.2.4.3 Distribuição do tamanho da partícula do cimento.....	73
2.2.4.4 Efeito da compactação, condições de exposição e tipo de agregado.....	74
2.2.5 Volume das fases constituintes da pasta.....	74
2.3 AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO ( <i>SELF-HEALING</i> ) .....	79
2.3.1 Tipos de autocicatrização .....	81
2.3.2 Mecanismos da autocicatrização natural.....	82
2.3.3 Fatores que influenciam a autocicatrização natural do concreto .....	88
2.3.3.1 Influência da relação a/c .....	88
2.3.3.2 Influência da cura .....	91
2.3.3.3 Influência do tipo de cimento .....	93
2.3.3.4 Influência da tensão aplicada.....	94
2.3.3.5 Influência da largura da fissura .....	95
2.3.3.6 Influência da idade do carregamento.....	97
2.4 VARIAÇÕES DE VOLUME NAS PRIMEIRAS IDADES DO CONCRETO .....	97
2.4.1 Expansão .....	98
2.4.2 Retração.....	98
<b>3 RETRAÇÃO POR SECAGEM.....</b>	<b>101</b>
3.1 FATORES QUE INFLUENCIAM A RETRAÇÃO POR SECAGEM.....	101
3.1.1 Tipo de cimento.....	104
3.1.2 Relação água/cimento .....	106
3.1.3 Tempo de cura.....	107
3.1.4 Tempo de secagem.....	108
3.2 PERDA DE ÁGUA.....	109
3.3 MECANISMOS DA RETRAÇÃO POR SECAGEM.....	111
3.3.1 Mecanismo da depressão capilar.....	112
3.3.2 Mecanismo da pressão de desligamento .....	115
3.3.3 Mecanismo da variação da tensão superficial.....	116
3.4 COMPORTAMENTO DO CONCRETO SOB TENSÃO.....	118

3.4.1 Comportamento do concreto sob compressão axial.....	118
3.4.2 Comportamento do concreto sob tração.....	123
3.4.3 Relação entre as resistências à compressão e à tração .....	124
3.5 ESTABILIDADE DIMENSIONAL.....	125
3.5.1 Deformações por retração e fluência.....	126
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>129</b>
4.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO – ETAPA 1.....	130
4.1.1 Definição das variáveis .....	130
4.1.2 Definição da matriz experimental .....	133
4.1.3 Seleção e caracterização dos materiais .....	134
4.1.3.1 Cimentos.....	134
4.1.3.2 Agregados.....	136
4.1.4 Dosagem dos concretos .....	139
4.1.5 Moldagem, desmoldagem e cura dos cp's .....	140
4.1.6 Pré-carregamento dos cp's .....	142
4.1.7 Realização do ensaio de retração por secagem .....	143
4.1.8 Ensaio de resistência à tração na flexão .....	147
4.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO – ETAPA 2.....	149
4.2.1 Definição das variáveis .....	149
4.2.2 Definição da matriz experimental .....	150
4.2.3 Seleção e caracterização dos materiais .....	150
4.2.3.1 Cimento CP V ARI.....	151
4.2.3.2 Agregados.....	152
4.2.4 Dosagem dos concretos .....	154
4.2.5 Moldagem, desmoldagem e cura dos concretos.....	154
4.2.6 Pré-carregamento e cura dos corpos de prova .....	154
4.2.7 Extração das amostras para as análises.....	155
4.2.8 Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio .....	156
4.2.9 Análise de Microtomografia de raios X .....	157
4.2.10 Ensaio para determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica.....	161

<b>5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>164</b>
5.1 COMPARAÇÃO DA RETRAÇÃO DOS CONCRETOS DE REFERÊNCIA, NO TEMPO DE SECAGEM DE 64 SEMANAS, COM OS VALORES CALCULADOS A PARTIR DO MODELO DO CEB-FIP MODEL CODE 1990 .....	165
5.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM .....	167
5.2.1 Apresentação dos resultados da análise de variância (ANOVA).....	168
5.2.1.1 Efeito isolado da variável <i>tempo de secagem</i> .....	171
5.2.1.2 Efeito isolado da variável <i>idade de cura</i> .....	174
5.2.1.3 Efeito isolado da variável <i>relação água/cimento</i> .....	177
5.2.1.4 Efeito da interação das variáveis: <i>tempo de secagem</i> e <i>idade de cura</i> .....	180
5.2.1.5 Efeito da interação das variáveis: <i>tempo de secagem</i> e <i>relação água/cimento</i> .....	182
5.2.1.6 Efeito da interação das variáveis: <i>idade de cura</i> e <i>relação a/c</i> .....	183
5.2.1.7 Efeito da interação das variáveis: <i>tempo de secagem, idade de cura</i> e <i>relação água/cimento</i> .....	186
5.2.1.8 Efeito isolado da variável <i>pré-carregamento</i> .....	189
5.2.1.9 Efeito da interação das variáveis: <i>tempo de secagem</i> e <i>pré-carregamento</i> .....	195
5.2.1.10 Efeito da interação das variáveis <i>idade de cura</i> e <i>pré-carregamento</i> .....	198
5.2.1.11 Efeito da interação das variáveis <i>relação água/cimento</i> e <i>pré-carregamento</i> .....	201
5.2.1.12 Efeito da interação das variáveis: <i>tempo de secagem, idade de cura</i> e <i>pré-carregamento</i> .....	208
5.2.1.13 Efeito da interação das variáveis: <i>tempo de secagem, relação a/c</i> e <i>pré-carregamento</i> .....	210
5.2.1.14 Efeito da interação das variáveis: <i>idade de cura, relação água/cimento</i> e <i>pré-carregamento</i> .....	211
5.2.1.15 Efeito isolado da variável <i>idade de pré-carregamento</i> .....	213
5.2.1.16 Efeito da interação das variáveis: <i>tempo de secagem</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> .....	215
5.2.1.17 Efeito da interação das variáveis: <i>idade de cura</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> .....	215
5.2.1.18 Efeito da interação das variáveis: <i>relação água/cimento</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> .....	216
5.2.1.19 Efeito da interação das variáveis: <i>pré-carregamento</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> .....	218
5.2.1.20 Efeito da interação das variáveis: <i>tempo de secagem, relação água/cimento</i> e <i>idade de pré-carregamento</i> .....	220

5.2.1.21 Efeito da interação das variáveis: <i>idade de cura, relação água/cimento e idade de pré-carregamento</i> .....	220
5.2.1.22 Efeito da interação das variáveis: <i>idade de cura, pré-carregamento e idade de pré-carregamento</i> .....	222
5.2.1.23 Efeito da interação das variáveis: <i>relação água/cimento, pré-carregamento e idade de pré-carregamento</i> .....	223
<b>5.3 MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR PARA RETRAÇÃO FINAL</b> .....	226
5.3.1 Comparação múltipla de médias .....	232
<b>5.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS</b> .....	241
<b>5.5 INFLUÊNCIA DO PRÉ-CARREGAMENTO NA POROSIDADE DOS CONCRETOS</b> .....	243
5.5.1 Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio .....	243
<b>5.6 DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE ATRAVÉS DA ANÁLISE DE MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS X</b> .....	256
<b>5.7 INFLUÊNCIA DO PRÉ-CARREGAMENTO NA COMPACIDADE DOS CONCRETOS ESTUDADOS</b> .....	262
<b>5.8 DISCUSSÃO FINAL DOS RESULTADOS</b> .....	266
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	275
6.1 CONCLUSÕES.....	280
6.2 SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	282
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	284
<b>APÊNDICES</b> .....	299

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à sua resistência e facilidade de execução, entre outras propriedades amplamente conhecidas em engenharia, o concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, em todo o planeta (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.4). O uso intensivo do concreto promoveu, ao longo do tempo, o desenvolvimento de inúmeros avanços tecnológicos implantados na indústria da construção civil. No entanto, existe um senso quanto à existência de lacunas entre conhecimento e prática (BENTUR e MITCHEL, 2008, p.259). Apesar de todo o conhecimento disponível sobre o concreto, suas propriedades e recomendações de uso, muitas estruturas apresentam-se degradadas, antes mesmo de atingirem a vida útil pretendida. Assim, são necessárias frequentes intervenções para reparo das estruturas havendo, em consequência, consumo de quantidades expressivas de materiais, com importantes impactos financeiros e ambientais.

De acordo com Bentur e Mitchel (2008, p.260), a estratégia para transpor estas lacunas deve consistir em considerar as propriedades do concreto e suas interações com a estrutura, enfatizando-se a durabilidade. Buscando minimizar a incidência desses problemas, diversos segmentos da sociedade, como órgãos governamentais, associações de profissionais, universidades e instituições técnicas vêm reunindo esforços para estabelecer normativas quanto ao desempenho do concreto, com vistas à manutenção da qualidade e durabilidade.

A ocorrência de fissuras pode ocasionar a deterioração prematura do concreto, aumentando a permeabilidade da estrutura e tornando-a mais suscetível à degradação (AURICH, 2008, p. 31). As fissuras podem ter inúmeras causas, dentre as quais, destacam-se as variações volumétricas que ocorrem desde as primeiras idades do concreto até idades avançadas. A retração é um fenômeno inerente aos compósitos cimentícios, correspondendo a uma contração volumétrica que, sob determinadas condições, pode levar à fissuração do concreto. Existem vários tipos de retração, associados a diferentes fenômenos, os quais podem se manifestar antes ou depois do endurecimento do concreto. A retração por secagem ocorre no

período do concreto endurecido devido à saída da água, durante a secagem do material. Além das variações volumétricas, a ocorrência de fissuras também pode ser desencadeada por falhas em alguma das etapas da execução da estrutura, como a remoção antecipada do escoramento, após o lançamento do concreto.

Avanços nas áreas de cálculo estrutural e tecnologia de materiais possibilitaram a adoção de edifícios caracterizados por um maior número de pavimentos, maiores vãos entre pilares, redução na altura de lajes e vigas, tornando as estruturas mais suscetíveis a deformações. Em paralelo, também ocorreram mudanças nos processos gerenciais, observando-se que algumas empresas buscaram soluções para aumentarem o ritmo de suas obras, garantindo competitividade no mercado da construção. Um exemplo disso é a adoção de um tempo menor de execução da estrutura de concreto, através da remoção antecipada do escoramento.

Com isso, a estrutura é submetida a um carregamento precoce, quando o concreto ainda não desenvolveu, adequadamente, suas propriedades mecânicas, apresentando baixas resistências e baixo módulo de elasticidade. Nessas situações, é comum, também, o início antecipado das alvenarias, sobrecarregando ainda mais a estrutura. Com frequência tem sido verificada a incidência de fissuras e rupturas localizadas em paredes de vedação, desaprumos em esquadrias, além de destacamentos em revestimentos de fachadas de edifícios nos quais as estruturas são menos rígidas devido às tipologias arquitetônicas atuais. Tais manifestações patológicas podem estar relacionadas a deformações excessivas, ou à incompatibilidade entre a estrutura de concreto armado e as alvenarias de vedação. Para Vieira e Dal Molin (2011, p. 26), a velocidade maior na execução da estrutura de concreto e da alvenaria, além de possíveis inadequações na sequência destas etapas da obra, bem como a adoção de práticas construtivas que não considerem a interação desses dois subsistemas, podem estar relacionados à grande incidência das manifestações patológicas citadas.

Os problemas gerados pela remoção antecipada do escoramento da estrutura tem despertado interesse no meio técnico e acadêmico, o que pode ser constatado através de pesquisas recentes que abordam os efeitos desta prática construtiva nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto (SALVADOR, 2007; VIEIRA, 2008, RODRIGUES, 2010).



Para Oluokun<sup>1</sup> *et al.* (1990, *apud* NEHDI e SOLIMAN, 2011, p. 57), acelerar etapas construtivas para obter ganhos econômicos pode conduzir a falhas importantes durante a construção devido ao conhecimento inadequado do comportamento do concreto nas primeiras idades. Com a remoção antecipada do escoramento, o concreto é submetido a sobrecargas não previstas, desencadeando processos de deformação, os quais se somam às deformações inerentes do concreto nas primeiras idades. Segundo Nehdi e Soliman (2011, p. 66), nas primeiras idades as tensões que causam microfissuração são tipicamente resultantes de uma combinação de três tipos de deformações: dilatação térmica, retração autógena e retração por secagem. Portanto, o efeito das deformações causadas pela remoção antecipada do escoramento, combinado ao efeito de todos os processos inerentes ao concreto nas primeiras idades, pode intensificar alterações microestruturais, afetando o adequado desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto em idades mais avançadas e a durabilidade da estrutura.

Inúmeros estudos têm sido realizados para a obtenção de materiais mais eficientes, duráveis e sustentáveis, mantendo o desempenho pretendido ao longo de sua vida útil. Um dos assuntos que tem despertado um interesse crescente, nos últimos anos, é a capacidade de autocicatrização do concreto, através da qual as fissuras são naturalmente preenchidas, total ou parcialmente, quando existe a disponibilidade de água, sem a necessidade de intervenções externas para reparo (YANG *et al.*, 2009, p. 382). A investigação da autocicatrização de fissuras normalmente é realizada comparando-se o desempenho do concreto antes e após o dano que gerou a ocorrência das fissuras. Para tanto, o concreto é pré-fissurado através da aplicação de diferentes níveis de carregamento, sendo posteriormente exposto à cura úmida. Na maior parte dos trabalhos experimentais, a cicatrização de fissuras é investigada com relação à estanqueidade do concreto, sendo menor o número de pesquisas abordando suas propriedades mecânicas (ter HEIDE, 2005, p.1).

A presente tese propõe a investigação da influência do carregamento precoce na retração por secagem de concretos produzidos com dois tipos de cimento, submetidos a diferentes idades de cura. O estudo tem, como foco principal, as alterações impostas pelo pré-carregamento na microestrutura do concreto, as quais apresentam reflexos importantes na sua porosidade. Além disso, busca-se identificar a ocorrência de autocicatrização (*self-healing*) das microfissuras geradas pelo pré-carregamento, considerando-se a adoção de cura prolongada.

---

<sup>1</sup>Oluokun FA, Burdette EG and Deatherage JH (1990) Early-age concrete: strength prediction by maturity – another look. *ACI Materials Journal* 87(6): 565–572.

A medição, ao longo do tempo, das deformações causadas pela retração por secagem em concretos pré-fissurados devido ao carregamento precoce é apresentada, nesta tese, como forma de investigação da capacidade de autoconsolidação ou autocicatrização do concreto. Portanto, em última análise, através deste estudo, buscou-se oferecer contribuições ao conhecimento disponível quanto ao desempenho do concreto frente a situações de uso, confirmando que a cura prolongada constitui-se em um método bastante eficiente para a atenuação dos efeitos prejudiciais da microfissuração precoce.

## 1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Devido ao expressivo número de estruturas degradadas prematuramente, observa-se que a preocupação com relação à manutenção da durabilidade do concreto tem sido crescente em diversos segmentos da sociedade. Assim, tanto o meio acadêmico, como a comunidade técnica têm buscado soluções integradas, buscando garantir o desempenho adequado do concreto ao longo da vida útil da estrutura. Nesse sentido, a melhoria do desempenho do concreto traz reflexos positivos através da redução dos recursos financeiros empregados na realização de reparos das estruturas. Além disso, pode-se dizer que existem benefícios ambientais indiretos, associados à melhoria do desempenho e ao aumento da durabilidade do concreto, uma vez que volumes menores de materiais são consumidos para as intervenções de reparo, evitando-se o consumo de matéria prima e de energia.

Inserido nesse contexto, o próprio consumidor mostra-se hoje muito mais preocupado e exigente com relação à qualidade da estrutura. A ABNT, motivada pela busca em atender às expectativas da sociedade, em consenso com diversos órgãos governamentais, associações de profissionais, universidades e instituições técnicas, realizou um extenso trabalho de revisão do seu conjunto normativo, através de *Comissões de Estudos*, culminando com a colocação em vigor da ABNT NBR 15575 “Edificações Habitacionais – Desempenho” (CBIC, 2013, p.6). Esta norma apresenta os principais itens que devem ser atendidos com vistas à manutenção do desempenho das estruturas de concreto, ao longo de sua vida útil.

Diante desse cenário, nas últimas décadas a comunidade científica vem realizando pesquisas, que buscam contribuir para o desenvolvimento de concretos adequados às exigências de manutenção da qualidade ao longo de sua vida útil. Inúmeras linhas de pesquisa vêm sendo consolidadas, no sentido de conhecer o desempenho do concreto frente a diferentes condições de uso, considerando-se suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

Sabe-se que as propriedades mecânicas do concreto dependem da sua microestrutura. A porosidade e a compacidade são fatores fundamentais na determinação da resistência do concreto. Além disso, a porosidade total e a estrutura de poros efetiva também exercem influência direta nas propriedades de transporte do concreto, afetando, portanto, os processos de difusão de umidade e de agentes agressivos. A porosidade total e a interconectividade dos poros são reduzidas pelo grau de compactação e pelo grau de hidratação do cimento (BANTHIA *et al.*, 2004, p. 1651). Assim, pode-se dizer que a cura exerce papel fundamental no desenvolvimento da capacidade resistente do concreto, tendo em vista que favorece a hidratação do cimento, devendo ser tão prolongada quanto possível.

Além da porosidade, as fissuras também exercem influência nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. As causas da fissuração são diversas, mas, de um modo geral, podem ser classificadas em carregamento mecânico e efeitos ambientais (KHAM<sup>2</sup>, *et al.*, 2006, p. 4). Frequentemente, as fissuras originam a deterioração prematura de estruturas e surgem quando a capacidade resistente do concreto é excedida. Muitas vezes, não têm influência significativa na estabilidade do elemento estrutural. No entanto, podem reduzir a estanqueidade do concreto, constituindo-se em caminhos preferenciais para o ingresso de agentes agressivos, prejudicando, assim, a funcionalidade e a durabilidade da estrutura (BAROGUEL-BOUNY *et al.*, 2006; WITTMANN *et al.*, 2009; ROOIJ, *et al.*, 2013, p.4). Em concretos bem hidratados e bem compactados, com baixas relações água/cimento, o sistema interno de poros constitui-se apenas em um caminho potencial, por onde a água e os agentes agressivos podem penetrar. No entanto, as microfissuras, que são significativamente maiores em tamanho, se comparadas aos vazios capilares, podem se conectar e modificar a microestrutura, aumentando o transporte de massa no concreto (EGHTESADI, 2014, p. 25).

A retração por secagem é um fenômeno de grande complexidade, bastante sensível às variações ambientais. Essa propriedade do concreto depende, portanto, das características ambientais existentes onde o elemento estrutural está localizado, bem como da composição do concreto e, especialmente, do processo de cura (BAŽANT, 1999, p.1). Corresponde a uma contração volumétrica causada pela saída da água da pasta de cimento hidratada, quando existem gradientes de umidade. Assim, a UR% do ambiente externo, mais baixa do que a umidade interna do concreto, atua como força motriz, iniciando-se a secagem das camadas superficiais até as camadas mais profundas do elemento estrutural, por difusão. A natureza

---

<sup>2</sup>TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR E-C107, Control of Cracking in Concrete - *State of the Art*

física da interação entre as partículas de água e o esqueleto do concreto, em nível microestrutural, é bastante complexa, sendo dependente da dimensão dos poros e do teor de umidade (BAŽANT<sup>3</sup>, 1972, *apud* GAWIN, 2007, p. 580). Durante a secagem, o concreto sofre deformações em função das tensões estabelecidas na sua rede de poros, sem a influência da ação de carregamento, podendo haver fissuração caso seja ultrapassada a sua capacidade resistente. A microfissuração associada à secagem pode ter um significativo impacto nas propriedades mecânicas do concreto (SA *et al.*, 2008, p. 947).

Pode-se dizer que diversos fenômenos físicos, químicos, térmicos, de difusão de umidade ou mecânicos influenciam as propriedades do concreto. Tais fenômenos interagem entre si, não devendo, portanto, ser analisados isoladamente (AURICH, 2008, p.35). Diversos estudos experimentais (ter HEIDE, 2005; GRANGER *et al.*, 2005; ter HEIDE e SCHLANGEN, 2007; ZHONG e YAO, 2009; HUA, 2010, ROOIJ, 2013, entre outros) têm sido desenvolvidos, no sentido de identificar o desempenho mecânico e de durabilidade de concretos sujeitos à microfissuração causada por carregamento precoce. Para a realização desses estudos, os concretos normalmente são submetidos a diferentes tipos de carregamento, ou seja, compressão axial, tração diametral, ruptura à flexão, entre outros. Os carregamentos são aplicados em diferentes níveis, calculados como percentuais da carga de ruptura. Após serem submetidos à cura, os concretos pré-fissurados são testados utilizando-se diferentes métodos de ensaio para avaliação do desempenho mecânico ou de durabilidade, conforme o foco de cada estudo.

O principal interesse das pesquisas realizadas sobre esse tema consiste em verificar o potencial de autocicatrização (*self-healing*) do concreto após o dano. As pesquisas atuais têm buscado soluções para potencializar a tendência natural do concreto para a autocicatrização ou selagem das suas próprias microfissuras. Essa tendência foi identificada há muitos anos, mas o interesse pelo efeito da auto selagem das fissuras nas propriedades do concreto tem se intensificado nas últimas décadas. O fenômeno da autocicatrização de fissuras pode ser natural ou artificial. Alguns processos artificiais de autocicatrização consistem em incorporar certos tipos de materiais ao concreto, como fibras sintéticas ou fibras de aço (NISHIWAKI, *et al.*, 2014, p.2142). Existem também estudos experimentais que vêm testando a incorporação de alguns tipos de bactérias ao concreto, durante a mistura, para induzirem a precipitação de

---

<sup>3</sup>Bazant ZP (1972) *Thermodynamics of interacting continua with surfaces and creep analysis of concrete structures*. Nucl. Eng. Des. 20:477–505

carbonato de cálcio nas fissuras. Esse método pode melhorar as propriedades do concreto e possibilitar a consolidação de fissuras, sem ocasionar prejuízos ambientais (THAKUR *et al.*, 2016, p.43). O papel desses organismos microbiológicos consiste em bloquear as fissuras, promovendo o aumento da rigidez e da resistência do concreto (ter HEIDE e SCHLANGEN, 2008, p.1). Os métodos de autocicatrização são bastante promissores no controle de fissuras inerentes às estruturas de concreto, sem a intervenção humana. Resultam em maiores prazos para a realização de intervenções, o que se reflete na redução dos custos para manutenção e reparos (ROOIJ, *et al.*, 2013, p.5).

Nesse contexto, foi desenvolvido um Projeto de Pesquisa<sup>4</sup> no NORIE - Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, da UFRGS, com o objetivo de estudar a influência do carregamento precoce de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento, nas suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Com esse foco, foram desenvolvidas pesquisas abordando as propriedades mecânicas (SALVADOR, 2007; VIEIRA, 2008) e propriedades de durabilidade (VENQUIARUTO, tese em desenvolvimento) de concretos pré-carregados. Esta tese foi originada a partir desse Projeto e tem, como principal motivação, a investigação do comportamento de concretos pré-carregados frente à retração por secagem, quando submetidos a diferentes idades de cura por imersão em água. O planejamento dos estudos foi realizado de forma integrada, permitindo que os programas experimentais das teses fossem interligados e desenvolvidos em paralelo, a fim de que os resultados de cada estudo específico pudessem ser analisados de forma complementar.

Muitas pesquisas desenvolvidas abordando o efeito do pré-carregamento tiveram como foco principal as propriedades mecânicas, avaliando o potencial de recuperação da capacidade resistente do concreto, antes e depois do dano. Outros trabalhos, com foco na durabilidade, avaliaram o potencial de recuperação do concreto pré-fissurado, considerando-se a degradação causada pelo ingresso de água ou de agentes nocivos para o interior do elemento estrutural. A importância desta pesquisa consiste em verificar a aplicabilidade do ensaio de retração por secagem (ASTM C 157, 2014) na investigação dos efeitos do carregamento precoce de concretos com diferentes tipos de cimento, e do potencial dos concretos estudados para a autocicatrização natural das microfissuras (*self-healing*), em função da cura por imersão em água. Entende-se que a retração por secagem, por ser uma propriedade

---

<sup>4</sup>Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas e de durabilidade, em concretos produzidos com diferentes tipos de cimento, realizado com recursos do Edital MCT/CNPq 02/2006 – Universal, Seleção Pública de Projetos de Pesquisa Científica, Tecnológica e Inovação, coordenado pela Professora Denise Dal Molin e integrado por um grupo de pesquisadores do NORIE.

dependente da microestrutura, porosidade e compacidade do concreto, seja sensível às alterações provocadas pelo pré-carregamento nas primeiras idades. Além disso, através da investigação de diferentes idades de cura, pode-se identificar a ocorrência ou não da autocicatrização natural das microfissuras dos concretos submetidos ao pré-carregamento, utilizando-se os resultados do ensaio de retração por secagem.

Tendo em vista que as propriedades do concreto, ao longo de toda a vida útil das estruturas, são determinadas pelo comportamento do concreto nas primeiras idades, conforme afirmam autores como Baroguel-Bouny *et al.* (2006, p.123) e Aurich (2008, p.31), considera-se que o entendimento dos efeitos do carregamento precoce na retração por secagem seja de grande relevância. Acredita-se, portanto, que as conclusões decorrentes do estudo experimental desenvolvido nesta tese possam complementar o conhecimento disponível acerca do comportamento do concreto pré-fissurado nas primeiras idades e da capacidade de recuperação, parcial ou total, de suas propriedades, quando submetido à cura por imersão em água.

## 1.2 ORIGINALIDADE DO TEMA

Muitos estudos experimentais (ter HEIDE, 2005; GRANGER *et al.*, 2005; ter HEIDE e SCHLANGEN, 2007; SALVADOR, 2007; VIEIRA, 2008; ZHONG e YAO, 2009; HUA, 2010, ROOIJ, 2013, entre outros) têm sido desenvolvidos para estudar os efeitos da fissuração decorrente do pré-carregamento, nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Para tanto, conforme referências bibliográficas sobre o tema, em geral são aplicados diferentes percentuais da carga última (compressão axial, tração compressão diametral, flexão, entre outros), nos concretos a serem estudados. Normalmente, são adotadas diferentes idades para a aplicação do carregamento, e diferentes métodos e idades de cura. Os resultados obtidos nos concretos pré-carregados são comparados aos de concretos de referência, considerando-se a propriedade a ser analisada.

A presente pesquisa propõe o carregamento (tração na flexão) nas primeiras idades de concretos produzidos com dois diferentes tipos de cimento, e diferentes relações a/c. A originalidade da tese consiste em analisar o efeito do pré-carregamento através dos resultados do ensaio de retração por secagem (ASTM C 157, 2014), considerando-se diferentes idades de cura. Grande parte dos estudos já realizados tem foco na permeabilidade do concreto à água e a agentes agressivos, com vistas à avaliação da durabilidade, enquanto outros estudos

abordam as suas principais propriedades mecânicas. Esta pesquisa experimental propõe a avaliação dos efeitos do pré-carregamento através da comparação dos resultados de retração por secagem dos concretos pré-carregados e de referência, com foco principal, portanto, na saída da água do concreto e nos mecanismos envolvidos. Espera-se possibilitar reflexões importantes sobre o desempenho do concreto, abordando as alterações microestruturais promovidas pelo carregamento e, ainda, na capacidade de autocicatrização de fissuras em decorrência da cura prolongada.

### 1.3 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa estão classificados em geral e específicos, e são descritos a seguir.

#### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa consiste em avaliar o desempenho de concretos produzidos com dois tipos de cimento, frente à retração por secagem, quando submetidos ao carregamento precoce.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos consistem em avaliar a retração por secagem de concretos com dois tipos de cimentos, ao longo do tempo, considerando-se os efeitos de diferentes:

- níveis de pré-carregamento;
- idades de pré-carregamento;
- relações água/cimento;
- idades de cura.

A investigação da capacidade de autocicatrização (*self-healing*) das microfissuras, através da análise da porosidade e compacidade dos concretos pré-carregados e de referência, é também objetivo específico desta tese.

### 1.4 LIMITAÇÕES

Considerando-se a necessidade de atendimento ao programa experimental desta tese, não se mostrou viável o emprego de automatização, através do uso de sensores, para as medições da

variação de comprimento dos corpos de prova (cp's), tendo em vista seu elevado número, além do extenso período de tempo adotado para a realização do ensaio de retração por secagem (64 semanas). Dessa forma, a manipulação dos cp's durante a realização do ensaio de retração por secagem pode ter se constituído em uma fonte de variabilidade, mesmo com a utilização dos equipamentos e procedimentos indicados na ASTM C 157 (ASTM, 2014). Salienta-se que foram adotadas as medidas preventivas necessárias para minimizar a variabilidade inerente ao ensaio.

Tendo em vista a falta de disponibilidade de tempo e de recursos financeiros, na segunda etapa experimental da tese foi utilizada uma matriz reduzida em relação à matriz completa, adotada para a realização do ensaio de retração por secagem. Assim, as análises de porosimetria por intrusão de mercúrio e de microtomografia por raios X não foram realizadas para todas as combinações entre as variáveis adotadas na pesquisa. Além disso, nas amostras analisadas a partir da microtomografia por raios X, foi somente determinada a porosidade total dos concretos, não tendo sido geradas outras informações quanto à morfologia da rede de poros.

## 1.5 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está organizada em 7 capítulos e 7 apêndices. O *Capítulo 1* apresenta a justificativa, a importância e a originalidade do tema. Descreve o objetivo geral e os objetivos específicos da tese, apontando, também, as principais limitações enfrentadas ao longo da realização das etapas experimentais da pesquisa.

A revisão bibliográfica necessária para a realização da tese é apresentada em dois capítulos. O *Capítulo 2* aborda a hidratação do cimento e o desenvolvimento da microestrutura da pasta endurecida. O *Capítulo 3* conceitua a retração por secagem do concreto, destacando os mecanismos associados ao fenômeno e os principais fatores intervenientes. Aborda-se, ainda, a autocicatrização do concreto, incluindo classificação, importância, e os principais trabalhos nesta área de pesquisa.

O *Capítulo 4* refere-se aos materiais e métodos utilizados durante a realização do programa experimental da pesquisa, dividido em duas etapas. Na ETAPA 1, foram definidos o planejamento estatístico e a matriz experimental. Nessa fase, os materiais a serem empregados na confecção dos concretos foram devidamente selecionados, realizando-se sua caracterização física. Este capítulo apresenta também a descrição da dosagem, moldagem, desmoldagem e



cura dos concretos produzidos. Além disso, descreve-se de forma detalhada o pré-carregamento dos cp's, de modo a possibilitar o adequado entendimento do método empregado. Nesse capítulo, os principais ensaios realizados na ETAPA 1 do programa experimental da pesquisa são descritos: ensaio de retração por secagem (ASTM C 157, 2014) e ensaio de ruptura por tração na flexão (NBR 12142, ABNT, 1991). Por fim, o capítulo apresenta a ETAPA 2, quando foi adotado um programa experimental complementar, incluindo a realização de análises quantitativas e qualitativas, como porosimetria por intrusão de mercúrio, análise de microtomografia de raios X e determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (NBR 12142, ABNT, 1991).

No *Capítulo 5*, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios e análises realizadas na fase experimental da pesquisa. Os gráficos elaborados a partir da análise estatística dos resultados obtidos na ETAPA 1 são mostrados, analisando-se o comportamento dos concretos estudados frente aos diferentes níveis de pré-carregamento e idades de pré-carregamento adotados. Os resultados das análises complementares realizadas na ETAPA 2 são também devidamente apresentados e discutidos. Ao longo desse capítulo são realizadas comparações dos resultados neste estudo com os obtidos em outras pesquisas, nacionais e internacionais.

No *Capítulo 6* constam as conclusões da pesquisa e sugestões para estudos futuros e, no *Capítulo 7*, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração da tese. Por fim, seguem-se os *Apêndices*, contendo os resultados dos ensaios e análises realizadas durante o programa experimental da tese, bem como o desenvolvimento de cálculos complementares, utilizados durante a discussão dos temas apresentados.

## **2 DESENVOLVIMENTO DA MICROESTRUTURA DA PASTA ENDURECIDA A PARTIR DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO**

Uma combinação de processos químicos e físicos ocorrem após o contato dos minerais do clínquer mais gipsita com a água, durante a hidratação do cimento. Os estágios iniciais da hidratação desenvolvem-se mediante intensa atividade química, caracterizando-se por reações muito rápidas, acompanhadas de picos de liberação de calor (STEFAN, 2009, p.7). À medida que o material passa do estado fluido para o estado sólido, ocorre o enrijecimento, pega e endurecimento. O avanço da hidratação promove a formação da microestrutura e, ao mesmo tempo, a definição da porosidade da pasta, mudanças que influem de maneira significativa nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, desde as idades iniciais até as mais avançadas. Os processos de transporte são bastante influenciados pela microestrutura, visto que a saída da água do concreto depende da porosidade. O conhecimento das características microestruturais é fundamental, portanto, para o entendimento da retração por secagem e avaliação da magnitude das deformações associadas às variações volumétricas do concreto.

Este capítulo apresenta, inicialmente, uma revisão acerca da reação de hidratação do cimento, dos principais mecanismos que regem o fenômeno, e sobre a formação da microestrutura. Posteriormente, abordam-se os principais constituintes da pasta de cimento endurecida, incluindo-se os componentes sólidos e a porosidade. Além disso, descreve-se como a água está presente na microestrutura e como se processa a sua saída da pasta.

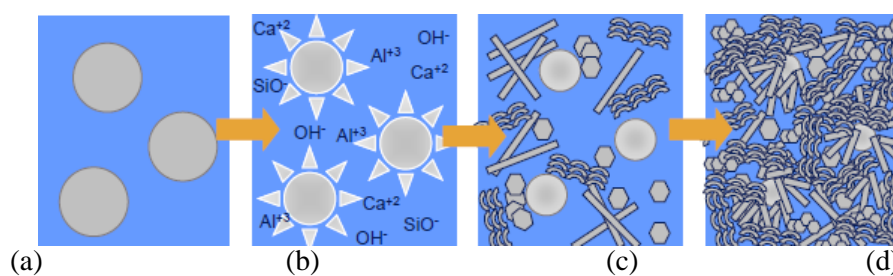
### **2.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND E FORMAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA PASTA ENDURECIDA**

A hidratação do cimento Portland é um fenômeno complexo que envolve a ocorrência simultânea de diversas reações químicas entre os constituintes do clínquer e a água

(THOMAS *et al.*, 2008, p. 1811). A complexidade da hidratação pode ser atribuída ao fato de que, além do grão de cimento ser polimineral, cada fase do clínquer mantém uma taxa de hidratação específica, que é determinada por vários fatores, como temperatura, pressão, concentração, superfície de constituição, presença de defeitos na estrutura dos cristais e finura do sólido, que é o fator mais importante (BULLARD, *et al.*, 2011, p.1209; KURDOWSKI, 2014, p.131).

No início da hidratação, ocorre a dissolução dos compostos do clínquer ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ )<sup>5</sup> em componentes iônicos, havendo a formação dos hidratos, ao mesmo tempo em que a água é consumida na reação. Progressivamente, a concentração iônica vai aumentando e, quando é atingida a saturação desta concentração na água, agora solução, ocorre a precipitação dos hidratos, devido à sua baixa solubilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.23; PUSTOVGAR *et al.*, 2016, p.1). Estes mecanismos básicos de *dissolução* e *precipitação* são dominantes nos estágios iniciais, visto que existe espaço disponível na pasta. Quando a formação dos hidratos ocorre na superfície do grão anidro, ou muito próximo dela, não sendo possível sua precipitação devido à falta de espaço, o mecanismo dominante é o *topoquímico*, ou *hidratação no estado sólido*. Ocorre, em consequência, a redução progressiva do tamanho do grão (MEHTA e MONTEIRO, 2008, p.23, Kurtis<sup>6</sup>). Segundo Kurdowski (2014, p.131), em qualquer reação de hidratação podem ser identificados os processos de *nucleação*, *transporte de massa*, basicamente através de *difusão*, além de processos de *crescimento-cristalização* de hidratos. No entanto, a difusão torna-se mais difícil, na medida que os hidratos são formados. A Figura 1 apresenta, através de uma representação esquemática, os mecanismos básicos da hidratação desde a adição da água ao cimento.

Figura 1: Mecanismos primários da hidratação



Fonte: baseado em KURTIS<sup>7</sup>

<sup>5</sup>  $C_3S$  –  $Ca_3SiO_5$ ;  $C_2S$  –  $2CaO.SiO_2$ ;  $C_3A$  –  $3CaO.Al_2O_3$ ;  $C_4AF$  –  $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$

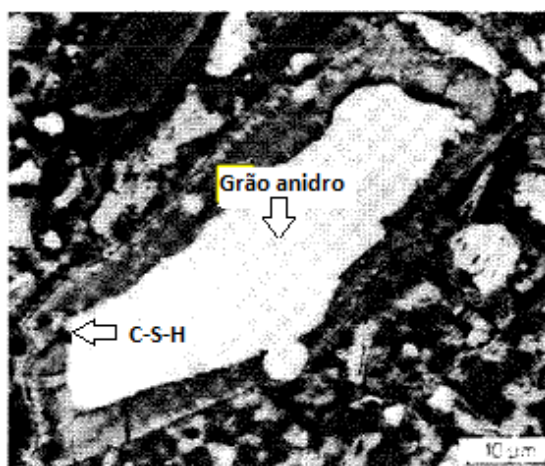
<sup>6</sup> <http://www.coe.gatech.edu/content/dr-kimberly-e-kurtisu>

<sup>7</sup> <http://www.coe.gatech.edu/content/dr-kimberly-e-kurtis>

Observa-se em (a) dissolução dos grãos; (b) crescimento da concentração iônica na água/nova solução; (c) formação dos compostos em solução; (d) após ser alcançada uma concentração de saturação, os produtos formados ou hidratos se precipitam e, em estágios mais avançados, formam-se na superfície dos grãos anidros, ou muito próximos desta.

Na Figura 2, pode-se observar uma imagem obtida por elétrons retroespalhados, onde um grão anidro é envolvido por uma camada de C-S-H, através do processo topoquímico.

Figura 2: Grão anidro e camada de C-S-H – processo topoquímico



Fonte: Adaptado de Scrivener (1989, *apud* Freitas, 2001)

Durante o desenvolvimento da hidratação podem ser identificados três estágios principais, onde as reações e suas respectivas velocidades variam (SCRIVENER, 1989, *apud* GANI, 1997, p.42; FREITAS, 2001). Estes estágios podem ser definidos como *inicial*, *intermediário* e *final*:

- (1) 0 a 3 horas: Durante o *estágio inicial*, ocorre a rápida dissolução dos sulfatos e aluminatos. Uma grande quantidade de calor é gerada e a taxa de evolução de calor decresce rapidamente depois de cerca de 3 horas. O  $C_3S$  começa a ser coberto por uma camada gelatinosa, formando-se lâminas de C-S-H na sua superfície. Um gel amorfo, rico em aluminato, forma-se na superfície do  $C_3A$ , onde se observam pequenas agulhas de etringita ( $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ -trisulfato-Aft). Neste estágio, a maioria da água de amassamento ainda está livre, e a pasta permanece fluida e trabalhável. Ao final deste estágio, as camadas do C-S-H começam a formar fibrilas.

- (2) 3 a 24 horas: No *estágio intermediário*, ocorre o rápido crescimento do C-S-H, assim como das plaquetas hexagonais de CH (hidróxido de cálcio). As camadas superficiais de C-S-H, que iniciaram a cristalização, desprendem-se do grão e, em contato com a água, formam novas camadas de C-S-H. O crescimento do C-S-H entre os grãos resulta na pega da pasta de cimento. Ocorre, então, novo pico de calor de hidratação e o entrelaçamento dos cristais de diferentes grãos estabelece o final da pega e início do ganho de resistência, com redução da porosidade. Decorridas 24 horas, aproximadamente, cerca de 30% da hidratação já ocorreu, sendo que os grãos menores que 5  $\mu\text{m}$  estão completamente hidratados, enquanto que os maiores (entre 5  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$ ) reagem até 7 dias. Estes valores podem variar em função do teor e tipo de cimento empregado, além do tamanho do grão, que exerce influência na hidratação. O tamanho dos cristais hexagonais de CH será controlado pelo espaço disponível para seu desenvolvimento na pasta. Neste estágio, começa a aderência partícula-partícula e pasta-agregado.
- (3) Após 24 horas: No *estágio final*, a camada de C-S-H torna-se mais densa e a taxa de evolução do calor decresce, havendo desaceleração da hidratação. A água apresenta dificuldade para atingir o núcleo anidro, portanto o processo topoquímico torna-se mais significativo.

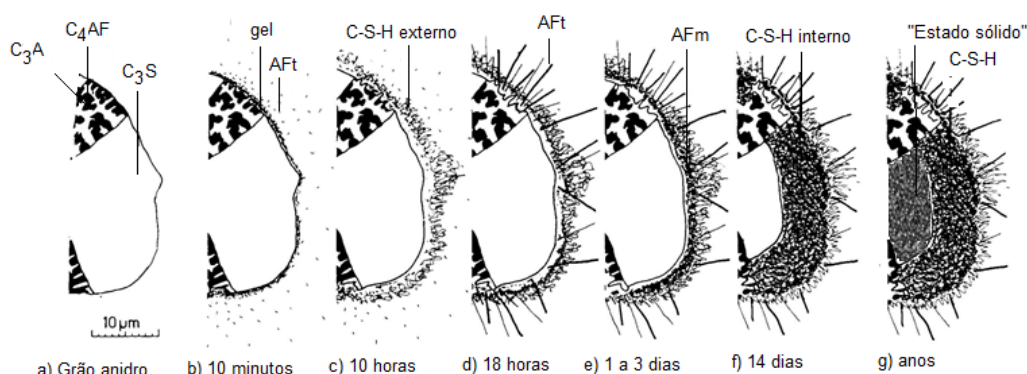
O crescimento da resistência desacelera, mas pode continuar por anos. Após os 28 dias, este ganho é controlado pelo  $\text{C}_2\text{S}$ , que reage lentamente, e apenas uma pequena quantidade de produtos de hidratação é formada, mesmo após vários meses.

Scrivener (1989, p.141) apresenta o diagrama esquemático de desenvolvimento da microestrutura da pasta de cimento hidratada, à medida que a hidratação do cimento Portland ocorre, conforme Figura 3.

Em (a) tem-se a representação do grão anidro de cimento Portland. Nos primeiros 10 minutos (b), o  $\text{C}_3\text{A}$  reage com o sulfato de cálcio, havendo a formação de um gel rico em aluminato, e a nucleação de pequenas agulhas (AFt) em volta do gel e na solução. Aproximadamente após 10 horas (c), a partir da reação de  $\text{C}_3\text{S}$ , é produzido o C-S-H externo na rede de agulhas do AFt, com aproximadamente 1  $\mu\text{m}$  entre a superfície do grão e a lamela hidratada. Após 18 horas (d), a hidratação secundária do  $\text{C}_3\text{A}$  produz longas agulhas de AFt. Inicia-se a formação do C-S-H interno, entre as lamelas, a partir da hidratação contínua de  $\text{C}_3\text{S}$ . Na idade de 1-3 dias (e), o  $\text{C}_3\text{A}$  reage com o AFt entre as lamelas, formando compostos hexagonais de AFm. A continuidade da formação dos produtos internos reduz a separação entre o grão anidro e a

lamela hidratada. Aos 14 dias (f), ocorre formação suficiente de C-S-H interno para preencher o espaço entre o grão e a lamela. O C-S-H externo torna-se mais fibroso. O material anidro remanescente reage por um lento mecanismo, no estado sólido, para formar C-S-H interno adicional (g).

Figura 3: Representação esquemática do desenvolvimento da microestrutura da pasta de cimento Portland



Fonte: Scrivener (1989, p.141)

O avanço da reação de hidratação promove a maturidade do material, com o passar do tempo. O grau de hidratação indica, em termos percentuais, a quantidade de hidratos formados num dado tempo, sendo calculado conforme a Equação 1 (van BREUGEL<sup>8</sup>, 1991, *apud* BOUASKER, 2007, p. 33).

$$\alpha(t) = \frac{\text{quantidade de cimento hidratado}}{\text{quantidade inicial de cimento}} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\alpha(t)$ : grau de hidratação do cimento num dado tempo

A cinética de desenvolvimento da hidratação é influenciada pelo grau de finura do cimento, temperatura, relação a/c, teor das fases principais do cimento, aditivos, entre outros fatores. O conhecimento do grau de hidratação possibilita uma compreensão maior do comportamento dos materiais cimentícios (STEFAN, 2009, p.13).

As taxas de hidratação de cada uma das quatro fases principais do cimento ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ ) são bastante diferentes. Assim, propriedades como tempo de enrijecimento, tempo de

<sup>8</sup> Van Breugel K., Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials, Delft, The Netherlands, 1991.

pega e taxa de endurecimento variam conforme a composição do cimento (KURTIS<sup>9</sup>). O Quadro 1 sintetiza a hidratação dos componentes do cimento, de acordo com Riaz *et al.*, 2011.

Quadro 1: Características da hidratação das fases do cimento

<i>Fases do cimento</i>	<i>Características da hidratação</i>
C <sub>3</sub> S, ou alita (3CaO.SiO <sub>2</sub> )	Hidrata e endurece rapidamente, adquirindo elevada resistência inicial e grande liberação de calor de hidratação
C <sub>2</sub> S, ou belita (2CaO.SiO <sub>2</sub> )	Hidrata e endurece mais lentamente em relação à alita, libera menos calor de hidratação e adquire resistência elevada após a idade de 7 dias
C <sub>3</sub> A, ou aluminato (3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Libera grande quantidade de calor na hidratação, alguma contribuição na resistência inicial, baixa resistência a sulfatos
C <sub>4</sub> AF, ou ferrita (4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Pequena contribuição na resistência

Existe uma relação direta entre a microestrutura do concreto e suas propriedades macroscópicas. O conhecimento da evolução das fases sólidas, nas primeiras idades do concreto, possibilita previsões de sua resistência, subsidiando a determinação de etapas importantes, como a remoção das fôrmas, aplicação de protensão de armaduras, entre outras (YE *et al.*, 2002, p.603).

### 2.1.1 Efeito de adições minerais na microestrutura

Alguns minerais, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, entre outros, podem ser utilizados em substituição parcial ao cimento. Esses materiais têm a capacidade de hidratar e, em geral, reagem com o hidróxido de cálcio, preenchendo os vazios e refinando a porosidade da pasta.

A cinza volante normalmente é utilizada em até 30% de substituição ao cimento. Cerca de 80% da cinza volante são constituídos por uma sílica vítrea reativa contendo cálcio, alumínio, ferro, e outros óxidos em menor quantidade, sendo que o teor cristalino provém da ferrita e do quartzo. Apresenta uma distribuição de tamanho de partícula semelhante ao cimento anidro.

<sup>9</sup><http://www.coe.gatech.edu/content/dr-kimberly-e-kurtis>

Em termos de desenvolvimento microestrutural, normalmente a cinza volante começa a reagir apenas depois de vários dias de hidratação. No entanto, deposições de C-S-H e AFt, da reação do cimento, podem ser observados na superfície das partículas de cinza volante quase imediatamente (SCRIVENER, 1989, p. 143).

O teor usual de substituição do cimento por escória é de até 40%. A escória de alto forno necessita de um ativador, como hidróxido de cálcio, tendo uma pequena parte ativa no desenvolvimento microestrutural, nas primeiras idades. Contudo, após um período de vários meses, a escória reage lentamente e a quantidade de hidróxido de cálcio decresce. Em pastas maduras, aros de hidratos podem ser vistos em volta das partículas de escória (SCRIVENER, 1989, p. 144).

A adição desses dois minerais quase não altera o desenvolvimento da microestrutura da pasta durante a hidratação (SCRIVENER, 1989, p. 142).

Outra adição mineral é a sílica ativa, que consiste de partículas muito pequenas (~ 0,1 µm) de sílica amorfa. A sua elevada área superficial faz com que a reação seja muito mais rápida do que as reações da escória, ou da cinza volante. Embora tipicamente utilizado em quantidades bem menores (5% a 10%), esse material exerce uma influência muito maior no desenvolvimento microestrutural, principalmente na zona de interface da pasta com o agregado (SCRIVENER, 1989, p. 142). A sílica ativa acelera a hidratação do C<sub>3</sub>S, pois possibilita novos locais de nucleação para a formação e crescimento dos hidratos promovendo, assim, um efeito físico de preenchimento (ROSSEN *et al.*, 2016, p. 3).

#### 2.1.1.1 Reações pozolânicas

Reação pozolânica é a reação entre o hidróxido de cálcio produzido pelo cimento e a pozolana, definida pela ASTM C 125 como um material silicoso ou sílico-aluminoso, que possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante mas, quando finamente dividido e na presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentantes (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 238).

Existem diferenças no comportamento do cimento Portland e do cimento Portland pozolânico, com relação à formação do C-S-H, conforme Equações 2 e 3.

- Cimento Portland:





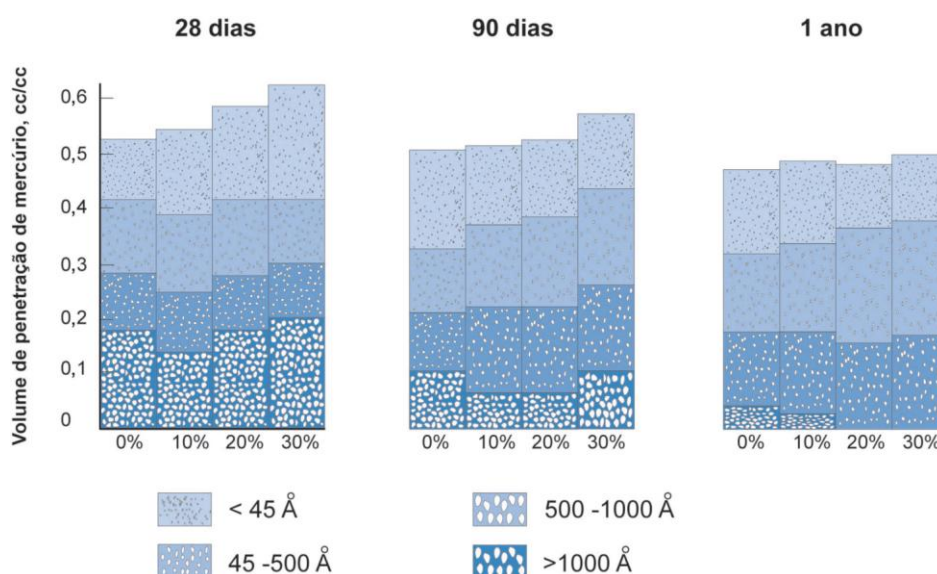
- Cimento Portland pozolânico



Os cimentos com adições minerais, como o pozolânico e o com escória, apresentam reações lentas, em comparação aos cimentos Portland. Assim, as taxas de liberação de calor e o desenvolvimento da capacidade resistente também são lentos. Além disso, enquanto na reação de hidratação do cimento Portland, o hidróxido de cálcio é produzido, na reação pozolânica existe o consumo desse hidróxido (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 251). A formação de produtos de hidratação secundários, principalmente silicatos de cálcio hidratados, em torno das partículas de pozolana, tende a preencher os vazios capilares grandes com um material microporoso de baixa densidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 251). Pode-se dizer que existem dois efeitos físicos importantes, a partir da reação química entre as pozolanas e o hidróxido de cálcio. Os grandes vazios capilares são preenchidos pelos produtos da reação pozolânica, e o sistema se transforma em um produto com numerosos poros finos, constituindo-se no efeito de refinamento dos poros. Além disso, a nucleação do hidróxido de cálcio em torno das partículas finas e bem distribuídas da pozolana promove a substituição dos grandes cristais menos orientados, por produtos de reação, pouco cristalinos. O outro efeito físico decorrente das reações pozolânicas é o refinamento do grão, quando ocorre a substituição de grandes grãos e o sistema passa a conter grãos menores. Ambos os efeitos contribuem para o aumento da resistência da pasta do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 251).

A Figura 4 ilustra as mudanças na distribuição do tamanho de poros em pastas de cimento pozolânico, com determinada relação a/c, apresentando teores de 10%, 20% e 30% (em massa) de um tipo de pozolana mineral natural, em comparação a pastas de referência. Os gráficos mostram as alterações na distribuição do tamanho dos poros das amostras, obtidas com porosimetria por intrusão de mercúrio, aos 28, 90 e 365 dias, evidenciando a redução de volume da porosidade capilar. Nas pastas curadas por 1 ano, com teores de 20% e 30%, não foram observados poros grandes ( $> 0,1 \mu\text{m}$ ), mostrando-se portanto, mais impermeáveis que as pastas de referência, com cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 44).

Figura 4: Distribuição do tamanho dos poros em pastas com diferentes teores de pozolana natural, nas idades de 28, 90 e 365 dias



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, p. 44)

A redução dos poros capilares e da continuidade do sistema de poros, a partir das reações pozolânicas, promove a redução da permeabilidade. Portanto, as adições minerais produzem pastas de cimento menos permeáveis, em comparação às pastas com cimento Portland, principalmente quando curadas em ambientes com temperaturas mais elevadas, por períodos curtos (KURDOWSKI, 2014, p.354). Principalmente na zona de transição, na interface da pasta/agregado, o efeito produzido pelas reações pozolânicas é bastante importante, contribuindo para a redução das microfissuras e, assim, para o aumento da impermeabilidade. Desta forma, o uso dos cimentos pozolânico e com escória de alto-forno apresenta vantagens técnicas, segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 239).

### 2.1.2 Interface pasta-agregado

A zona de transição é uma região de aproximadamente 50  $\mu\text{m}$ , que se estende para fora do agregado e que se funde, de forma gradual, com a microestrutura da pasta, onde existe maior quantidade de hidróxido de cálcio preferencialmente orientado (PAULON e KIRCHHEIM, 2011, p.593). A zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado tem uma microestrutura diferente da matriz da pasta de cimento, portanto, a formação e cristalização dos produtos de hidratação, nesta região, são afetados pela presença do agregado (PAULON e KIRCHHEIM, 2011, p.595). Estudos microestruturais indicam que uma fina ( $\sim 1\mu\text{m}$  de espessura) camada de produtos de hidratação (C-S-H) forma-se na superfície do agregado, no

concreto, sendo denominada de “filme duplo”. Sobre essa camada de produtos existe uma região chamada de “auréola de transição”, de elevada porosidade, devido à inexistência de empacotamento entre os grandes grãos de cimento anidro e a superfície do agregado (SCRIVENER, 1989, p. 151). Nesta região, existem muitas rosetas de C-S-H, da hidratação de pequenos grãos, e um grande número de longas hastes de AFt. Na região de interface, podem também ser observados cristais de hidróxido de cálcio, sem uma orientação preferencial (SCRIVENER, 1989, p. 151).

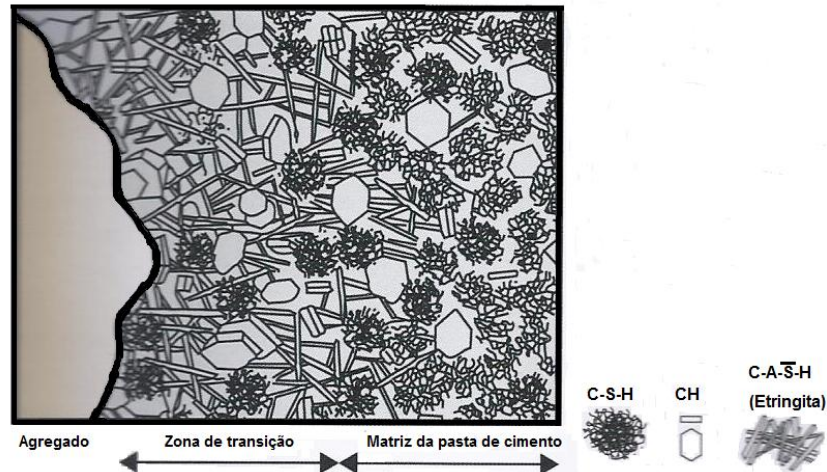
Nas primeiras idades, especialmente se ocorreu uma exsudação interna considerável, a porosidade capilar na zona de transição é maior do que na matriz da pasta de cimento, ou argamassa (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.45). A distribuição da água na pasta, em volta do agregado não é uniforme, ocorrendo uma relação a/c efetiva maior nas proximidades da superfície do agregado (HOSHINO, 1989, *apud* BENTUR e ODLER, 2009, p.22). Esse efeito pode ser devido à exsudação, assim como do “efeito parede”, impedindo o preenchimento do espaço adjacente ao agregado com grãos de cimento de tamanho 10 µm ou mais. Assim, o espaço em torno do agregado é efetivamente menos preenchido por produtos de hidratação e, ao mesmo tempo, existe uma tendência maior de desenvolvimento do CH (CA(OH)<sub>2</sub>) e da etringita, nesse espaço, uma vez que esses dois compostos se formam, preferencialmente, em grandes poros (BENTUR e ODLER, 2009, p.22). Nesta zona, portanto, o tamanho e a concentração de compostos cristalinos, como hidróxido de cálcio e etringita também são maiores. Além disso, nessa região existe uma tendência à formação de fissuras, contribuindo para a menor resistência na zona de transição, em comparação à matriz da pasta de cimento (PAULON e KIRCHHEIM, 2011, p.594; MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.45).

A zona de transição, na interface, é considerada como a fase limitante do concreto. A ruptura ocorre em um nível de tensão relativamente mais baixo do que a resistência dos outros componentes do concreto, ou seja, agregado, e pasta ou argamassa de cimento hidratada (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.47).

O efeito da sílica ativa na estrutura da zona de interface tem sido bastante estudado, devido às vantagens obtidas. A espessura da zona de interface reduz com a adição de sílica ativa ao sistema (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 45). As mudanças na zona de interface, devido à adição de sílica ativa, são devidas ao seu efeito físico, possibilitando maior empacotamento na superfície e menor exsudação durante a mistura. São decorrentes, também, do efeito químico, devido à sua natureza altamente pozolânica (BENTUR e ODLER, 2009 p. 24).

A Figura 5 apresenta uma representação esquemática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento no concreto, podendo-se observar a menor concentração de C-S-H na zona de transição, em relação à matriz da pasta de cimento.

Figura 5: Representação esquemática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, p. 45)

## 2.2 ESTRUTURA DA PASTA DE CIMENTO ENDURECIDA

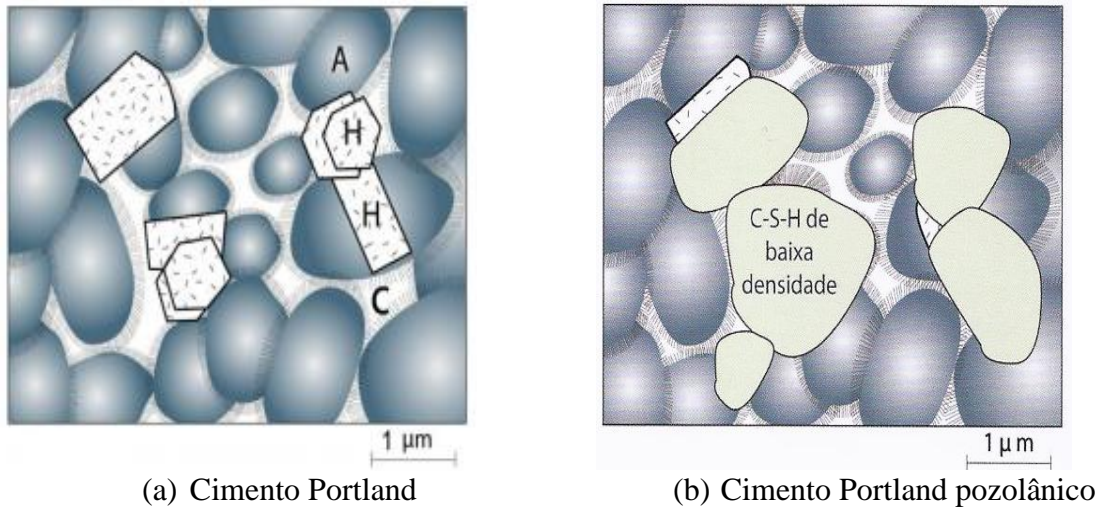
As fases essenciais presentes na microestrutura de uma pasta de cimento bem hidratada são:

- *fase sólida*: constituída pelos produtos da hidratação (gel de cimento);
- *vazios capilares*: locais anteriormente ocupados pela água e que não foram totalmente preenchidos pelos produtos de hidratação;
- *cimento anidro*: cimento que não reagiu.

A Figura 6 (a) apresenta o modelo de uma pasta de cimento bem hidratada, conforme Mehta e Monteiro (2014, p.30). No modelo proposto, “A” representa uma agregação de partículas de C-S-H, pouco cristalinos, que possuem ao menos uma dimensão coloidal (1-100 nm), sendo o espaçamento entre as lamelas, em média, 1,5 nm. “H” representa o CH, produto cristalino hexagonal, com largura característica de 1 µm e “C” representa as cavidades capilares ou vazios ocupados anteriormente pela água e que não foram totalmente preenchidos pelos produtos de hidratação. O tamanho desses vazios capilares varia de 10 nm a 1 µm. Nas pastas bem hidratadas, com baixa relação a/c, podem ser menores que 100 nm (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.30). A Figura 6 (b) apresenta a representação esquemática de uma pasta

de cimento Portland pozolânico, onde os vazios capilares foram eliminados ou reduzidos em tamanho, e os cristais de hidróxido de cálcio foram substituídos por C-S-H adicional de baixa densidade.

Figura 6: Modelo de pastas de cimento hidratadas: (a) cimento Portland e (b) cimento Portland pozolânico



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, p.30)

### 2.2.1 Sólidos na pasta de cimento hidratada

A fase sólida da pasta (gel de cimento) é formada por uma estrutura nanocristalina de hidratos, predominantemente o C-S-H, por cristais de hidróxido de cálcio, aluminatos de cálcio hidratado, sulfoaluminatos hidratados, ferrita e resíduos de cimento ainda não hidratado, no núcleo dos grãos originais (SOUZA COUTINHO, 2002, p.72).

O principal constituinte do cimento hidratado é C-S-H (silicato de cálcio hidratado), devendo-se considerar os poros de gel, preenchidos com água sujeita a forças de adsorção, inseridos nessa fase sólida (BROUWERS, 2004, p. 1698). A segunda maior fase do cimento hidratado é constituída pelos cristais de CH. A terceira maior fase do cimento hidratado corresponde aos sulfoaluminatos de cálcio e, a quarta, corresponde aos grãos anidros de cimento (não hidratados).

### 2.2.1.1 C-S-H

O C-S-H, silicato de cálcio hidratado, é a principal fase ligante, formada a partir da reação do  $C_3S$  com água, conforme a Equação 4.



Sendo  $n$  a relação água/sílica (A/Si), e  $x$  a relação cálcio/sílica (Ca/Si).

O C-S-H tem uma composição variável, e a maior contribuição para esta variabilidade consiste na relação cálcio/sílica. Uma ampla gama de valores tem sido medida, considerando-se diferentes sistemas (BAZZONI, 2014, p.107). Pode-se dizer que a relação Ca/Si varia de 1,2 a 2,3, existindo um consenso de que, para pastas com  $C_3S$ , essa relação seja igual a 1,7-1,8 (COSTOYA, 2011, p.157). A relação Ca/Si é ligeiramente maior para pastas de  $C_3S$  do que pastas de cimento, considerando-se que nas pastas puras de  $C_3S$  só existem cálcio e silício, enquanto que na pasta de cimento, outros íons, como o alumínio, são incorporados na estrutura do C-S-H (BAZZONI, 2014, p.108).

O C-S-H é pouco cristalino, apresentando uma estrutura lamelar, desordenada, na qual íons silicato e grupos hidroxila estão ligados à lamela intermediária de íons cálcio e moléculas de água (COSTOYA, 2011, p.157). Quanto à morfologia, normalmente classifica-se em C-S-H interno, quando o produto da hidratação cresce para dentro dos limites originais do grão, ou C-S-H externo, quando cresce para fora desses limites (TAPLIN<sup>10</sup>, 1959 *apud* COSTOYA, 2011, p.157). Jennings<sup>11</sup>(2000, *apud* COSTOYA, 2011, p.157) classifica o C-S-H segundo sua densidade, sendo o C-S-H de alta densidade formado internamente aos limites do grão, e o C-S-H de baixa densidade, aquele que se desenvolve para fora desses limites. O C-S-H externo tem uma forma fibrilar e direcional, dependendo da porosidade capilar disponível para a hidratação. Richardson (2000<sup>12</sup>, *apud* COSTOYA, 2011, p.157) sugeriu que mais C-S-H fibrilar espesso é formado, quando cresce em grandes poros capilares. Contudo quando existe mais espaço confinado para a deposição de produtos, o C-S-H cresce com uma morfologia muito menos espessa.

<sup>10</sup>J.H. Taplin, A method for following the hydration reaction in Portland cement paste, *Australian J Appl Sci* 10 (1959) pp. 329–345

<sup>11</sup>Jennings, H.M. A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste, *Cement and Concrete Research* 30 (2000) pp. 101-116

<sup>12</sup> Richardson I.G., The nature of the hydration products in hardened cement pastes, *Cement and Concrete Composites* 22 (2000) p.97-113

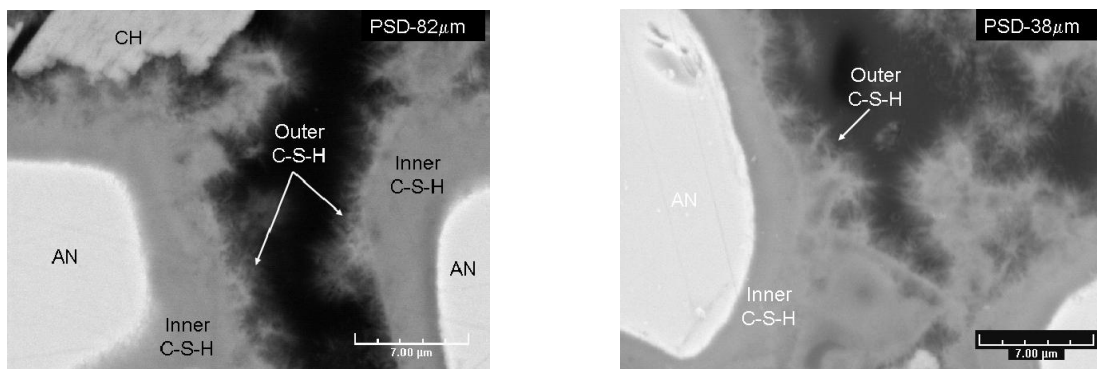
A Figura 7 (a) e (b) apresenta imagens, obtidas através de microscopia por elétrons retroespalhados, de morfologias do C-S-H para duas diferentes distribuições de tamanho de partículas, mostrando o limite entre C-S-H interno e o C-S-H externo, após 28 dias de hidratação.

O C-S-H, como principal elemento de ligação, influencia diretamente o desempenho mecânico e de durabilidade do concreto que, de um modo geral, depende da distribuição física dos sólidos e da porosidade.

Figura 7: Imagens obtidas através de microscopia de elétrons retroespalhados, mostrando as duas morfologias do C-S-H

Sendo:

AN: grão anidro (alita)



(a) Distribuição do tamanho de partículas 82  $\mu\text{m}$

(b) Distribuição do tamanho de partículas 38  $\mu\text{m}$

Fonte: Costoya (2011, p.162)

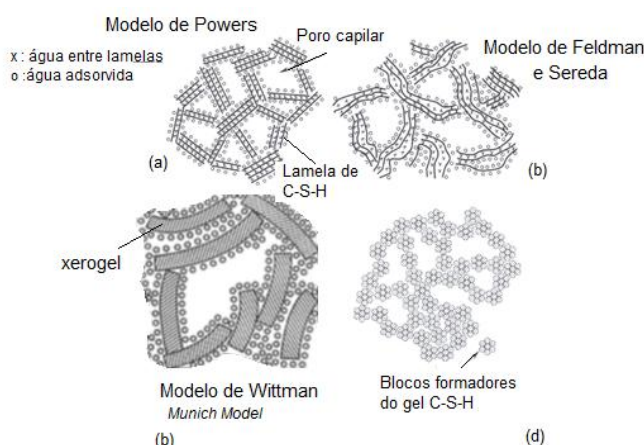
Onde: (a) Distribuição do tamanho de partículas 82  $\mu\text{m}$ ; e (b) Distribuição do tamanho de partículas 38  $\mu\text{m}$ .

A relação entre a estrutura do concreto e suas propriedades está estabelecida em diferentes níveis, por isso, segundo Jennings e Bullard (2011, p. 728), é necessário abordar a estrutura do C-S-H nas escalas atômica, molecular e nanoestrutural. Vários modelos foram propostos para descrever a estrutura do C-S-H e sua porosidade. Powers<sup>13</sup> foi o primeiro a concentrar atenção na importância da nanoestrutura da pasta de cimento para o entendimento das propriedades do concreto (JENNINGS e BULLARD, 2011, p. 728).

<sup>13</sup>T.C. Powers, *Physical properties of cement paste*, Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington, D.C., 1960, pp. 577–609.

A Figura 8 (a-d) apresenta alguns dos primeiros modelos propostos da estrutura do C-S-H. Em (a), apresenta-se o modelo do C-S-H proposto por Powers e Brownard<sup>14</sup> (1960, *apud* JENNINGS e BULLARD, 2011, p. 728) que é composto de partículas, tendo uma estrutura em camadas ou lamelas, arranjadas aleatoriamente, ligadas através de tensão superficial. Em (b), está apresentado o modelo proposto por Feldman e Sereda<sup>15</sup> (1970, *apud* Costoya, 2011, p. 160), muito similar ao de Powers e Brownard. No entanto, a disposição das lamelas compostas de gel de C-S-H são menos ordenadas, englobando poros de dimensões variadas, que estão nos espaços entre as lamelas. No modelo “The Munich Model”, de Wittmann<sup>16</sup> (1977, *apud* Costoya, 2011, p. 729), apresentado em (c), a estrutura do C-S-H é considerada como uma rede de três dimensões de um gel de partículas coloidais amorfas, formando um “xerogel”, que consiste de partículas separadas sem uma estrutura interna preconcebida. Em (d), Jennings e Tennis<sup>17</sup> (1994, *apud* Costoya, 2011, p. 160) propuseram um novo modelo com base em um conjunto de blocos de construção básicos, formado por unidades esféricas que se agrupam. Estes blocos básicos de construção se arranjam juntos, constituindo os produtos de alta densidade e de baixa densidade, que correspondem ao C-S-H interno e C-S-H externo, respectivamente.

Figura 8: Modelos da estrutura do C-S-H e sua porosidade



Fonte: Adaptado de Costoya (2011, p. 160)

<sup>14</sup>Powers T.C., Brownard T.L. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. *Research Bulletin* 22, Portland Cement Association, Chicalgo, IL (1948)

<sup>15</sup>Feldman R.F., Sereda P.J. A new model for hydrated Portland cement and its practical implications. *Engineering Journal of Canada*, 53 (8-9), 1970, pp. 53-59

<sup>16</sup>Wittmann F. *Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons* Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 290, Berlin, 1977, pp. 45-100

<sup>17</sup>Jennings H.M., Tennis P.D. Model for the developing microstructure in Portland-cement pastes. *Journal of the American Ceramic Society* 77 (1994) pp. 3161-3172



Cada vez mais a ciência dos materiais está voltada para novas tendências, utilizando a nanotecnologia para a análise e construção de novos materiais, de forma a obter melhorias em suas propriedades. Assim, através de modelagem e simulações, pesquisas recentes têm buscado o desenvolvimento de novos materiais inteligentes, com significativas melhorias, tanto em termos de desempenho, como durabilidade. O entendimento preciso dos materiais cimentícios, cuja nanoestrutura é extremamente complexa, poderá favorecer a geração de concretos mais resistentes e duráveis, podendo ao mesmo tempo ser sustentável, na medida em que houver redução de custos e de energia efetiva, que são importantes demandas da sociedade atual (SOBOLEV, 2015, p.12).

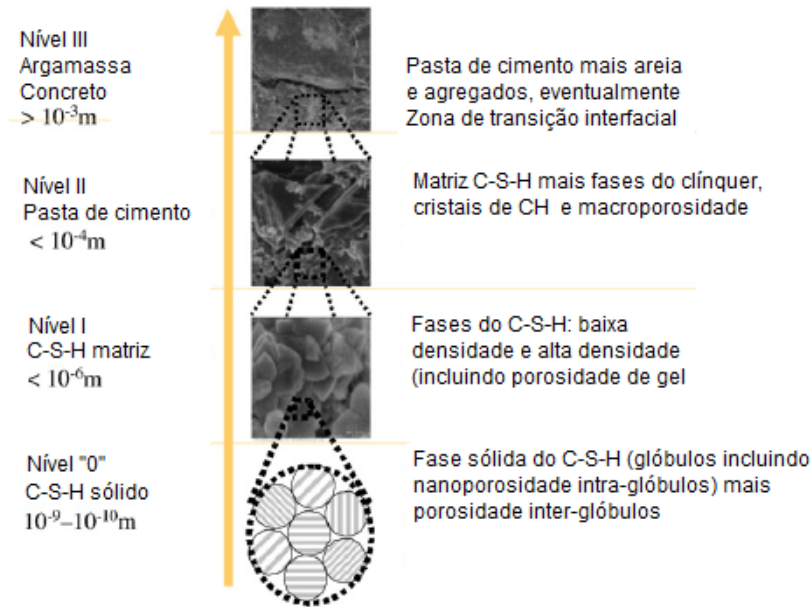
Portanto, devido ao advento de métodos de caracterização experimental mais precisos, é crescente o número de modelos que buscam entender a estrutura atômica, a nanoestrutura e a estrutura em escala micrométrica dos materiais cimentícios. De acordo com Jennings e Bullard (2011, p. 728), o sucesso na construção de modelos que relacionem, adequadamente, nanoestrutura, propriedades e cinética, consiste em definir um volume representativo de elementos em cada escala de comprimento que possa ser experimentalmente comprovado. Estes modelos, segundo os referidos autores, representam um grande passo à frente, com relação aos modelos desenvolvidos no passado, podendo prever as mudanças estruturais, considerando diferentes teores de cálcio, bem como a localização e energia de ligação das impurezas, e a quantidade e localização da água, sob diferentes condições ambientais (JENNINGS e BULLARD, 2011, p. 730). A abordagem *bottom-up*, na qual a análise é iniciada do menor para o maior nível de escala, permite relacionar as alterações da microestrutura e os efeitos nas propriedades do concreto, já que todas as escalas de observação estão interrelacionadas. A Figura 9 mostra uma representação esquemática dessa abordagem.

A Figura 10 apresenta a estrutura molecular do C-S-H, sob condições realistas de umidade, em uma pasta pura de cimento Portland, conforme Pellenq et al.<sup>18</sup> (2009, *apud* JENNINGS e BULLARD, 2011, p. 730). As linhas vermelhas e amarelas representam ligações Si/O<sub>2</sub>, as esferas verdes e cinzas são o cálcio, as esferas azuis e brancas são oxigênio e hidrogênio das moléculas de água, respectivamente.

---

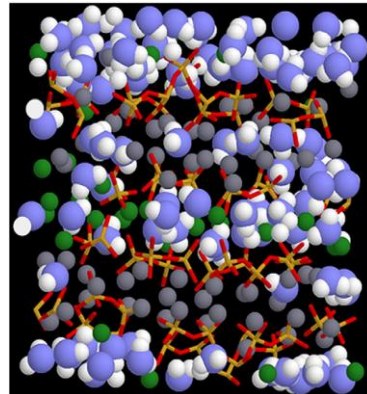
<sup>18</sup>R.J.M. Pellenq, A. Kushima, R. Shahsavari, K.J. Van Vliet, M.J. Buehler, S. Yip, F.-J. Ulm, A realistic molecular model of cement hydrates, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.106 (2009) 16102–16107.

Figura 9: Definição de elementos com volume representativo para a modelagem *bottom-up* abordando várias escalas de análise inter-relacionadas para materiais cimentícios



Fonte: Ulm<sup>19</sup> (2004, *apud* JENNINGS e BULLARD, 2011, p. 730)

Figura 10: Modelo da estrutura molecular do C-S-H



Fonte: Pellenq et al.<sup>20</sup>, (2009 *apud* JENNINGS e BULLARD, 2011, p.730)

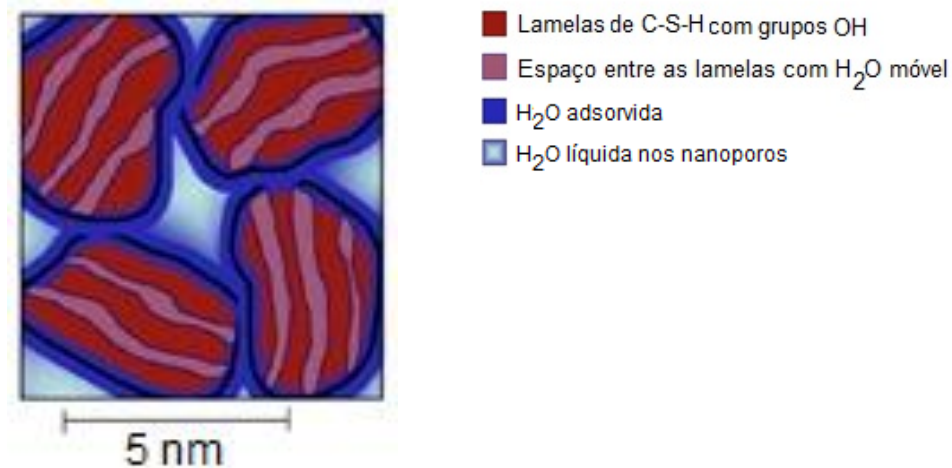
A Figura 11 apresenta o modelo da nanoestrutura do C-S-H, segundo Allen *et al.*<sup>21</sup> (2007, *apud* JENNINGS e BULLARD, 2011, p.731). Neste modelo, o C-S-H está representado em uma

<sup>19</sup>F.J. Ulm, G. Constantinides, F.H. Heukamp, Is concrete a poromechanics materials? — A multiscale investigation of poroelastic properties, *Mater. Struct.* (2004) 43–58.

<sup>20</sup>R.J.M. Pellenq, A. Kushima, R. Shahsavari, K.J. Van Vliet, M.J. Buehler, S. Yip, F.-J.Ulm, *A realistic molecular model of cement hydrates*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.106 (2009) pp:16102–16107.

escala de 1 nm a 10 nm, evidenciando sua natureza granular e os possíveis arranjos de empacotamento dos grãos com regiões de densidade variável (JENNINGS e BULLARD, 2011, p.731).

Figura 11: Modelo da nanoestrutura do C-S-H



Fonte: Allen et al.<sup>22</sup> (2007, *apud* JENNINGS e BULLARD, 2011, p.731)

#### 2.2.1.2 CH

O hidróxido de cálcio, Ca(OH)<sub>2</sub> ou portlandita, forma cristais com duas ou três ordens de magnitude maior do que as partículas de C-S-H. Os cristais crescem dentro de poros capilares preenchidos com água, ou em torno de grãos parcialmente hidratados, podendo, eventualmente, formar uma rede de percolação (BENTZ e GARBOCZI<sup>23</sup>, 1991, *apud* GARTNER *et al.*, 2001, p.105). Constitui 20% a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada. Ao contrário do C-S-H, é um composto com estequiometria definida, o que causa a formação de cristais grandes, com a forma prismática hexagonal. Sua morfologia é afetada pela existência de disponibilidade de espaço, temperatura de hidratação e presença de impurezas no sistema. Devido à área superficial mais baixa, sua contribuição para a resistência é limitada, em comparação ao C-S-H (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.31).

<sup>21</sup>A.J. Allen, J.J. Thomas, H.M. Jennings, Composition and density of nanoscale calcium–silicate–hydrate in cement, *Nat. Mater.* 6 (2007) 311–316.

<sup>22</sup>A.J. Allen, J.J. Thomas, H.M. Jennings, Composition and density of nanoscale calcium–silicate–hydrate in cement, *Nat. Mater.* 6 (2007) 311–316.

<sup>23</sup>BENTZ e GARBOCZI, 1991

### 2.2.1.3 Sulfoaluminatos de cálcio

Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15% a 20% do volume da pasta de cimento hidratada, apresentando um papel secundário no desenvolvimento das propriedades resistentes do concreto. Nos primeiros estágios da hidratação, a relação iônica sulfato/alumina da solução favorece a formação da etringita (fase AFt, trissulfato hidratado,  $C_6AS_3H_{32}$ ). A etringita tem a forma de cristais prismáticos com formato acicular (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.32). Nas pastas de cimento puro, a etringita pode se transformar em monossulfato hidratado (fase AFm,  $C_4ASH_{18}$ ) na forma de cristais hexagonais. O monossulfato hidratado torna o concreto de cimento Portland vulnerável ao ataque de sulfatos (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.32).

### 2.2.1.4 Grãos anidros

Grãos de cimento não hidratados podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratada, mesmo muito tempo depois da hidratação, dependendo da distribuição do tamanho das partículas de cimento anidro e do grau de hidratação. Normalmente, as partículas de clínquer de cimento situam-se na faixa de 1  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.32). A partir da hidratação, as partículas menores são consumidas na reação, e as maiores tornam-se menores. Devido à falta de espaço, os hidratos tendem a se precipitar próximos às partículas de clínquer em hidratação. Em idades mais avançadas, ocorre a hidratação *in situ* das partículas de clínquer, com a formação de um produto de hidratação bastante denso, morfológicamente semelhante à partícula de clínquer original (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.32).

## 2.2.2 Porosidade da pasta endurecida

Jennings *et al.* (2008, p.6) explicam a formação da porosidade da pasta de cimento endurecida, a partir da mistura do cimento com a água, quando o cimento começa a ser consumido para produzir os hidratos através das reações de hidratação. Ao mesmo tempo em que o cimento é consumido, ocorre retração química havendo uma redução de volume, já que o volume dos produtos sólidos da hidratação é menor do que os volumes iniciais dos sólidos e da água. Contudo, os produtos sólidos da hidratação têm um volume maior do que os sólidos iniciais sozinhos. Então, o espaço preenchido por água é substituído, gradualmente, pelos sólidos durante a reação. O espaço não preenchido pelos produtos sólidos da hidratação é, em geral, denominado porosidade capilar. O C-S-H, principal produto da hidratação, também contém um volume significativo de pequenos poros, denominados poros de gel.

À medida que a hidratação prossegue, a quantidade e distribuição dos poros capilares e poros de gel se alteram consideravelmente. O volume de poros capilares é reduzido porque os poros capilares são preenchidos pelos produtos da hidratação, e o volume dos poros de gel aumenta, à medida que mais gel é formado (ALIGIZAKI, 2006, p. 5). Assim, o sistema de poros naturalmente se divide em duas populações distintas de poros, sendo uma menos numerosa e, a outra, tornando-se mais numerosa à medida que a hidratação ocorre. Ao mesmo tempo, ocorre uma redução geral da porosidade total (JENNINGS *et al.*, 2008, p.6).

Os poros da pasta endurecida podem estar preenchidos de água ou de ar. A água está presente na forma líquida ou de vapor, apresentando-se quimicamente ligada nos produtos de hidratação, ou fisicamente adsorvida, ou ainda, pode estar livre nos poros capilares. Vários tipos de forças mantêm a água sob um, ou outro destes estados, gerando um equilíbrio no esqueleto sólido. Tais forças dependem do tamanho de poros e originam as deformações de retração do material (HAOUAS, 2007, p. 13).

#### 2.2.2.1 Caracterização e classificação do sistema de poros

A estrutura das pastas de cimento pode ser descrita através de diversos aspectos, entre os quais destacam-se a porosidade total, a conectividade da rede de poros, a distribuição do tamanho dos poros e o diâmetro crítico (GAO *et al.*, 2015, p.2). A precisão nas medições da porosidade total e a caracterização da estrutura de poros, bastante complexa, constituem-se nos principais obstáculos para a correlação da estrutura de poros e as propriedades do material (HU, 2004, p.45). Segundo Aligazi (2006, p.16), os mesmos parâmetros podem ser investigados através de diferentes técnicas. Mesmo que os resultados não sejam coincidentes, isso não significa, necessariamente, que não tenham validade.

Diversas técnicas têm sido empregadas para a determinação da porosidade e morfologia da estrutura de poros dos materiais cimentícios, podendo ser classificados em métodos indiretos, como porosimetria por intrusão de mercúrio; BET<sup>24</sup>, para medição de área superficial específica; absorção de nitrogênio, calorimetria a baixas temperaturas, entre outros (HU, 2004, p.45). Podem ser utilizados, também, métodos diretos, quando em determinadas análises são produzidas imagens físicas da microestrutura, revelando o tamanho e a forma das

---

<sup>24</sup> BET: Teoria da adsorção multimolecular, método desenvolvido por Brunauer, Emmett, Teller de BET e publicado em 1938 em artigo intitulado "Adsorption of Gases in Multimolecular Layers" no *Journal of the American Chemical Society*

[https://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo\\_de\\_BET](https://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_BET), consultado em 24/10/2016, 10:36h

fases. Alguns tipos de microscopia são largamente utilizados no estudo de materiais cimentícios e de materiais cristalinos ou amorfos, segundo Paulon e Kirchheim (2011, p. 602), como microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia eletrônica de transmissão (MET). Os autores salientam que tais técnicas devem ser utilizadas como ferramentas complementares, sendo cada uma específica a seu campo de aplicação.

O uso de imagens possibilita apenas obter a distribuição espacial do sistema de poros, permitindo a avaliação morfológica da microestrutura. Portanto, para informações mais detalhadas, tais como propriedades químicas e mineralógicas das amostras, podem ser utilizadas técnicas de microanálise e difração de raios X. Além das técnicas mencionadas, pode-se utilizar, como técnica analítica, a ressonância nuclear magnética (RNM), que possibilita a determinação da conformação molecular dos produtos da microestrutura, bem como das propriedades físicas em nível molecular (PAULON e KIRCHHEIM, 2011, p. 602).

Outra técnica bastante útil, que fornece parâmetros microestruturais importantes, tais como, porosidade, permeabilidade e distribuição de tamanho de poros, é a microtomografia computadorizada de raios X ( $\mu$ -CT). Esta técnica é bastante vantajosa, por ser não destrutiva e por fornecer imagens 2-D e 3-D das amostras.

Com base nas principais técnicas de caracterização da distribuição dos poros em materiais cimentícios, a porosidade da pasta pode ser classificada em função do diâmetro dos poros (HAOUAS, 2007, p. 14).

O Quadro 2 apresenta os principais métodos utilizados para caracterizar a estrutura de poros da pasta de cimento endurecida, segundo Aligizaki (2006, p.15).



Quadro 3: Classificação do tamanho dos poros

De acordo com IUPAC		De acordo com Mehta (2014)		De acordo com Mindess et al. (2002)					
Nome	Diâmetro	Tipo de poro	Faixa de tamanho	Nome		Diâmetro	Função da água	Propriedades da pasta afetadas	
Microporos	Até 2 nm	Espaço interpartículas entre as camadas de C-S-H	1 nm a 3nm	Microporos "intercamadas"	Poros de gel	Até 0,5 nm	Água quimicamente ligada	Retração e fluência para todas as UR%	
				Microporos			0,5 nm a 2,5 nm	Água fortemente adsorvida (Sem formação de menisco)	Retração e fluência para todas as UR%
Mesoporos	2nm a 50 nm	Poros capilares (baixa relação a/c)	10 nm a 50 nm	Pequenos capilares (gel)		Poros Tipo "Hollow-shell"	2,5 nm a 10nm	Geração de fortes tensões superficiais	Retração para 50% < UR% < 80%
				Capilares médios	10 nm a 50 nm			Geração de moderadas tensões superficiais	Resistência, permeabilidade, e retração para UR% elevadas >80%
Macroporos	> 50 nm	Poros capilares (alta relação a/c)	3 µm a 5 µm	Capilares grandes		50 nm a 10 µm	Comportamento como água volumétrica	Resistência e permeabilidade	
		Vazios incorporados	50 µm a 1 mm	Ar incorporado			0,1 mm a 1 mm		Resistência

\*De acordo com IUPAC, Mehta e Monteiro (2016, p.33) e Mindess *et al.* (2002, *apud* GAO, *et al.*, 2015, p. 2).

Fonte: Aligizaki (2006, p.13)

Observação: Estas são as classificações mais citadas, com referência à pasta de cimento hidratada (Ver Quadro 3). Na classificação de Mindess *et al.* (2002) os poros *hollow-shell* não foram incluídos (ALIGIZAKI, 2006, p.13).

A classificação proposta pelo União Internacional de Química Pura e Aplicada (*International Union of Pure and Applied Chemistry - IUPAC*), conforme Quadro 3, apresenta a divisão dos poros em microporos (< 2 nm), mesoporos (> 2 nm e < 50 nm) e macroporos (> 50 nm). Os limites entre as diferentes classes não são bem definidos e dependem da forma dos poros. Deve-se atentar ao fato de que, às vezes, as faixas de tamanhos para micro, meso e macroporos são usadas de modos diferentes na ciência do concreto. Young *et al.* (1998, *apud* ALIGIZAKI, 2006, p. 12) definem como microporos aqueles com tamanhos menores que 2,5 nm, mesoporos aqueles com tamanhos entre 2,5 nm e 100 nm, e macroporos, os que possuem tamanhos maiores do que 100 nm. Mehta e Manmohan (1980, *apud* ALIGIZAKI, 2006, p. 12) também classificaram os macroporos como aqueles com tamanhos maiores que 100 nm. Portanto, mesmo que as diferenças entre as classificações adotadas na ciência do concreto e as adotadas nas ciências dos materiais e na física aplicada não sejam significativas, deve-se prestar atenção ao serem referenciados resultados experimentais, a partir de diferentes áreas de conhecimento.



Através do Quadro 3, é possível observar que Mehta e Monteiro (2014, p.33) não classificaram poros com tamanhos entre 3 nm e 10 nm, entre 50 nm e 3 µm e entre 5 µm e 50 µm. Já a classificação usada por Mindess *et al.* (2002) não destacou os poros com tamanhos entre 10 µm e 100 µm. Deve-se considerar ainda, que o limite da divisão entre poros de gel e poros capilares é, até certo ponto arbitrária, já que a distribuição do tamanho de poros na pasta de cimento é contínua (ALIGIZAKI, 2006, p.12).

#### 2.2.2.2 Tipos de poros

Os tipos de poros, de acordo com a terminologia usada na ciência do concreto, são: poros de gel, poros capilares, poros tipo *hollow-shell* e vazios de ar (ALIGIZAKI, 2006, p.5).

##### a) Poros de gel

Esta porosidade é chamada, também, de nanoporosidade ou porosidade intra-hidratos, e corresponde à porosidade intrínseca aos produtos de hidratação, mais especificamente ao C-S-H, de acordo com Haouas (2007, p.14). Denominam-se poros de gel aos espaços intersticiais interligados, situados entre as partículas do gel de C-S-H. Estes poros apresentam diâmetros  $d \leq 2,5$  nm, segundo Neville (1987, p.32), o que representa apenas uma ordem de grandeza maior do que o tamanho das moléculas de água. São muito menores que os poros capilares e ocupam cerca de 28% do volume total do gel, o que significa um espaço aproximadamente igual a um terço do volume de sólidos de gel para uma relação a/c 0,50. Tendo em vista que o volume total de gel aumenta ao longo da hidratação, o volume total de poros de gel também aumenta (NEVILLE, 1997, p. 32).

Powers indicou que a largura do espaço interlamelar na estrutura do C-S-H é de  $18 \text{ \AA}^{26}$ , enquanto Feldman e Sereda<sup>27</sup> (*apud* MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.26) sugeriram que este espaço poderia variar de  $5 \text{ \AA}$  a  $25 \text{ \AA}$ . Portanto, estas dimensões são bastante reduzidas e, por essa razão, esta porosidade não é prejudicial à resistência e à permeabilidade da pasta. Contudo, devido aos pequenos diâmetros dos poros de gel, ocorrem pressões de disjunção que originam deformações (HAOUAS, 2007, p. 14).

Os principais métodos utilizados para detectar e analisar os poros de gel são adsorção-desorção de gás, microscopia eletrônica e ressonância magnética nuclear.

---

<sup>26</sup>1 Å =  $10^{-10}$ m

<sup>27</sup>Feldman, R.F. e Sereda, P.J. *Engineering Journal* (Canada), V. 53, No. 8/9, pp: 53-59, 1970.

## b) Poros capilares

Os poros capilares ou cavidades capilares são espaços inicialmente preenchidos por água e existem na pasta endurecida como canais interconectados ou, se a pasta de cimento for densa o suficiente, como cavidades interconectadas apenas pelos poros de gel. Devido à precipitação dos hidratos, principalmente do gel de C-S-H, os poros capilares mudam com o tempo (ALIGIZAKI, 2006, p.9). O volume e o tamanho dos capilares é determinado pela distância inicial entre as partículas de cimento anidro na pasta recém misturada, que depende da relação a/c. É determinado, também, pelo grau de hidratação do cimento, decrescendo com o prosseguimento da hidratação (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 27).

Os poros capilares têm forma altamente irregular e seu tamanho poderia, em teoria, variar de muito pequenos a grandes valores, ou seja, de 2 nm a 10 nm (ALIGIZAKI, 2006, p.9). De acordo com a natureza da porosidade encontrada, tal porosidade pode ser classificada em pequenos capilares, com diâmetros  $\leq 5$  nm, caracterizando, principalmente, os espaços intercristais ou interlamelares. Os poros com diâmetros compreendidos no intervalo  $5 \text{ nm} < d \leq 10 \text{ nm}$ , encontram-se em falhas desses cristais. A faixa de porosidade de  $2,5 \text{ nm} < d \leq 50 \text{ nm}$  situa-se entre a porosidade intrínseca do C-S-H e a porosidade capilar, referindo-se ao espaço de poros entre os hidratos. Os poros com diâmetros entre  $10 \text{ nm} < d \leq 50 \text{ nm}$  referem-se à porosidade correspondente às lacunas dos cristais. Nesta classe de porosidade ocorrem as pressões capilares e as tensões superficiais que são responsáveis pelas deformações por retração endógena e por dessecação (HAOUAS, 2007, p. 14).

De acordo com Haouas (2007, p. 14), os mesoporos apresentam diâmetro entre  $50 \text{ nm} < d \leq 10 \mu\text{m}$ . Assim como ocorre nos microporos, nesta classe de porosidade, as pressões capilares e as tensões superficiais que são responsáveis pelas deformações por retração endógena e por dessecação (HAOUAS, 2007, p. 14).

Em pastas de cimento maduras e densas, os poros capilares podem ficar obstruídos pelo gel e segmentados, de tal modo, que se transformam em poros interconectados somente pelos poros de gel. O grau de maturidade adequado e o tempo necessário para atingi-lo dependem do tipo de cimento Portland empregado, considerando-se diferentes relações a/c. A macroporosidade corresponde à porosidade visível a olho nú ou através de microscopia ótica. Inclui os vazios de ar incorporados na mistura e na compactação, ou ao ar introduzido artificialmente por aditivos. Nos concretos, em presença dos agregados, esta classe de porosidade está

relacionada à zona de transição, cujos diâmetros se situam entre 20 µm e 50 µm (HAOUAS, 2007, p. 15).

Os macroporos geralmente não estão preenchidos com água e, em função dos grandes diâmetros, não são identificadas deformações relacionadas com a retração. De uma forma geral, os poros capilares e macroporos são particularmente relevantes com relação à durabilidade. Já os poros de diâmetros menores, os micro e mesoporos são importantes em relação às variações dimensionais (SETZER<sup>28</sup>, 1995, *apud* COUTINHO, 2005). A última categoria de poros macroscópicos corresponde às microfissuras que podem estar presentes nos materiais cimentícios (HAOUAS, 2007, p. 15).

Os poros capilares têm um efeito importante nos processos de transporte, mas um efeito menor nas taxas da hidratação, ao contrário dos poros de gel. Os capilares formam um sistema interconectado e distribuído aleatoriamente na pasta, sendo a interconectividade da rede de poros a principal responsável pela permeabilidade da pasta de cimento endurecida. A importância da eliminação dos poros capilares contínuos é tão grande que, segundo Neville (1987, p.31), poderia ser uma condição necessária para a avaliação da qualidade do concreto. A adoção de um período de cura úmida suficientemente longo contribui para a ausência de poros contínuos.

A maior parte das técnicas utilizadas para investigação da distribuição do tamanho dos poros permite caracterizar este tipo de porosidade, como por exemplo, microscopia eletrônica, ressonância magnética nuclear e porosimetria por intrusão de mercúrio (HAOUAS, 2007, p. 14).

### c) Poros tipo *hollow-shell*

De acordo com Aligizaki (2006, p.10), os poros tipo *hollow-shell* podem ser considerados um terceiro tipo de poro, juntamente com os poros de gel e capilares e se caracterizam por serem fechados. Foram observados, pela primeira vez por Hadley, em 1972 (*apud* ALIGIZAKI, 2006, p.10), como uma característica importante do processo de hidratação na interface da pasta com o agregado e sua presença foi posteriormente confirmada por Barnes *et al.* (1978, *apud* ALIGIZAKI, 2006, p.10) e por Diamond (2000, *apud* ALIGIZAKI, 2006, p.10), que também confirmou a importância desses poros.

---

<sup>28</sup>Setzer, M. J. *Freeze and thaw deicing resistance of concrete*, 1995, ERMCO'95. IX<sup>th</sup> European Ready Mixed Concrete Congress. Istanbul, Turkey

Depois que uma camada de produtos de hidratação é formada nos grãos de cimento, no início da hidratação, a maior parte do gel de cimento se forma para fora do grão, no espaço capilar. Os produtos formados dentro da periferia do grão original são denominados produtos internos, e os que se desenvolvem para fora, denominam-se produtos externos. Não existe, contudo, uma distinção clara entre os dois tipos de hidratos nas imagens de microscopia. Quando os produtos não se formam dentro dos limites do grão original, um espaço vazio (*hollow shell*) se constitui dentro dos limites do grão original. Esses poros também são chamados grãos de Hadley e apresentam uma forte natureza *ink-bottle*, sendo portanto, facilmente detectados por muitos métodos indiretos para caracterização da distribuição do tamanho dos poros, como porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM). Apresentam tamanho entre 1-1,5  $\mu\text{m}$  e, em sistemas maduros, em particular, são inseridos no gel de cimento e aparecem conectados ao sistema contínuo de poros capilares por poros de gel muito menores. Quando a relação a/c é baixa, esses poros podem ser mais de duas ordens de magnitude maiores do que os poros capilares (ALIGIZAKI, 2006, p. 11).

Os menores poros capilares apresentam dessecação antes dos poros tipo *hollow-shell*, provavelmente porque esses poros não são drenados até que suas pequenas entradas, os poros de gel, sejam drenados (ALIGIZAKI, 2006, p. 11).

#### d) Vazios de ar

Os vazios de ar podem ser causados por ar aprisionado ou incorporado na pasta de cimento endurecida. Os vazios de ar aprisionados ocorrem inadvertidamente durante a mistura e lançamento do concreto e seu tamanho pode ser de até vários milímetros. Os pequenos vazios apresentam forma esférica e os grandes podem ter formas irregulares e, normalmente, não esféricas (ALIGIZAKI, 2006, p. 11). Corr et al.<sup>29</sup> (2002, *apud* CANUT, 2012, p.36), investigaram vazios de ar aprisionados em pastas de cimento, com diferentes relações a/c. Observaram que existe uma fina camada de pasta em volta dos vazios de ar, que apresenta-se porosa, para elevadas relações a/c e, preenchida com produtos de hidratação, para baixas relações a/c.

Já os vazios de ar incorporados são introduzidos intencionalmente, durante a produção do concreto, através do emprego de aditivos químicos incorporadores de ar. Esses vazios têm o

---

<sup>29</sup>Corr, S. J. L., J. Monteiro, P. M., Bastacky, S. J. and Gartner, E. M. (2002) Air void morphology in fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 32, 1025-1031.

formato de bolhas esféricas, individuais, uniformemente distribuídas através da pasta de cimento, ocupando cerca de 2% a 6% do volume do concreto. Não se concentram entre si e não afetam a permeabilidade do concreto (ALIGIZAKI, 2006, p. 11).

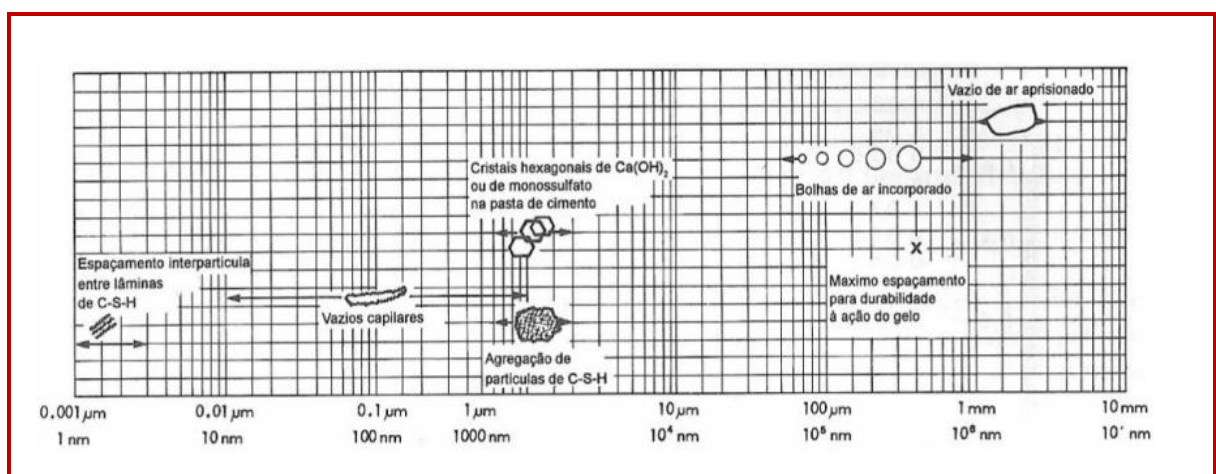
O tamanho dos vazios de ar aprisionado pode ser de 3 nm, enquanto que os vazios de ar incorporados normalmente situam-se na faixa de 50  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$  (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 27).

Tipicamente, esses dois tipos de vazios de ar são isolados de outros vazios de ar incorporados e exercem pouca influência na permeabilidade do concreto (ALIGIZAKI, 2006, p. 11). No entanto, segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 27), ambos os tipos de vazios, em concretos de alto desempenho, são muito maiores que vazios capilares e são capazes de afetar adversamente a resistência e a impermeabilidade.

Os mecanismos de transporte são bem diferentes, dependendo da classificação dos poros. Segundo Aligizaki (2006, p.12), nos mesoporos, por exemplo, ocorrem interações eletrostáticas entre as paredes do poro e o líquido do poro, que se estendem por uma fração significativa da seção transversal do poro. Tais efeitos eletrostáticos podem, portanto, dificultar os processos de transporte através dos poros de tamanhos entre 2 nm e 50 nm. Já nos macroporos, esses efeitos eletrostáticos não ocorrem.

Nesta tese, será adotada a distribuição de poros proposta por Mehta e Monteiro (2014, p. 33), conforme Figura 12.

Figura 12: Distribuição do tamanho dos poros



### 2.2.3 Água da pasta endurecida

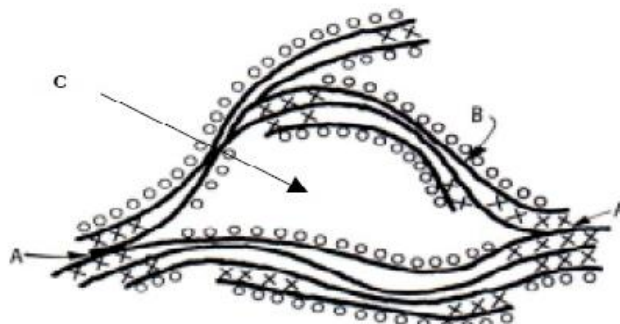
A pasta de cimento hidratada é higroscópica, em função do caráter hidrófilo do cimento e, também, em função da presença dos poros submicroscópicos (NEVILLE, 1997, p. 35). A água está presente na pasta hidratada sob a forma líquida ou de vapor, apresentando-se nos poros em diferentes estados. Pode apresentar-se livre, nos poros capilares, ou estar ligada quimicamente aos produtos de hidratação ou, ainda, pode ser ligada fisicamente às lamelas de C-S-H, por adsorção. Assim, existem vários tipos de forças que mantêm a água em um ou outro estado na estrutura da pasta, dando origem a deformações de retração quando ocorre perda da água para o ambiente. A perda da água de uma pasta saturada ocorre de forma contínua, quando há redução da umidade relativa do ambiente. A água pode ser classificada, segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 29), em: *água quimicamente combinada*, *água interlamelar*, *água adsorvida* e *água capilar*, existindo vários tipos de forças que mantêm a água em determinado estado na pasta hidratada.

#### 2.2.3.1 Água quimicamente combinada

A água quimicamente combinada torna-se parte integral do gel de cimento ou seja, a água que foi consumida na reação de hidratação do cimento para produzir uma nova fase diferente do cimento e da água. É parte integrante da estrutura de vários compostos hidratados (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 31).

O modelo da microestrutura do gel de C-S-H proposto por Feldman e Sereda (1970, p. 4), conforme Figura 13, mostra os diferentes estados da água na pasta, possibilitando o entendimento dos mecanismos envolvidos na saída da água, durante a secagem.

Figura 13: Modelo da microestrutura do gel de C-S-H (silicato hidratado de cálcio)



Fonte: Feldman e Sereda (1970, *apud* BASTOS, 2001, p. 11)

Onde:

A: Ligação entre partículas

X: Água interlamelar

B: Lamela de C-S-H

O: Água adsorvida

C: Água capilar

### 2.2.3.2 Água adsorvida

A água adsorvida está sob a influência das forças de atração da superfície das partículas de gel, devido à energia de ligação das moléculas individuais de água. Tendo em vista que esta energia decresce com a distância em relação à superfície do sólido, uma porção de água adsorvida pode ser perdida por secagem da pasta quando a umidade cai para 30%. Esta perda de água adsorvida é considerada a principal causa da retração por secagem da pasta (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 30). Segundo esses autores, a água adsorvida pode ser removida quando a pasta de cimento hidratada é seca a uma umidade relativa UR 30%.

### 2.2.3.3 Água interlamelar

A água interlamelar, também chamada de água intersticial ou zeolítica, fica retida entre as superfícies de certos planos em cristais (NEVILLE, 1997, p. 35). Está associada à estrutura do C-S-H, sendo fortemente ligada por pontes de hidrogênio. Sua perda somente ocorre com secagem forte, ou seja, para umidades relativas abaixo de 11%, provocando intensa retração do C-S-H (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 30). Segundo esses autores, a água adsorvida pode ser removida quando a pasta de cimento hidratada é seca a uma umidade relativa abaixo de UR 11%.

#### 2.2.3.4 Água capilar

A água capilar ou água livre se localiza nos vazios capilares maiores que 0,050  $\mu\text{m}$ , que correspondem aos espaços maiores, não preenchidos pelos produtos de hidratação. Corresponde ao volume de água livre das forças de atração exercidas pelas superfícies sólidas. Mehta e Monteiro (2014, p. 29) propõem a divisão da água capilar em duas categorias, de acordo com o seu comportamento na pasta: a água presente em vazios grandes, com diâmetro  $> 50 \text{ nm}$  (0,05  $\mu\text{m}$ ), também denominada *água livre*, pois pode ser removida sem causar nenhuma variação de volume na pasta, e a água presente nos capilares pequenos (5 nm a 50 nm), *retida por tensão capilar*, cuja remoção pode causar variação volumétrica. Os autores classificam a água dos vazios capilares separando-a em água livre e água capilar, justificando que a perda de água livre não causa contribuição significativa à variação dimensional do concreto. Entretanto, embora muito pequena, a retração provocada pela perda de água livre existe. Assim, tanto a água livre quanto a água capilar, quando perdidas, provocam contração volumétrica. É importante verificar que a retração por secagem está relacionada principalmente à remoção da água adsorvida da pasta de cimento.

Segundo Neville (1997, p. 36), para fins de investigação, pode ser conveniente classificar a água no cimento hidratado em *evaporável* e *não-evaporável*. Para tanto, podem ser aplicadas técnicas diversas que essencialmente dividem a água segundo a possibilidade de ser removida a uma certa pressão reduzida de vapor. Em geral, a água *não-evaporável* contém toda a água combinada quimicamente e parte da água não retida quimicamente. A quantidade da água *não-evaporável* aumenta à medida que a hidratação prossegue. No cimento bem hidratado, a água *não-evaporável* é cerca de 18% em massa do material anidro e, no cimento completamente hidratado, esta proporção sobe para 23% (LEA<sup>30</sup>, 1970, *apud* NEVILLE, 1997, p. 36). Existe uma proporcionalidade entre a quantidade de água não-evaporável e o volume sólido da pasta de cimento, portanto a quantidade de água *não-evaporável* pode ser usada como uma medida da quantidade do gel de cimento presente, isto é, do grau de hidratação. A soma da água fisicamente adsorvida, que ocupa os poros de gel, e da água livre constitui a *água evaporável*, e pode ser removida, segundo Powers (1960, *apud* CANUT, 2012, p. 22).

---

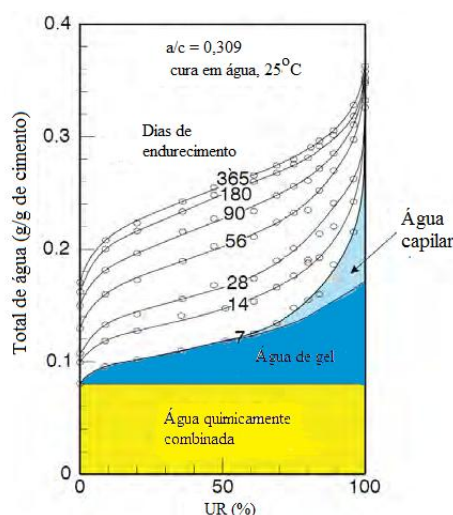
<sup>30</sup>LEA, F. M. *The Chemistry of cement and concrete*. London, Arnold, 1970



De acordo com o modelo de Powers (1960, *apud* CANUT, 2012, p.21), a quantidade de água não-evaporável de uma pasta de cimento totalmente hidratada é equivalente a 0,23 g/g do cimento que reagiu. Segundo Powers and Brownyard (1947, *apud* CANUT, 2012, p.21), a água de gel é aquela contida nos poros do gel de C-S-H, e corresponde a 0,19 g/g do cimento que reagiu. Está dividida em água adsorvida e água interlamelar, ou localizada entre as camadas do C-S-H (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.31).

A água evaporável pode ser representada, segundo Canut (2012, p. 22) pela água mantida na pasta como uma função da pressão de vapor relativa, como ilustra a Figura 14.

Figura 14: Água capilar e água de gel



Fonte: Adaptado de Powers e Brownyard (1947, *apud* CANUT, 2012, p.22)

## 2.2.4 Principais fatores que afetam a estrutura de poros

A hidratação do cimento modifica continuamente a estrutura de poros, em função de fatores como composição química do cimento, distribuição do tamanho dos poros, finura do cimento, relação a/c, temperatura, entre outros fatores. A porosidade total e distribuição do tamanho dos poros são fortemente influenciados pelas condições de cura e composição do cimento (HU, 2004, p.7).

### 2.2.4.1 Grau de hidratação

A porosidade total decresce durante a hidratação, pois os hidratos preenchem gradualmente o espaço disponível da pasta de cimento. Existe uma tendência geral de redução dos poros grandes, nos primeiros estágios da hidratação, enquanto que o volume dos poros pequenos (< 100 Å) aumentam significativamente, de acordo com Naik (1997, p. 6). Os produtos da

hidratação se formam primeiro nos grandes poros e, posteriormente, nos poros menores. Assim, o volume dos poros menores permanece mais ou menos constante (HU, 2004, p.7). Após o preenchimento dos poros grandes, a continuidade da hidratação afeta toda a distribuição do tamanho dos poros. A forma da curva de distribuição do tamanho dos poros versus o grau de hidratação permanece constante ao longo do processo de hidratação (HU, 2004, p.7). O aumento do grau de hidratação, com o tempo, leva à melhoria da microestrutura e, conseqüentemente, ao aumento da densidade. A manutenção de uma cura adequada contribui para a melhoria da estrutura interna, segundo Naik (1997, p. 7).

#### 2.2.4.2 Relação água/cimento

Para um dado teor de material cimentício na mistura do concreto, o espaço ocupado pelos produtos de hidratação aumenta com o aumento do teor de água. Contudo, o volume dos produtos de hidratação permanecem contantes, independentemente da quantidade de água, para um dado grau de hidratação. Assim, os espaços não preenchidos, correspondentes aos poros de gel e vazios capilares, aumentam com o aumento da relação a/c (NAIK, 1997, p. 6). É esperado, portanto, que elevadas relações a/c resultem em um grande volume de poros de todos os tamanhos. O aumento da relação a/c leva ao aumento da fração de poros maiores, o que representa um aumento do tamanho médio dos poros. Além de elevar a porosidade da matriz de cimento, o aumento da relação a/c também leva à maior porosidade na região de interface com o agregado, favorecendo a formação de grandes cristais de hidróxido de cálcio e de etringita (HU, 2004, p.7). Conseqüentemente, o aumento da relação a/c promove o aumento da porosidade total e a redução da densidade do concreto.

#### 2.2.4.3 Distribuição do tamanho da partícula do cimento

A finura do cimento e a distribuição do tamanho da partícula exercem influência significativa na microestrutura, já que partículas menores reagem mais rapidamente durante a hidratação. O volume de poros menores é maior para cimentos mais finos. O empacotamento das partículas de cimento é mais importante do que a finura do cimento. O volume de poros diminui com o empacotamento mais denso das partículas do cimento. A adição de sílica ativa resulta na densificação da pasta, na redução do volume de poros maiores e, assim, na redução do tamanho médio dos poros. A redução no tamanho do poro e a densificação da pasta de cimento pode ser parcialmente atribuída ao empacotamento mais denso das partículas do cimento (HU, 2004, p.7).

#### 2.2.4.4 Efeito da compactação, condições de exposição e tipo de agregado

Existem fatores que afetam a porosidade indiretamente, como a compactação durante a mistura, permitindo a eliminação do ar aprisionado. A compactação/consolidação diminui os poros capilares, promovendo a redução da porosidade e o aumento da densidade, notadamente na região de interface da pasta com o agregado, onde o empacotamento das partículas de cimento é ineficiente (NAIK, 1997, p. 8).

A exposição à temperatura e a ambientes ácidos resulta em mudanças irreversíveis nos hidratos, alterações na eficácia do conteúdo aglutinante do concreto. Outro fator a ser considerado é o grau de porosidade do agregado. Quando são utilizados agregados porosos no concreto, ao invés de agregados obtidos de rochas duras, como quartzito, o modo de falha do concreto sob carga de compressão difere consideravelmente, segundo Kumar e Bhattacharjee (2003, p. 162). Além disso, segundo os autores, devido à contribuição da porosidade do próprio agregado, observa-se maior porosidade do concreto. Para concretos preparados com agregados de maior dureza, a superfície de fratura passa através da interface da argamassa/agregado, sem que ocorra ruptura do agregado.

### 2.2.5 Volume das fases constituintes da pasta

Como apresentado na seção 2.2.1.1 (Figuras 8 a 10), vários modelos microestruturais foram desenvolvidos para representar a complexa rede de poros da matriz de cimento hidratada, através de diversas abordagens. Mesmo com o desenvolvimento de modelos baseados em métodos de caracterização experimental mais precisos, o modelo de Powers constitui-se, ainda, em uma poderosa ferramenta para prever a evolução da estrutura do poro, podendo avaliar, até certo ponto, os efeitos de diferentes relações a/c, diferentes idades e graus de saturação na estrutura do poro (CANUT, 2012, p. 45).

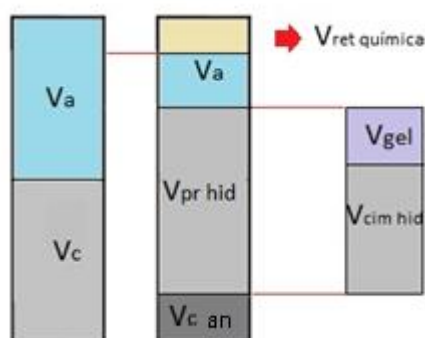
O modelo representativo da estrutura da pasta, proposto por Powers e Brownyard<sup>31</sup> (1947, *apud* BROUWERS, 2004, p.1697), permite o entendimento da configuração e volume ocupado por cada uma das fases constituintes, após a hidratação do cimento. A Figura 15 apresenta uma representação dos volumes das fases constituintes da pasta, com base no modelo de Powers e Brownyard. Observa-se que a maior parte da pasta hidratada é ocupada pelos produtos de hidratação ( $V_{p_{hid}}$ ), consistindo em um esqueleto sólido formado pelo

---

<sup>31</sup> POWERS, T.C.; Brownyard, T.L. *Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste*, Bull. 22, Res. Lab. of Portland Cement Association, Skokie, IL, U.S.A., reprinted from J. Am. Concr. Inst. (Proc.), vol. 43 (1947), pp. 101–132, 249–336, 469–505, 549–602, 669–712, 845–880, 933–992.

cimento hidratado ( $V_{\text{cimhid}}$ ) e pelos poros de gel ( $V_{\text{gel}}$ ), que podem estar preenchidos por água de gel ou adsorvida. Além dos produtos da hidratação, parte do volume da pasta de cimento hidratada corresponde ao cimento que não se hidratou, ou anidro ( $V_c$ ).

Figura 15: Volumes das fases constituintes da pasta de cimento Portland, a partir da hidratação



\*Sem escala

Fonte: Adaptado de Brouwers (2004, p. 1698)

Onde:

$V_a$  – volume da água

$V_{c\text{ an}}$  – volume do cimento anidro

$V_c$  – volume do cimento

$V_{\text{gel}}$  – volume do gel

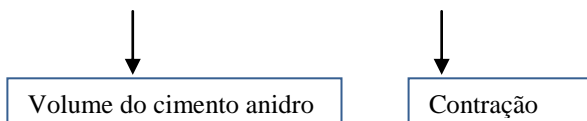
$V_{\text{pr hid}}$  – volume dos produtos de hidratação

$V_{\text{cim hid}}$  – volume do cimento hidratado

A representação esquemática da Figura 15 pode ser melhor entendida a partir de um exemplo numérico, apresentado por Neville (1997, p. 26-34), assumindo a hidratação em um tubo selado, isto é, no qual não há movimento de água do sistema para o exterior, ou do exterior para o sistema. Considerando-se a hidratação de 100 g de cimento, com massa específica igual a  $3,15 \text{ kg/dm}^3$ , o volume absoluto do cimento anidro é  $100/3,15=31,8 \text{ ml}$ . Em cimentos bem hidratados, a água não-evaporável é cerca de 18% da massa do material anidro, sendo 23% em cimentos completamente hidratados (LEA, 1970, *apud* NEVILLE, 1997, p. 37). Assim, segundo Neville (1997, p.37), com base na proporcionalidade entre a quantidade de água não-evaporável e o volume sólido da pasta de cimento, o volume da água não-evaporável pode ser usado para medir a quantidade de gel de cimento presente (grau de hidratação). Tomando-se o volume da água não-evaporável como 23% (23 ml), os produtos

sólidos da hidratação ocupam o volume igual à soma dos volumes do cimento anidro e da água, menos 0,254 do volume da água não-evaporável:

$$V_{\text{prhid}} = 31,8 + 0,23 \times 100(1 - 0,254) = 48,9 \text{ ml} \quad \text{Equação 5}$$



Sabendo-se que a porosidade característica do gel de cimento é de 28% (COPELAND e HAYES<sup>32</sup>, *apud* NEVILLE, 1997, p. 33), tem-se:

$$\frac{V_{\text{gel}}}{48,9 + V_{\text{gel}}} = 0,28 \quad V_{\text{gel}} = 19 \text{ ml} \quad \longrightarrow \quad \text{Equação 6}$$

A água total da mistura corresponde a 42 ml (23 + 19), e a relação a/c é de 0,42, em massa. Tendo em vista que o volume do cimento hidratado é de 67,9 ml (48,9 + 19), e considerando-se que o volume original do cimento e água é de 73,8 ml (31,8 + 42), pode-se deduzir que existe um decréscimo de volume, devido à hidratação de 5,9 ml (73,8 – 67,9), o qual representa o espaço capilar distribuído na pasta de cimento hidratada. Este decréscimo corresponde à retração química. Salienta-se que esses valores são aproximados mas, se a quantidade total de água fosse menor do que 42 ml, não haveria quantidade suficiente para a hidratação completa, tanto para as reações químicas, quanto para o preenchimento dos poros de gel, em formação (NEVILLE, 1997, p.27).

Quando a hidratação em um cp selado, como no caso do exemplo anterior, prossegue até um estágio em que a água combinada corresponde à metade da quantidade de água original, aproximadamente, a hidratação será interrompida. Assim, a completa hidratação em um cp selado é possível apenas quando a água adicionada na mistura é pelo menos o dobro da água requerida para a reação química (NEVILLE, 1997, p.27).

Analisa-se, agora, o exemplo da hidratação de uma pasta de cimento curada em água por imersão, de modo que a água possa penetrar nos capilares, quando os mesmos se esvaziam devido ao prosseguimento da hidratação. Como visto anteriormente, 100 g de cimento (31,8 ml), após a hidratação, ocupam um volume de 67,9 ml. Se a hidratação for completa, para que nenhum grão de cimento permaneça anidro, e para que não haja nenhum capilar presente, a água adicionada à mistura deve ser 36,1 ml (67,9-31,8), o que corresponde a uma

---

<sup>32</sup> L.E. Copeland e J.C.Hayes. The determination of non-evaporable water in hardened Portland cement paste, ASTM Bul. N.194, p:70-4, 1953.

relação a/c 0,36, em massa. Para Powers<sup>33</sup> (1958, *apud* NEVILLE, 1987, p. 27), essa relação a/c deve ser 0,38 e, caso for menor que 0,38, a hidratação completa não é possível.

Sabe-se que a hidratação ocorrerá somente através da água presente nos capilares. Como nesse caso existe a disponibilidade de água, parte do cimento anidro irá se hidratar. Mesmo assim, após a hidratação, ainda haverá um percentual (19%) de cimento que não irá nunca se hidratar, devido à indisponibilidade de espaço (NEVILLE, 1997, p. 29). Em outras palavras, a ocorrência da hidratação depende da relação gel/espaço da pasta de cimento hidratada, que é definida como a relação entre o volume da pasta de cimento hidratada e a soma dos volumes do cimento hidratado e dos poros capilares (POWERS e BROWNYARD<sup>34</sup>, 1947, *apud* NEVILLE, 1997, p. 274). Como o cimento hidrata e ocupa mais do que o dobro do seu volume original, assim, assume-se que 1 ml de cimento, ocupará o volume de 2,06 ml, aproximadamente. Assim, a relação gel/espaço “r” pode então ser calculada como:

$$r = \frac{2,06 \cdot Vc \cdot \alpha}{Vc \cdot \alpha + a/c}$$

Equação 7

Onde:

Vc=volume específico do cimento (por unidade de massa)

$\alpha$ = grau de hidratação

a/c= relação a/c

Considerando-se o volume específico do cimento seco como 0,319 ml/g, resulta:

$$r = \frac{0,657 \cdot \alpha}{0,319 \cdot \alpha + a/c}$$

Equação 8

Powers determinou que a relação entre o desenvolvimento da resistência e a relação gel/espaço é  $234 \cdot r^3$  MPa, sendo independente da idade do concreto ou da proporção da mistura. A resistência do concreto é influenciada pelo volume dos vazios, incluindo ar aprisionado, poros capilares, poros de gel, ar incorporado, caso presente.

<sup>33</sup>T.C.Powers. The physical structure and engineering properties of concrete, *Portl.Cem.Assoc. Res. Bd.*, 27, pp. 178-88 (Washington, 1947).

<sup>34</sup>T.C.Powers e T.L. Brownyard. Studies of the physical properties of hardened Portland cement (Nine Parts), *J.Amer, Concrete Inst* 43 (1947)

Com base em Neville (1997, p. 26-34), apresenta-se um exemplo do cálculo dos vazios, a partir das proporções de cimento, agregados graúdo e miúdo, da relação a/c da mistura, que permite visualizar a estrutura do concreto.

Seja um concreto com traço 1:2:3 (cim:areia:brita), relação a/c 0,55 e as massas específicas do cimento, areia, brita e água, respectivamente: 3,15; 2,65, 2,70 e 1,00 kg/dm<sup>3</sup>. O volume de ar aprisionado no concreto fresco foi considerado 1,4%, e a contração química foi considerada 22%, sendo então  $0,22 \times 0,254 = 0,0559 \cong 0,06$ , correspondendo a 2% do volume total (2,77 dm<sup>3</sup>).

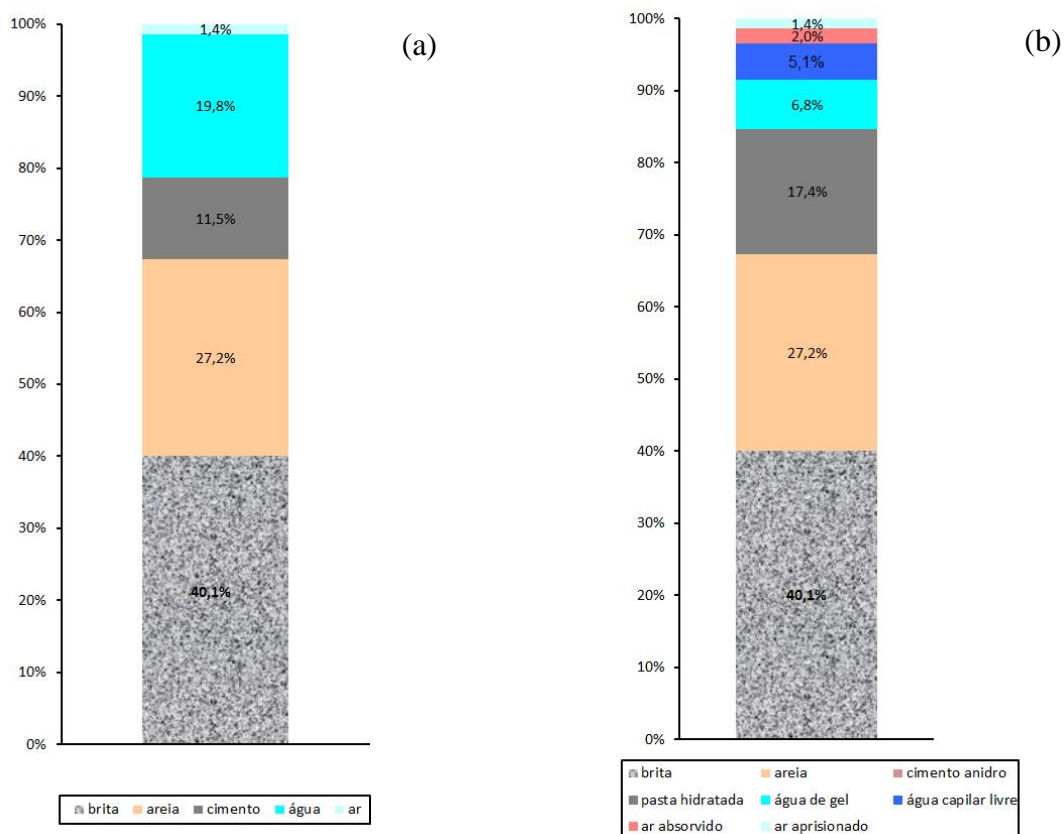
No Quadro 4 apresentam-se os volumes absolutos e percentuais dos compostos resistentes do concreto e da porosidade.

Quadro 4: Volumes das fases constituintes de um concreto com cimento Portland, traço 1:2:3, relação a/c 0,55, para  $\alpha = 100\%$

<i>Concreto endurecido</i>			<i>Volume absoluto (dm<sup>3</sup>)</i>	<i>Volume (%)</i>
<i>Compostos resistentes</i>	Cimento anidro		0,00	0,0
	Pasta hidratada	Produtos de hidratação	0,48	17,4
		Poros de gel	0,19	6,8
	Areia		0,75	27,2
	Brita		1,11	40,1
<i>Porosidade</i>	Ar aprisionado		0,04	1,4
	Retração química		0,06	2,0
	Água capilar (livre)		0,14	5,1
<i>Total</i>			2,77	100,0

A Figura 16 ilustra, através de gráficos da constituição física do concreto nos estados (a) fresco e (b) endurecido, o exemplo apresentado no Quadro 4.

Figura 16: Constituição física: (a) concreto fresco e (b) endurecido



Observa-se que, depois de endurecido, o concreto passa a ter um volume de vazios superior (3,4%) ao que apresentava no estado fresco (1,4%), devido à retração química. Neste exemplo, se a relação a/c fosse inferior a 0,41, poderia faltar água para a hidratação completa e, assim, haveria a presença de grãos de cimento anidro. No entanto, se houver disponibilidade de água (cura por imersão), de modo a preencher os vazios capilares, os grãos anidros podem se hidratar (POWERS, *apud* COLLEPARDI, 1983).

### 2.3 AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO (*SELF-HEALING*)

A autocicatrização do concreto não é um assunto recente. Desde 1836, já havia relatos sobre esse fenômeno na França, em estruturas de reservatórios de água, tubulações e bueiros. A autocicatrização do concreto foi observada, também, em pontes (KOVLER e VAN BREUGEL, 2013, p.1). Nos últimos anos, tem sido cada vez maior o interesse em torno da capacidade de autocicatrização dos materiais cimentícios, o que pode ser comprovado pelo número significativo de trabalhos experimentais sobre o tema (ter HEIDE, 2005, p. 572; YANG *et al.*, 2009, p. 382). Em razão desse grande interesse, importantes instituições de pesquisa criaram grupos de estudo com o objetivo de sistematizar o conhecimento disponível,



além de gerar novos resultados experimentais. O Comitê Técnico 221-SHC (*Self-healing phenomena in cement based materials*) do RILEM<sup>35</sup> foi criado em 2005 para o desenvolvimento de pesquisas utilizando os conceitos da autocicatrização (*self-healing*) no projeto e manutenção de estruturas de concreto, visando à transferência do conhecimento obtido para o meio técnico. Atualmente, o estudo desse tópico continua despertando interesse, considerando-se a criação, em 2016, do Comitê Técnico<sup>36</sup> (*Self-healing phenomena concrete – Its efficiency e evaluation*). Nesse sentido, os Comitês Técnicos JCI-TC075B (*Autogenous Healing Cementitious Materials*), de 2007 a 2009, e JCI-TC091A (*Self-healing/Repairing Technology in Cement-based Materials*), de 2009 a 2010, ambos do JCI<sup>37</sup>, também foram criados para a realização de experimentos e medições, com o intuito de subsidiar pesquisas neste tema.

Embora tenha sido observado, pela primeira vez, há muitos anos, o fenômeno da autocicatrização vem surgindo como um conceito alternativo na prevenção e gestão de danos no concreto. Existem na literatura diversas abordagens para esse tema. A autocicatrização de microfissuras, por exemplo, foi bastante estudada com vistas à recuperação da estanqueidade de estruturas de concreto. A autocicatrização de microfissuras também foi apontada como causa da redução do coeficiente de difusão do concreto, com o passar do tempo, em estruturas marinhas, conforme o Technical Committee 221-SHC<sup>38</sup>.

Autocicatrização, auto-selagem e cicatrização autógena são termos geralmente empregados como sinônimos, sendo que autocicatrização é o mais comum. A denominação “autógena” enfatiza que o concreto cicatriza sem nenhuma ajuda do exterior, conforme comenta ter Heide (2005, p. 3). A autocicatrização pode ser considerada natural ou passiva, enquanto propriedade inerente aos materiais cimentícios. No entanto, pesquisas têm sido desenvolvidas para modificar determinadas propriedades do concreto, utilizando conceitos e mecanismos da autocicatrização. Esses estudos objetivam a obtenção de projetos mais eficientes, duráveis e sustentáveis, uma vez que o aumento da vida útil tende a reduzir a demanda por novas estruturas de concreto (ROOIJ *et al.*, 2013, p. 3). O desenvolvimento de concretos autocicatrizantes de elevada funcionalidade e confiabilidade, por longo prazo, empregando

---

<sup>35</sup>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages

<sup>36</sup> Self-healing concrete – Its efficiency and evaluation:  
[http://www.rilem.org/gene/main.php?base=8750&gp\\_id=345](http://www.rilem.org/gene/main.php?base=8750&gp_id=345)

<sup>37</sup>Japan Concrete Institute Technical Committee Reports. Digest Edition. 2009, pp: 91-102

<sup>38</sup> Technical Committee 221 – SHC – RILEM: [http://www.rilem.org/gene/main.php?base=8750&gp\\_id=228](http://www.rilem.org/gene/main.php?base=8750&gp_id=228)

determinados tipos de aditivos ou a utilização de geomateriais contendo argila, são exemplos dessa abordagem (IGARASHI *et al.*, 2011, p.6).

Salienta-se que, nesta tese, apenas os conceitos ligados à autocicatrização natural serão aprofundados, para não fugir ao escopo da pesquisa.

### 2.3.1 Tipos de autocicatrização

Devido à grande quantidade de trabalhos abordando o tema da autocicatrização de fissuras no concreto, e considerando haver uma falta de padronização quanto à terminologia empregada pelos pesquisadores, os comitês técnicos criados no JCI e RILEM buscaram, inicialmente, sistematizar conceitos e classificar os tipos de autocicatrização. O Comitê Técnico JCI-TC075B (IGARASHI *et al.*, 2009, p.94) propôs uma classificação mais detalhada sobre o fenômeno:

- Cicatrização natural: fenômeno no qual as fissuras no concreto são naturalmente preenchidas, sem qualquer arranjo especial no projeto do material, em um ambiente com a presença de umidade. Exemplo: Re-hidratação de grãos de cimento anidro.
- Cicatrização autonômica: fenômeno no qual as fissuras são obstruídas no concreto a partir de algum projeto especial, como por exemplo, através do uso de materiais cimentícios suplementares apropriados, para que exerçam efeitos favoráveis ao preenchimento das fissuras, ou para que acelerem esse processo, em um ambiente com a presença de umidade. Exemplos: uso de cinza volante, uso de aditivos expansivos, uso de bactérias.
- Reparo ativado: fenômeno em que as fissuras são preenchidas através do efeito da incorporação prévia ao concreto de algum elemento capaz de promover o reparo, de forma autônoma. Exemplos: uso de microcápsulas, uso de equipamentos de geração de calor.
- Cicatrização autógena: esse conceito abrange a cicatrização natural e a cicatrização autonômica, podendo ser definido como todo o fenômeno de preenchimento de fissuras no concreto, em um ambiente com a presença de umidade.
- Cicatrização/reparo modificado (*Engineered healing/repairing*): conceito abrangendo cicatrização autonômica e reparo ativado. Fenômeno no qual as fissuras são preenchidas/reparadas por concretos especiais, produzidos a partir de projetos específicos para essa finalidade de preenchimento/reparo de fissuras.

- Autocicatrização/reparo: fenômeno global de preenchimento de fissuras no concreto, sem a intervenção direta do homem para o reparo.

O Comitê Técnico do RILEM (ROOIJ *et al.*, 2013, p.9) propôs uma classificação mais abrangente. Para tanto, a autocicatrização (*self-healing*) foi definida como qualquer processo do próprio material que envolva a sua recuperação/melhoria de desempenho, após uma ação que o tenha reduzido. De um modo geral, esse processo pode ser classificado como:

- Autógeno: quando o processo de recuperação utiliza materiais que estão presentes no próprio sistema, ou seja, que não foram especificamente concebidos para a autocicatrização.
- Autonômico: quando o processo de recuperação utiliza materiais que não estão presentes no sistema, mas que foram concebidos e incorporados para promoverem a autocicatrização.

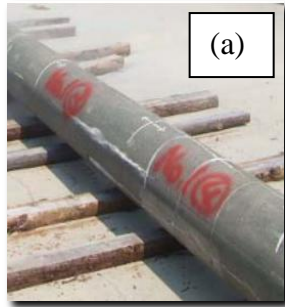
Diante do exposto, pode-se dizer que, de um modo geral, a autocicatrização das fissuras pode ser natural, ou artificial. No processo natural ou passivo, o fenômeno ocorre devido ao potencial para a autocicatrização dos materiais cimentícios. No processo artificial, são utilizados materiais específicos que, em função de suas propriedades (exemplo: ductilidade), potencializam a capacidade de autocicatrização do concreto, aumentando, assim, sua durabilidade (WU *et al.*, 2012, p. 572).

### **2.3.2 Mecanismos da autocicatrização natural**

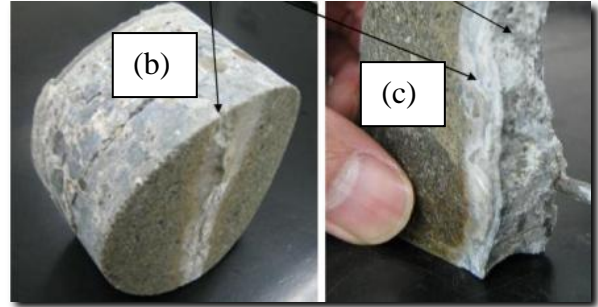
Em comparação com outros materiais, o concreto intrinsecamente contém “microreservatórios” de partículas de cimento anidro, amplamente dispersos e disponíveis para a autocicatrização (LV e CHEN, 2014, p.2). A cicatrização natural é um fenômeno inerente ao concreto, através do qual as fissuras existentes são naturalmente preenchidas, quando existe a disponibilidade de umidade, sem qualquer intervenção intencional para reparo. Um exemplo deste tipo de autocicatrização foi identificado em postes de concreto utilizados pela Prefeitura de Shiga, no Japão, para a rede de suprimento de energia. Fissuras longitudinais existentes nesses postes, causadas pela corrosão da armadura devido à exposição às intempéries, por 34 anos, foram naturalmente preenchidas. Hosoda *et al.* (2012, p. 279) investigaram o mecanismo de autocicatrização dessas fissuras, extraíndo amostras do concreto dos postes para a realização de análises de microscopia e de difração de raios X. A Figura 17 apresenta o aspecto do poste de concreto (a) e de amostras extraídas para realização de

análises de microscopia e de difração de raios X. Observam-se os precipitados presentes na superfície (b) e no interior da fissura (c), respectivamente.

Figura 17: Aspecto do poste de concreto (a), precipitados presentes na superfície (b) e no interior da fissura (c).



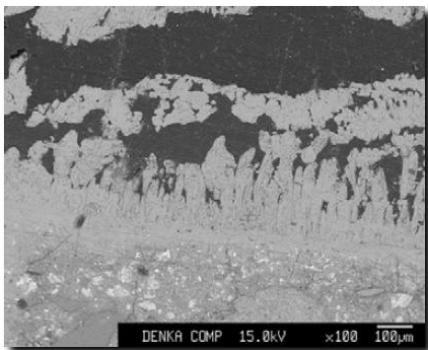
(a) Aspecto do poste de concreto



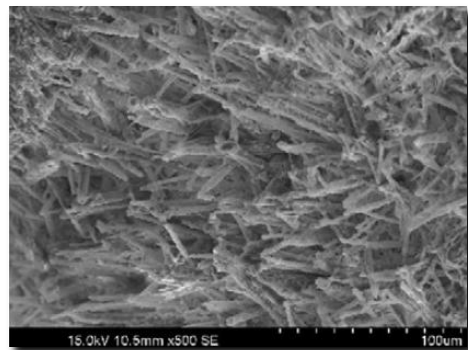
Precipitados: (b) superfície e (c) no interior da fissura

A partir das análises de difração de raios X e de microscopia, foi identificada a presença de calcita na superfície do poste, conforme imagem apresentada na Figura 18 (a) e depósitos de etringita em adição à calcita, em fissuras internas dessa mesma estrutura, conforme Figura 18 (b).

Figura 18: Imagens obtidas através de análise de microscopia



(a) Depósito de calcita na superfície da fissura

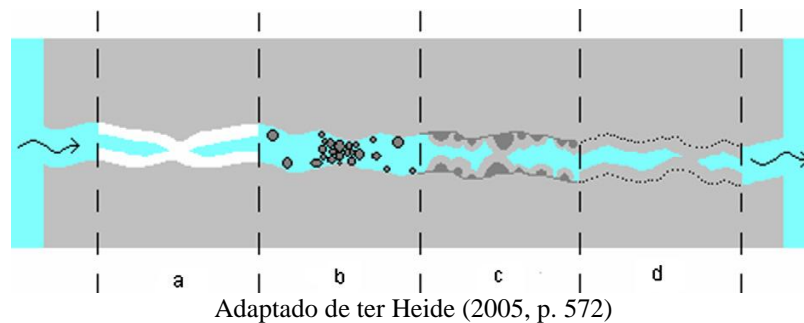


(b) Etringita no interior da fissura

De acordo com os autores dessa pesquisa, os cristais de etringita em forma de agulha precipitaram em uma direção preferencial, como pode ser observado através da Figura 18 (b), provavelmente porque essa era a direção do fluxo da água através da fissura. Íons

constituintes da etringita, como  $\text{SO}_4$ , foram sendo dissolvidos durante seu fluxo, da pasta de cimento, à água, do interior do poste até a superfície. Assim, ocorreu a precipitação gradual da etringita ao longo das fissuras, devido a forças motrizes tais como mudanças de concentração devido à secagem/molhagem, ou mudanças de temperatura. Os pesquisadores destacaram que a etringita, por conter grandes quantidades de água combinada, ocupando um grande volume, favoreceu efetivamente a autocicatrização. A forma de agulha dos cristais acelerou o preenchimento das fissuras, funcionando como um local de depósito do  $\text{CaCO}_3$ , devido à elevada superfície específica da etringita. Com base na literatura, os principais mecanismos associados ao fenômeno da autocicatrização natural estão apresentados na representação esquemática da Figura 19.

Figura 19: Mecanismos de autocicatrização natural no concreto



- Formação de carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio
- Depósitos de impurezas provenientes da água ou de partículas desprendidas das paredes da fissura
- Hidratação tardia de grãos anidros de cimento
- Expansão da matriz de cimento (ter Heide, 2005, p. 572)

De acordo com ter Heide (2005, p. 4), o item (a) da Figura 19 corresponde a:

Formação do carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio: o hidróxido de cálcio, proveniente da reação de hidratação do cimento, pode dissolver-se em água dentro da fissura e precipitar-se na área da fissura:



Para formar o carbonato de cálcio, a água na fissura deve conter dióxido de cálcio dissolvido, sendo a reação de formação do carbonato de cálcio a seguinte:



Ca<sup>2+</sup> é liberado do hidróxido de cálcio que está dissolvido na pasta de cimento:

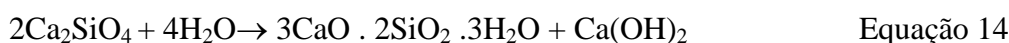
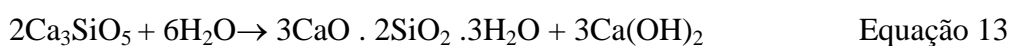


CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> vem do CO<sub>2</sub> contendo água:



Em (b), partículas com origem na água que flui através da fissura, ou partículas de cimento desprendidas das paredes da fissura podem depositar-se, obstruindo-a. Em (c), estão representados produtos da hidratação continuada, preenchendo a fissura e, em (d), está representado o efeito da expansão da matriz de cimento, no estado saturado do concreto. Com a saturação do concreto, as fissuras menores podem fechar. Além disso, a saturação leva à expansão das superfícies da fissura, havendo redução de sua largura. A aproximação das faces da fissura favorece a ocorrência dos demais mecanismos de autocicatrização (ver HEIDE, 2005, p.5). De acordo com Wu *et al.* (2012, p. 572), os principais mecanismos correspondem aos esquemas (a) e (c) da Figura 19. A autocicatrização de fissuras em concretos maduros ocorre principalmente devido à formação de carbonato de cálcio, enquanto que, em concretos jovens, está relacionada à hidratação tardia de grãos anidros de cimento (LV e CHEN, 2013, p. 1882). Em muitos casos, mais de um desses processos pode ocorrer simultaneamente (TALAIKHOZAN *et al.*, 2014, p.2). Esta cicatrização pode ser parcial ou, em casos menos frequentes, pode haver a selagem completa da fissura (YANG *et al.*, 2009, p. 382).

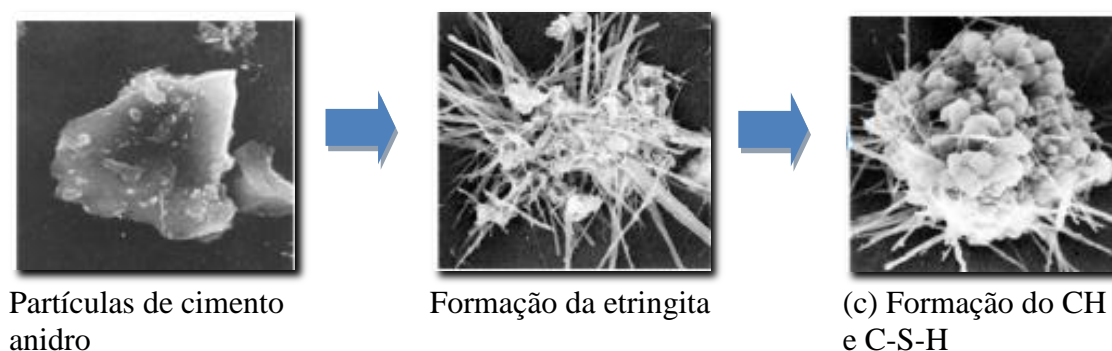
O principal mecanismo de autocicatrização autógena ocorre através da produção de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produto da hidratação do cimento que confere resistência à pasta de cimento hidratada, portanto as propriedades mecânicas podem ser recuperadas (ver item c da Figura 41). Conforme Li *et al.* (2013, p.119), o silicato tricálcico (alita) e o silicato dicálcico (belita) reagem com a água, formando o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e CH (hidróxido de cálcio).



Como se sabe, o silicato tricálcico reage mais rapidamente, por conter mais cálcio reativo, sendo, portanto, responsável pela resistência do concreto nas primeiras idades. O silicato dicálcico reage mais lentamente, sendo responsável pela resistência nas idades mais avançadas (LI *et al.*, 2013, p.119). A hidratação continuada ocorre quando alguns grãos de cimento contendo alita e belita não reagem completamente. Resultam, assim, em núcleos

anidros, envolvidos por C-S-H hidratado e CH, constituindo-se num encapsulado natural de minerais reativos, dispersos no concreto de modo mais ou menos uniforme. Quando ocorre a fissuração do concreto, esse material encapsulado é exposto à atmosfera e, na presença de água, começa a re-hidratar, havendo uma expansão volumétrica que pode preencher as fissuras, promovendo sua selagem parcial ou completa (LI *et al.*, 2013, p.120). A Figura 20 apresenta a hidratação de partículas de cimento anidro (SHIM *et al.*, 2015, p. 5<sup>39</sup>).

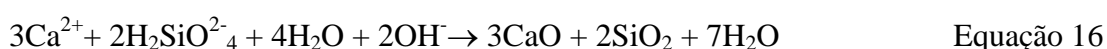
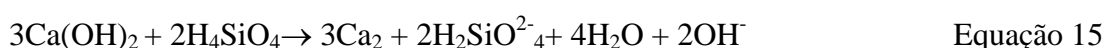
Figura 20: Hidratação de partículas de cimento anidro



Fonte: Shim *et al.* (2015, p. 5)

A continuidade da hidratação de grãos anidros pode ocorrer em todas as misturas contendo cimento Portland. Sistemas cimentícios contendo adições de aluminossilicatos, como cinza volante, sílica ativa, cinza de alto forno, ou argila, podem favorecer a capacidade de autocicatrização devido à reação pozolânica (LI *et al.*, 2013, p.120). Materiais já amplamente utilizados, como a cinza volante e a escória de alto forno, devido às suas propriedades pozolânicas, reduzem a porosidade da matriz e, assim, aumentam a resistência. Assim como o C-S-H produzido pela re-hidratação de grãos anidros de cimento, o C-S-H produzido por reação pozolânica também pode selar fissuras finas, constituindo-se, assim, em uma opção vantajosa com vistas à durabilidade (LI *et al.*, 2013, p.120).

Em ambientes alcalinos, silicatos podem ser dissolvidos a partir de material pozolânico, para criar ácido silícico ( $H_4SiO_4/SiH_3OH$ ), o qual reage com o hidróxido de cálcio dissolvido, resultando em C-S-H e água (LI *et al.*, 2013, p.120).



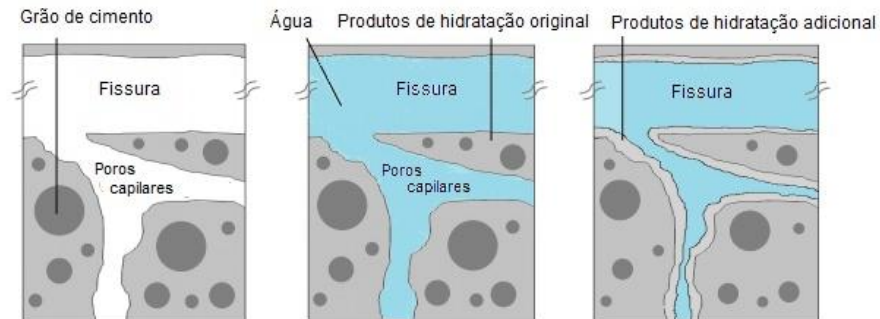
<sup>39</sup>[https://www.jiban.co.jp/docs/tips/kihon/navi/mininavi/mininavi\\_026.pdf](https://www.jiban.co.jp/docs/tips/kihon/navi/mininavi/mininavi_026.pdf), apud SHIN *et al.*, 2015, p. 5

No entanto, para o emprego apropriado desses materiais na autocicatrização de fissuras, deve-se considerar a sua hidratação mais lenta, em relação aos concretos com cimento Portland sem adições. Portanto, seu uso com vistas à autocicatrização de fissuras deve ser restrito a estruturas de concreto com tendência à fissuração em idades mais avançadas. Obras de infraestrutura, ou estruturas expostas à ação de gelo/degelo podem ser adequadas opções para o uso de materiais pozolânicos como agentes da autocicatrização, contribuindo para a manutenção da vida útil do concreto (SEUNG-HYUN NA, 2013, p.16; LI *et al.*, 2013, p.120). Ishikawa (2013, p. 252) conduziu testes em argamassas com adição de cinza volante, deterioradas, e comprovou o efeito benéfico do uso de pozolanas para a ocorrência de *self-healing*, por manterem a reação de hidratação no concreto por mais tempo.

Recentemente, pesquisadores realizaram estudo sobre a migração de água para a matriz do concreto, através da fissura, durante o processo de autocicatrização (HUANG *et al.*, 2015, p. 2). Verificaram que houve um aumento significativo do conteúdo de água na matriz de um concreto, através de análise de ressonância magnética. Constataram, também, que após algumas horas, o teor da água não ligada quimicamente decresceu nas áreas adjacentes às fissuras, indicando que parte da água que ingressou através das fissuras foi utilizada para a hidratação adicional de grãos anidros de cimento, presentes na matriz. Esse resultado trouxe uma nova abordagem sobre autocicatrização de materiais cimentícios, visto que a maioria dos estudos anteriores sempre considerou apenas o preenchimento da fissura, não havendo uma preocupação com a quantificação da densificação da matriz. O resultado dessa pesquisa é bastante interessante, considerando-se que a densificação da pasta de cimento nas adjacências das fissuras também pode contribuir para a redução do ingresso de agentes agressivos, prolongando a vida útil das estruturas de concreto. A Figura 21 apresenta uma representação esquemática que permite observar o processo de autocicatrização com a formação de produtos de hidratação adicional nas áreas adjacentes à fissura, evidenciando a densificação da matriz.



Figura 21: Representação esquemática da hidratação adicional nas áreas adjacentes à fissura



Fonte: Huang *et al.* (2016)

### 2.3.3 Fatores que influenciam a autocicatrização natural do concreto

Muitos fatores exercem influência na habilidade do concreto para restabelecer sua capacidade resistente e estanqueidade, após ser submetido a danos que causem fissuração. Entre esses fatores, destacam-se composição do concreto, relação  $a/c$ , tipo de cimento, teor de agregado. Além disso, o grau do dano e a idade do concreto quando ocorreu a primeira fissura, as condições de umidade relativa para a autocicatrização do concreto, o período e o tipo de cura, entre outros (ZHONG e YAO, 2008, p. 1138). Uma das condições essenciais para que ocorra a autocicatrização do concreto é que exista disponibilidade de grãos de cimento não hidratados, para que possam se re-hidratar e preencher as fissuras com os hidratos formados. Para tanto, outra condição básica é a presença de água para possibilitar a reação de hidratação dos cimentos remanescentes (LI e YANG, 2007 p.163; YANG *et al.*, 2009, p. 382). A aplicação de compressão em cp's pré-fissurados, aproximando as laterais da fissura, também exerce influência, podendo acelerar e potencializar o processo de cicatrização. A largura e a tortuosidade da fissura são fatores que também influenciam o fenômeno de autocicatrização.

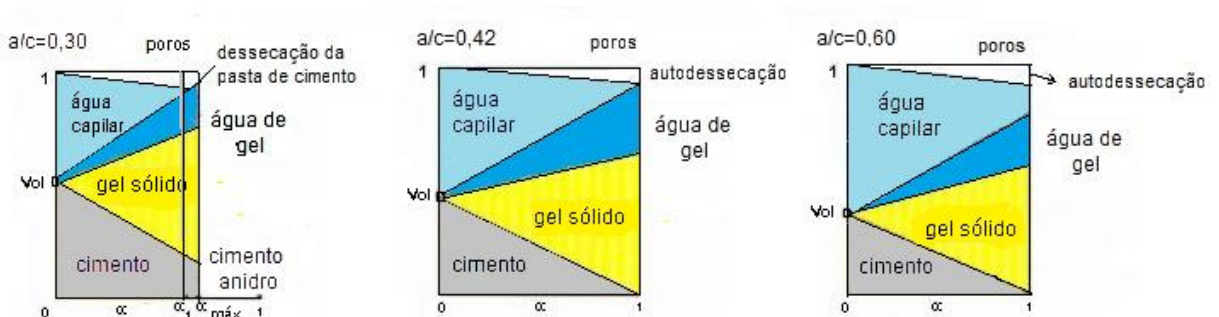
#### 2.3.3.1 Influência da relação $a/c$

Os fatores essenciais para que ocorra a hidratação tardia, ou hidratação continuada, que corresponde ao principal mecanismo da autocicatrização de fissuras em concretos jovens, são a disponibilidade de grãos anidros de cimento e a presença da água. A maior ou menor disponibilidade de grãos de cimento para a re-hidratação e formação dos produtos resistentes que irão preencher as fissuras depende, entre outros fatores, da relação  $a/c$ . Em geral, concretos convencionais são produzidos com relações  $a/c=0,40$  a  $0,55$ . Conforme Shim *et al.* (2015, p. 2) salientam, em concretos com relação  $a/c=0,40$ , na realidade, cerca de 70% do

cimento irá reagir, enquanto os restantes 30% permanecerão anidros na pasta de cimento. Os autores comentam que a quantidade de grãos anidros tende a aumentar para relações  $a/c$  menores e para cimentos mais grossos.

A representação esquemática da Figura 22 mostra que, em um sistema fechado (onde não existe perda nem ganho de água com relação ao meio externo), a hidratação completa não pode ser obtida, a menos que a relação  $a/c$  seja igual ou superior a 0,42 (JENSEN e HANSEN, 2001, p. 649). Portanto, em um sistema nestas condições, a ocorrência de uma fissura expõe partículas de cimento anidro, existentes nas paredes da fissura, ao efeito da umidade. Assim, criam-se condições propícias para que a hidratação ocorra novamente, possibilitando o preenchimento da fissura com os produtos formados. Assumindo-se que o concreto contém, normalmente, mais água do que o necessário para hidratar o cimento, parte da porosidade está sempre presente, para qualquer grau de hidratação (SHIM *et al.*, 2015, p. 1).

Figura 22: Volume ocupado pelo cimento, água e produtos de hidratação, quando o cimento Portland hidrata num sistema fechado



Sendo:  $\alpha$  = grau de hidratação do cimento

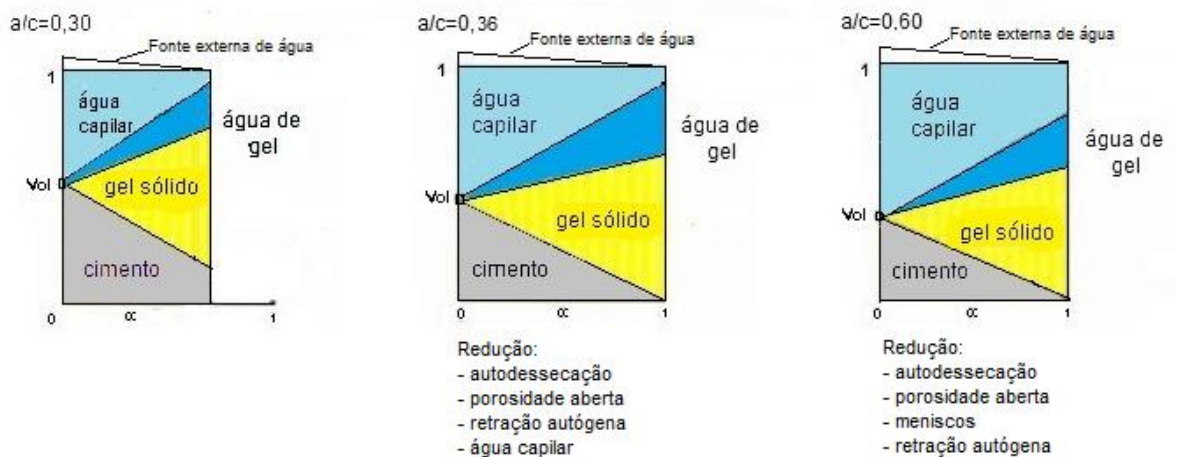
Fonte: Morin *et al.* (2001), *apud* Shim *et al.* (2015, p. 2)

De acordo com Jensen e Hansen (2001, p. 651), se uma fonte externa de água estiver disponível durante a hidratação, é possível obter uma pasta de cimento hidratada sem porosidade (exceto bolhas de ar), quando a relação  $a/c$  for menor ou igual a 0,36. A representação esquemática da Figura 23 mostra que, quando existe uma fonte externa de água durante a hidratação, para concretos com relações  $a/c$  normais e elevadas, ocorre a redução da autodessecação, da retração autógena e da formação de meniscos. Para relação  $a/c=0,36$ , há tendência de redução da porosidade capilar quando existe uma fonte de água externa (SHIM *et al.*, 2015, p. 3). Segundo Shim *et al.* (2015, p. 2), portanto, o controle da porosidade e do

grau de hidratação através da cura são fatores muito importantes para promover a capacidade de autocicatrização dos materiais cimentícios.

Banthia *et al.* (2005, p. 1651) estudaram o efeito das tensões mecânicas na permeabilidade de concretos. De acordo com os pesquisadores, a permeabilidade é influenciada pela porosidade, interconectividade de poros e de microfissuras, especialmente na zona de interface da matriz com o agregado. A permeabilidade aumenta para maiores relações  $a/c$ , principalmente para relações  $a/c$  acima de 0,60 (AHMAD *et al.*, 2005, p.6). A redução do tamanho do agregado diminui a porosidade, para a mesma relação  $a/c$  e mesma idade, aumentando o conteúdo de grãos anidros de cimento em regiões próximas ao agregado (ELSHARIEF *et al.*, 2003, *apud* AHMAD *et al.*, 2012, p. 86).

Figura 23: Volume ocupado pelo cimento, água e produtos de hidratação, quando o cimento Portland estiver exposto a uma fonte externa de água, durante a sua hidratação



Sendo:  $\alpha$  = grau de hidratação do cimento

Fonte: Morin *et al.* (2001), *apud* Shim *et al.* (2015, p. 3)

Além da relação  $a/c$ , da porosidade e interconectividade dos poros, a permeabilidade também é influenciada pela tortuosidade dos canais de poros (AHMAD *et al.*, 2005, p. 6). A tortuosidade decresce quando a relação  $a/c$  aumenta. Para concretos de densidade normal, a permeabilidade parece ser fortemente influenciada pela resistência da matriz, provavelmente devido à recuperação mais lenta das fissuras nesses concretos, em comparação aos concretos

de alta resistência (ALDEA<sup>40</sup> *et al.*, 1999, *apud* AHMAD *et al.*, 2012, p. 86). A permeabilidade pode decrescer cerca de 4 ordens de magnitude devido à hidratação continuada, desde as idades iniciais até que o sistema esteja bem hidratado. A hidratação irá ocorrer enquanto a água estiver disponível, enquanto houver acesso aos grãos anidros de cimento e espaço para a deposição dos produtos da hidratação. A taxa da hidratação será afetada quando houver fissuração, criando um caminho preferencial para a exposição do material anidro (HEARN, 1998, p.566).

### 2.3.3.2 Influência da cura

A umidade relativa exerce grande importância na capacidade de autocicatrização das fissuras, afirmaram ter Heide e Schlangen (2007, p.8). Tais pesquisadores realizaram um estudo para verificar o efeito da autocicatrização de fissuras nas propriedades mecânicas de cp's (4 x 4 x 16) cm, produzidos com dois tipos de cimentos, de diferentes características quanto ao endurecimento (rápido e lento). Os concretos produzidos foram pré-carregados à flexão, realizando-se medições das deformações através de dispositivos do tipo LVDT na face inferior dos cp's (parte central), com o objetivo de medir a abertura das fissuras formadas. Os cp's de prova foram testados na idade de 1 dia até que a abertura das fissuras atingisse 50 µm. Posteriormente, receberam a aplicação de forças de compressão (0,0; 0,5; 1,0 e 2,0 N/mm<sup>2</sup>) através do aparato apresentado através da Figura 24.

Figura 24: Dispositivos utilizados para a aplicação de compressão, no estudo de ter Heide e Schlangen (2007, p.8)



Fonte: ter Heide e Schlangen (2007, p.8)

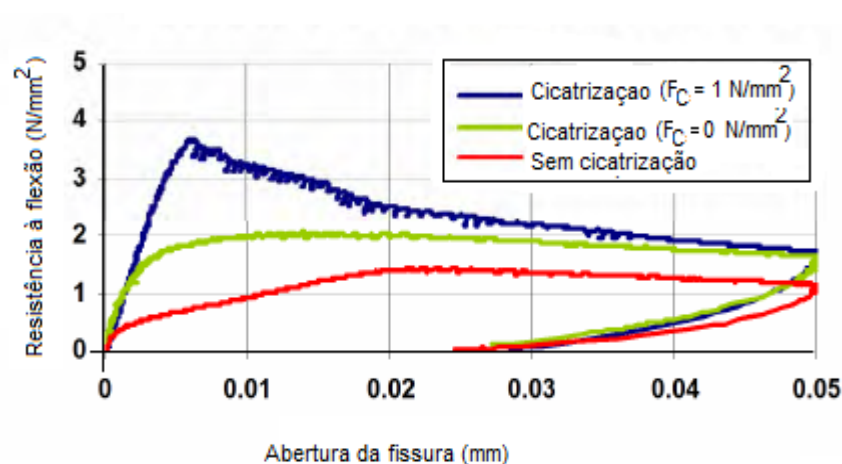
Após aplicação da compressão, os cp's foram então armazenados submersos em água e em câmaras climatizadas com UR% de 95% e 60%, por 25 dias. A Figura 25 apresenta um gráfico comparativo do desempenho dos cp's que receberam a força de compressão de 1

---

<sup>40</sup> Aldea, C. et al. Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* V.11, N.3, 1999, 181-187.

$\text{N/mm}^2$  e depois foram submetidos à cura submersa; dos cp's que não receberam a força de compressão, mas foram submetidos à cura submersa; e daqueles que foram apenas fissurados na idade de 15 dias (referência). Observa-se que a resistência à flexão dos cp's de referência foi menor do que a dos pré-fissurados e curados submersos em água e que, entre estes, os que receberam a aplicação da força de compressão apresentaram o melhor desempenho. Portanto, os resultados da pesquisa indicaram que a aplicação da força de compressão contribuiu para a recuperação da resistência.

Figura 25: Tensão/deformação dos cp's submetidos ou não à força de compressão durante o período de cicatrização, em comparação aos cp's fissurados (na idade de 2 semanas), sem cicatrização.



Fonte: ter Heide e Schlangen, 2007, p.5

Os pesquisadores também verificaram que apenas os cp's armazenados submersos em água apresentaram recuperação total de suas capacidades resistentes. Os demais cp's, armazenados em ambientes com UR% de 60% a 95%, apresentaram quase nenhum aumento de resistência. Os pesquisadores salientaram que, para os concretos armazenados por 3 meses em um ambiente com UR de 95%, praticamente não foi observada autocicatrização das fissuras.

Abdel-Jawad e Haddad (1992, p. 936) também estudaram o efeito do pré-carregamento nas propriedades mecânicas de concretos com relações  $a/c$  0,50 e 0,70. Foram aplicados diferentes níveis de pré-carregamento por compressão axial (60%, 75%, 90% e 100% com relação à carga de ruptura) nos cp's, nas idades de 8, 16, 24 e 72 horas. Foi comparado o desempenho dos concretos pré-carregados com o de concretos de referência, quanto à capacidade de autocicatrização das fissuras e restabelecimento da resistência por compressão, considerando-se duas condições de cura (imersão em água e cura seca, em laboratório). A capacidade de

autocicatrização das fissuras foi verificada através de ensaios de determinação da velocidade da onda ultrassônica. Os pesquisadores constataram que, para níveis de carregamento de até 90% da carga de ruptura, aplicados após a idade de 8 horas, não exerceram influência na resistência à compressão dos concretos. Segundo esses autores, a cura por imersão em água é essencial para o restabelecimento da resistência em cp's submetidos às condições de cicatrização. Realizando novos testes nos concretos, após o período de cura, foi constatado que a completa cicatrização dos concretos não significa restabelecimento total da resistência à compressão.

### 2.3.3.3 Influência do tipo de cimento

As resistências de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento apresentam evoluções diferentes, ao longo do tempo, dependendo do tipo de cimento. Observa-se, conforme Quadro 5, que as maiores diferenças entre a resistência dos concretos com cimento CP V ARI, de endurecimento rápido, e a dos concretos com cimento CP IV, de endurecimento lento, ocorrem nas idades de 3 e 7 dias. Aos 14 dias, no entanto, ambos os concretos apresentam percentuais bastante próximos das respectivas resistências, aos 28 dias.

Quadro 5: Evolução das resistências do concreto.

CP	3	7	14	28
I e II	59,82%	77,88%	85,44%	100%
III e IV	45,80%	68,39%	90,16%	100%
V-ARI	66,30%	81,87%	92,05%	100%

Os pesquisadores ter Heide e Schlangen (2007, p.6) compararam a autocicatrização de concretos produzidos com o cimento Portland, de endurecimento rápido, com o cimento Portland com escória de alto forno, de endurecimento lento. Na idade de 1 dia, como esperado, o concreto produzido com o cimento de endurecimento rápido apresentou resistência muito mais elevada, em relação ao concreto com cimento de escória de alto forno. Na idade de 15 dias, após a autocicatrização, os concretos produzidos com ambos os cimentos apresentaram recuperação da resistência à flexão. Contudo, o concreto com cimento Portland de endurecimento rápido apresentou ganho notável de resistência, provavelmente por apresentar maior quantidade de grãos anidros de cimento. Portanto, na referida pesquisa, o

concreto com cimento Portland de endurecimento rápido apresentou maior potencial para autocicatrização das fissuras.

#### 2.3.3.4 Influência da tensão aplicada

Para a realização das investigações, normalmente são induzidas fissuras em concretos sãos, através de diversos tipos de pré-carregamento. De acordo com Banthia e Bhargava (2007, p.70 ), o tipo de tensão aplicada (compressão, tensão ou flexão), a taxa e o nível de carregamento exercem influência na geração de fissuras no elemento de concreto, bem como no padrão das fissuras geradas. Após a pré-fissuração, os concretos são avaliados sob o ponto de vista do desempenho mecânico e de durabilidade, através da realização de diversos ensaios e análises.

De um modo geral, os resultados das pesquisas mencionadas indicaram que existe um nível de carregamento limite, a partir do qual os efeitos gerados exercem influência significativa nas propriedades investigadas. Com relação à permeabilidade, quando o concreto é submetido à compressão, existe uma constrição inicial da rede de poros e das microfissuras. Assim, a permeabilidade do concreto permanece constante ou, até mesmo, apresenta uma pequena redução. A partir de um valor limite, a permeabilidade aumenta devido à coalescência das fissuras (HOSEINI *et al.*, 2009, p.216). Na literatura encontram-se diferenças na determinação deste valor limite, dependendo dos parâmetros adotados em cada pesquisa. Concretos submetidos a um carregamento à compressão entre 30% e 40% da carga última de ruptura apresentaram pequeno aumento na permeabilidade de concretos a íons cloreto (KERMANI, 1991, *apud* HOSEINI *et al.*, 2009, p. 214; SAMAHA e HOVER, 1992, *apud* HOSEINI *et al.*, 2009, p. 214; LIM *et al.*, 2000, p.359; BANTHIA e BHARGAVA, 2006, p. 28). Estudos da permeabilidade ao gás N<sub>2</sub> indicaram que carregamentos de 50% a 60% da carga última à compressão acarretaram uma queda de até 20% na permeabilidade do concreto e que somente a partir de 80% da tensão última de ruptura à compressão ocorreu aumento considerável da permeabilidade do concreto ao gás, antes da ruptura (SAMAHA e HOVER, 1992, *apud* HOSEINI *et al.*, 2009, p. 214; SUGIYAMA *et al.*, 1996, *apud* HOSEINI *et al.*, 2009, p. 214; CHOINSKA, *et al.*, 2007, p. 87; HOSEINI *et al.*, 2009, p. 219). Assim, tanto para água, como para o gás nitrogênio, fica evidente que, no concreto sob compressão, as redes pré-existentes de poros e microfissuras são inicialmente comprimidas. Então, a permeabilidade cai até um determinado nível de carga, que corresponde ao nível de coalescência das microfissuras, a partir do qual a permeabilidade começa a aumentar (HOSEINI *et al.*, 2009, p.217).

Outras pesquisas, desenvolvidas com foco na durabilidade, investigaram o efeito de diferentes níveis de carregamento em concretos, medindo sua permeabilidade à água (KERMANI, 1991, *apud* HOSEINI *et al.*, 2009, p. 214; BANTHIA *et al.*, 2005, p. 1653; BHARGAVA e BANTHIA, 2006, p. 28; BHARGAVA e BANTHIA, 2008, p.364), aos íons cloreto (SAMAHA e HOVER, 1992, *apud* HOSEINI *et al.*, 2009, p. 214, VENQUIARUTO, 2016, em desenvolvimento) e ao gás N<sub>2</sub> (SUGIYAMA<sup>41</sup> *et al.*, *apud* HOSEINI *et al.*, 2009, p. 214).

#### 2.3.3.5 Influência da largura da fissura

Os estudos realizados por Yang *et al.* (2009; 389) e Reinhardt e Jooss (2003, p. 981), entre outros, destacaram a importância do controle da largura da fissura, como uma forma de favorecer a autocicatrização em materiais cimentícios. Aldea *et al.* (1999, p. 181) estudaram o efeito da fissuração na permeabilidade do concreto, verificando que essa propriedade aumentou com o aumento da largura da fissura. Os resultados do estudo demonstraram que a permeabilidade à água foi significativamente mais sensível à largura das fissuras, do que a permeabilidade aos íons cloreto. Foi constatado, também, que a permeabilidade medida sob tensão foi menor do que a permeabilidade medida depois da remoção da carga. Similarmente, os autores verificaram que existe um limite de largura da fissura (ou deslocamento da abertura da fissura) no concreto, situado na faixa entre 50-100 µm. Até este limite, não houve muita variação na permeabilidade, mas além desta faixa, aumentou rapidamente. Contudo, parece que a taxa de fluxo alcançou um valor constante quando a amostra se aproximou da ruptura. A permeabilidade não se mostrou dependente da extensão da fissura. Portanto, essa propriedade pode ser caracterizada inteiramente por um único fator: deslocamento da abertura da fissura.

Os valores de permeabilidade decrescem significativamente com o tempo, devido às interações entre a água e a matriz de cimento, ou seja, devido à dissolução/precipitação de hidratos e à migração de elementos finos, resultando na autocicatrização autógena das fissuras (HEARN e MORLEY<sup>42</sup>, 1997, *apud* PINCADET *et al.* 2009, p.537). A permeabilidade deve ser considerada como um parâmetro intrínseco para avaliar o efeito global da fissuração induzida por carga na durabilidade ou desempenho do concreto (PINCADET *et al.* 2009, p. 546). Os resultados obtidos por Pincadet *et al.* (2009, p. 546) sugerem que a permeabilidade aumenta proporcionalmente com o cubo do deslocamento da abertura da fissura. Em

---

<sup>41</sup> SUGIYAMA, T. et al. Effect of stress on gas permeability in concrete. *ACI Mater J.* 1998, V93 (5), 443-450.

<sup>42</sup> N. Hearn, C.T. Morley, Self-sealing property of concrete — experimental evidence, *Materials and Structures* 30 (1997) 404-411



concretos de alto desempenho, as fissuras induzidas por carga devem ser mais suaves do que as fissuras de tração, em concretos convencionais.

Djerbi et al. (2008, p. 880) pré-fissuraram amostras de concreto com diferentes níveis de desempenho, utilizando materiais de variadas composições e propriedades, a fim de avaliarem a relação do coeficiente de difusão de cloretos através de fissuras. Para tanto, foram induzidas fissuras transversais, através de testes controlados de tração por compressão diametral (*splitting test*). O período de cura dos concretos foi de três meses. Nos concretos com desempenho normal (relação  $a/c=0,50$ , maior porosidade), a largura média das fissuras pareceu ser levemente maior do que a dos concretos de alto desempenho (relações  $a/c= 0,32$  e  $a/c=0,38$ , com 6% de sílica ativa). Quanto à morfologia, a análise microscópica indicou que as fissuras geradas nos concretos convencionais apresentaram maior tortuosidade do que as dos concretos de alto desempenho. A rugosidade da fissura pode aumentar o contato superficial entre a água e a matriz cimentícia, acelerando a cinética da autocicatrização, em consequência. Mesmo que as relações  $a/c$  sejam mais baixas em concretos de alto desempenho, o maior conteúdo de componentes potencialmente não hidratados não equilibra o efeito de uma tortuosidade mais baixa. Um exemplo disso é que a relação entre a permeabilidade da água e a do gás é maior para concretos de alto desempenho do que em concretos convencionais, os quais apresentam maior tortuosidade (PINCADET *et al.* 2009, p. 546). As fissuras devem estar conectadas para influenciar a migração de água e cloretos. A geometria das fissuras, em particular a largura e a tortuosidade, impactam significativamente a permeabilidade do concreto (BREYSSE e GERARD, 1997<sup>43</sup>; GERARD *et al.*<sup>44</sup>, 1996, *apud* HOSEINI *et al.*, 2009, p.217). Para larguras de fissuras maiores do que 1 mm, a permeabilidade do concreto é proporcional ao cubo da largura da fissura (GERARD *et al.*, 1996, *apud* HOSEINI *et al.*, 2009, p.217). Portanto, uma amostra com várias fissuras menores será menos permeável do que uma amostra com uma única fissura larga (RAPOPORT *et al.*, 2002; RAPOPORT *et al.*, 2001; CLEAR<sup>45</sup>, 1985, *apud* HOSEINI *et al.*, 2009, p.217).

---

<sup>43</sup> Breysse D, Gerard B. *Transport of fluids in cracked concrete*. In: Reinhardt HW, editor. RILEM report no. 16: penetration and permeability of concrete. E&FN Spon; 1997. p. 123–54

<sup>44</sup> Gerard B, et al. Cracking and permeability of concrete under tension. *RILEM Mater Struct* 1996;29(3):141–51

<sup>45</sup> Clear CA. The effect of autogenous healing upon leakage of water through cracks in concrete. *Cement and Concrete Association*. Technical report #559; 1985. 28 p

Pesquisadores verificaram não haver efeito significativo do comprimento das fissuras na permeabilidade (SAMAHA e HOVER, 1992; ALDEA<sup>46</sup> et al., 2000; *apud* HOSEINI et al., 2009, p.218).

#### 2.3.3.6 Influência da idade do carregamento

Heide e Schlangen (2007, p.7) observaram claramente que existe um decréscimo da recuperação da resistência de concretos pré-fissurados em idades maiores, com relação aos pré-fissurados em idades menores.

Na pesquisa desenvolvida por Abdel-Jawad e Haddad (1992, p.928), mencionada no item 2.3.3.2, os resultados obtidos demonstraram que carregamentos de até 90% da carga de ruptura por compressão, realizados além de 8 horas após o lançamento, não afetaram o desenvolvimento da resistência dos concretos estudados, para ambas as relações *a/c*, quando foi realizada a cura em água. No entanto, carregamentos realizados na idade de 8 horas, resultaram em perda de 5 a 12 % da resistência à compressão. Em amostras bastante danificadas, quando o carregamento ocorreu na idade de 24 horas, houve mínima perda de resistência para os concretos com ambas as relações *a/c* havendo, inclusive, maior recuperação para a relação *a/c*=0,70. Como já mencionado, de acordo com Abdel-Jawad e Haddad (1992, p.936), a cura úmida foi essencial para a recuperação de concretos submetidos a carregamento precoce, favorecendo a cicatrização através do preenchimento das fissuras. Salientam, no entanto, que o preenchimento das fissuras nem sempre significa que ocorrerá a recuperação completa da resistência.

## 2.4 VARIAÇÕES DE VOLUME NAS PRIMEIRAS IDADES DO CONCRETO

Desde as primeiras idades, o concreto está sujeito a variações volumétricas que podem estar associadas a variações de temperatura e umidade, a efeitos químicos ou, ainda, à atuação de carregamento externo. Algumas destas deformações podem ocorrer nas primeiras 24 horas, iniciando a partir do lançamento, outras se manifestam após o endurecimento. As mudanças iniciais de volume podem influenciar as variações que ocorrem no concreto endurecido,

---

<sup>46</sup> Aldea C-M, Ghandehari M, Shah SP, Karr A. Estimation of water flow through cracked concrete under load. *ACI Mater J* 2000;97(5):567-75.

inclusive no que se refere à formação de fissuras, principalmente para misturas com baixas relações a/c (IDIART, 2009, p. 44).

O concreto fresco corresponde a um reticulado plástico de partículas em água (NEVILLE, 1997, p. 24). Neste período, instabilidades dimensionais podem ocorrer devido à retração plástica e assentamento plástico do concreto, além de contrações volumétricas associadas à hidratação do cimento, como a retração química e retração autógena. Verificam-se, ainda, expansões, quando a hidratação de pastas ocorre em condições de saturação.

### 2.4.1 Expansão

Quando a hidratação de uma pasta ocorre em condições saturadas, é observada uma expansão macroscópica de curto prazo, proveniente da absorção de água pelo gel de cimento. Segundo Powers<sup>47</sup> (1959, *apud* NEVILLE, 1997, p. 355), esse fenômeno ocorre porque as moléculas de água se opõem às forças de coesão, afastando as partículas de gel umas das outras, causando a expansão. As condições de saturação da pasta impedem o desenvolvimento da pressão capilar (POWERS<sup>48</sup>, 1935, *apud* HAOUAS, 2007, p. 16).

A expansão do concreto é da ordem de  $100 \times 10^{-6}$  a  $150 \times 10^{-6}$  quando produzido com um teor de cimento de  $300 \text{ kg/m}^3$ , sendo esse valor atingido de seis a doze meses após a mistura. A expansão é acompanhada de um acréscimo de massa da ordem 1%, sendo portanto esse valor bem maior do que acréscimo de volume, pois a água passa a ocupar o espaço disponível na pasta, em função da redução de volume devido à hidratação do sistema *cimento mais água* (NEVILLE, 1997, p. 356).

### 2.4.2 Retração

Os termos retração, deformação e variação dimensional muitas vezes são utilizados indistintamente. A retração é o fenômeno inerente aos compósitos de cimento, acompanhado de uma contração volumétrica associada à perda de água da pasta de cimento hidratada. Deformação é a expressão da medida da variação dimensional relacionada à retração, podendo ser expressa em mm/mm, por exemplo, quando medida linearmente (BASTOS, 2001, p.8). O termo deformação também é utilizado para expressar aumento de volume

---

<sup>47</sup>POWERS, T. C. Causes and control of volume changes. *J. Portland Cement Assoc. Research and Development Laboratories 1*, N.1, p: 29-39, Jan. 1959

<sup>48</sup>POWERS, T. C. Absorption of water by Portland cement paste during the hardening process. *Industrial and engineering chemistry*, 27(7): 790-794, 1935.

(fenômeno da expansão), que também normalmente é medido através da variação linear, assim como a retração.

Wittmann (2004, p.3) destaca, entre os principais mecanismos de retração, (i) a retração química que ocorre devido à dissolução do cimento, durante as reações de hidratação; (ii) a retração capilar, ou retração plástica; (iii) a retração química tardia, causada por reações de hidratação ou carbonatação; (iv) as retrações autógena e por secagem, que correspondem a variações volumétricas como função da redução de água, sendo a autógena, devido à hidratação do cimento e à secagem; respectivamente.

A retração química (ver Figura 15), como se sabe, corresponde à redução de volume que ocorre durante a hidratação, pois o volume dos hidratos formados é menor do que a soma dos volumes ocupados pelos reagentes (cimento e água) e foi inicialmente observada por Le Chatelier (BENTZ e JENSEN, 2004, p.677).

A retração plástica é causada pela perda de umidade do concreto fresco para o ambiente (GRIBNIAK *et al.*, 2008). Em condições seladas, ocorre a autodessecação da pasta de cimento, originando poros vazios na sua estrutura (BENTZ e JENSEN, 2004, p.677). A retração plástica ocorre quando a taxa de evaporação da água excede a taxa de exsudação, nos estágios iniciais das reações de hidratação e da formação da microestrutura (IDIART, 2009, p.44). Quando a água é removida do concreto fresco, formam-se meniscos que geram pressões capilares negativas, causando uma contração volumétrica (CLARK, 2009, p. 7). Tais pressões capilares podem causar contrações de volume elevadas, principalmente quando a relação a/c está situada entre 0,50 e 0,60, conforme Wittmann (1976, p.49).

Nas idades mais avançadas, podem ocorrer deformações causadas por variações térmicas, por fluência, retração por secagem e retração por carbonatação, devido à difusão do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para o interior dos poros capilares, reagindo com o hidróxido de cálcio para formar carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). A permeabilidade do concreto ao ar influencia o grau da retração por carbonatação (CLARK, 2009, p.8).

Com relação aos efeitos observados devido aos fenômenos supracitados, Wittmann (2004, p.69) mencionou que a retração química é observada como um movimento descendente da superfície do concreto fresco e, normalmente, não provoca fissuração, a menos quando existem obstáculos, como por exemplo devido à presença de armaduras. Já a retração plástica pode causar fissuração intensa, especialmente em grandes superfícies expostas, como lajes, a menos que sejam adotadas medidas para evitar a evaporação, como aspersão de água, entre

outras. A carbonatação pode causar a incidência de fissuras ou, ainda, agravar a fissuração pré-existente.

A retração térmica também pode causar deformações importantes nas idades iniciais. Está relacionada ao decréscimo de temperatura que ocorre depois do calor de hidratação ser dissipado (CLARK, 2009, p.9).

Com relação às causas das deformações do concreto, Benz e Jensen (2004, p.678) propõem a classificação em fenômenos não-autógenos e autógenos. Os fenômenos não-autógenos causam as deformações térmicas, por carbonatação ou, ainda, por carregamento externo. A dissolução de sais, como a etringita, e a autodessecação originam variações na umidade relativa interna do concreto, causando deformações autógenas, às quais correspondem a expansão e a contração, respectivamente.

Portanto, em condições seladas, durante a hidratação há o consumo da água presente nos poros capilares, ocorrendo a autodessecação. Essa redução do volume da água promove o desenvolvimento de pressões negativas e formação de tensões de tração na solução do poro, (BENZ e JENSEN, 2004, p. 678). Nas primeiras idades, quando a resistência do concreto é mínima, podem haver deformações por retração autógena, sendo mais importantes para concretos de alto desempenho, devido ao emprego de menores relações a/c (CLARK, 2009, p. 10). Basicamente, devem ser adotadas medidas de mitigação das deformações através da redução da retração autógena ou do aumento da capacidade resistente do concreto (BENZ e JENSEN, 2004, p. 679).

Nesta tese será abordada apenas a retração por secagem, que inicia a partir das primeiras idades, continuando a ocorrer em idades mais avançadas.

### 3 RETRAÇÃO POR SECAGEM

A retração por secagem, ou retração hidráulica, é um fenômeno inerente aos compósitos do cimento que corresponde a uma contração volumétrica causada pela saída da água da pasta de cimento hidratada, causando deformações por secagem sem a influência da ação do carregamento. A migração de umidade ocorre quando o concreto é exposto a um ambiente com umidade relativa mais baixa do que a umidade inicial existente no seu próprio sistema de poros. Como se sabe, para garantir trabalhabilidade, a quantidade de água adicionada à mistura normalmente é bem maior do que a estritamente necessária para a hidratação do concreto. Portanto, parte da água adicionada à mistura não será quimicamente ligada à parte sólida da pasta. Após a cura, o concreto é exposto à UR% do ambiente, que é mais baixa do que a sua umidade interna. Assim, cria-se um gradiente de umidade que atua como uma força motriz para que a água excedente migre para o meio, ocorrendo uma redução do volume dos poros do concreto devido à secagem (IDIART, 2009, p.43).

A retração por secagem pode ser estudada em um nível macroestrutural, com foco nos fatores que influenciam o fenômeno. Pode, também, ser entendida através dos níveis meso e microestrutural, abordando-se os mecanismos associados à perda de água e à transferência de massa, que explicam como ocorre a movimentação de água nos microporos, conforme propõe Tanesi<sup>49</sup> (1999, *apud* NUNES e FIGUEIREDO, 2007, p.12).

#### 3.1 FATORES QUE INFLUENCIAM A RETRAÇÃO POR SECAGEM

A retração por secagem é influenciada por vários *fatores externos e internos*, que podem atuar de forma concomitante. Entre os *fatores externos* que afetam a retração do concreto destacam-se as condições ambientais, como temperatura e UR% do ar, bem como velocidade do vento,

---

<sup>49</sup>TANESI, J. *A Influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração*. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 132 p.

os quais têm influência direta na taxa de evaporação e na perda de umidade da superfície do concreto. De forma geral, o aumento da temperatura, redução da umidade relativa do ar e aumento da velocidade do vento no entorno do elemento de concreto tendem a aumentar a retração por secagem. Além disso, a retração tende a ser maior se o concreto estiver exposto a essas condições desfavoráveis por um período prolongado de tempo.

Outros fatores que afetam a retração por secagem são o tamanho e a forma do elemento de concreto. Assim, para um mesmo período de exposição e mesmas condições ambientais, a secagem de elementos mais espessos de concreto tende a ser menor do que a de pequenos elementos, nos quais as camadas internas secam mais rapidamente, por apresentarem menor seção transversal. Além do tamanho, a geometria do elemento de concreto também é um fator importante. Membros estruturais que possuem maior relação superfície/volume, como as lajes, tendem a perder umidade mais rapidamente.

Muitos códigos e normas representam o efeito da geometria do membro de concreto na retração por secagem em função da *espessura teórica*, ou *espessura hipotética*, que é definida como o dobro da seção transversal do membro, dividido pelo perímetro exposto da seção transversal. Uma elevada espessura teórica é associada a uma baixa retração por secagem (CCAA<sup>50</sup>, 2002, p.3)

Os principais fatores internos que afetam a retração por secagem são relacionados ao concreto e a seus constituintes, como cimento, agregados, adições, proporcionamento da mistura, relação a/c e teor de água, e também o teor do agregado e propriedades, as quais variam em função dos diferentes tipos litológicos. Além dos constituintes do concreto, fatores relacionados com as práticas construtivas adotadas durante as etapas de confecção do concreto, como lançamento, compactação e cura também exercem influência na retração.

Todos estes fatores podem afetar a magnitude das tensões geradas durante a secagem e, assim, nas deformações causadas pela retração do concreto. Conforme a *Cement Concrete & Aggregates Australia* (CCAA)<sup>51</sup>, organização mantida por empresas ligadas à produção de cimento, concreto e agregados na Austrália, o conhecimento destes fatores subsidia os

---

<sup>50</sup>The Online Resource for Cement Concrete & Aggregates. Drying Shrinkage of Cement and Concrete, July, 2002, p. 1-6.

Disponível em: [https://www.ccaa.com.au/concrete\\_structures/residential\\_documents.php?id=105&page=1](https://www.ccaa.com.au/concrete_structures/residential_documents.php?id=105&page=1). Acesso em 27/07/2014

<sup>51</sup>The Online Resource for Cement Concrete & Aggregates. Drying Shrinkage of Cement and Concrete, July, 2002, p. 1-6.

Disponível em: [https://www.ccaa.com.au/concrete\\_structures/residential\\_documents.php?id=105&page=1](https://www.ccaa.com.au/concrete_structures/residential_documents.php?id=105&page=1). Acesso em 27/07/2014

projetistas na estimativa dos prováveis movimentos da estrutura por retração, de forma que sejam adotadas medidas adequadas no projeto, considerando tais deformações. Do mesmo modo, a atenção dos tecnologistas para estes fatores, em todas as etapas de produção do concreto, desde a dosagem, confecção, até a etapa de cura, tende a reduzir as deformações geradas e a incidência de fissuras por retração. A representação esquemática da Figura 26 mostra os principais fatores internos e externos intervenientes na retração por secagem, conforme origem.

Figura 26: Principais fatores que influenciam a retração por secagem do concreto



Fonte: Adaptado de CCAA (2002<sup>52</sup>, p. 2)

Pode-se observar, através da Figura 26, que as deformações associadas à retração por secagem são influenciadas por inúmeros fatores, que podem atuar simultaneamente e de forma interrelacionada. Cabe salientar que alguns importantes fatores, tais como temperatura, UR% do ar, vento, tamanho e forma do elemento estrutural, tipo de agregado, uso de adições, não foram avaliados na presente tese, portanto, não são discutidos nesta revisão de literatura. Através do programa experimental desta pesquisa, buscou-se identificar a influência do *tipo*

<sup>52</sup>The Online Resource for Cement Concrete & Aggregates. Drying Shrinkage of Cement and Concrete, July, 2002, p.1-6.

Disponível em: [https://www.ccaa.com.au/concrete\\_structures/residential\\_documents.php?id=105&page=1](https://www.ccaa.com.au/concrete_structures/residential_documents.php?id=105&page=1). Acesso em 27/07/2014



de cimento, da relação a/c, da idade de cura e, conseqüentemente, do tempo de secagem na retração por secagem dos concretos estudados, com relação aos *percentuais de pré-carregamento* aplicados e *idades de pré-carregamento*. Portanto, apenas estes fatores de interesse serão abordados nos itens seguintes.

### 3.1.1 Tipo de cimento

As variações de finura e composição do cimento Portland afetam a taxa de hidratação, dentro de limites, mas não afetam o volume e as características dos hidratos. Assim, observa-se que algumas mudanças na composição e finura de cimentos, que tendem a influenciar o comportamento frente à retração por secagem de cp's de pastas de cimento ou argamassa, de pequenas dimensões, não exercem influência importante no concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 99). Portanto, de acordo com Swayze<sup>53</sup>, citado por Neville (1997, p. 362), para um determinado cimento, a maior retração de uma pasta pura não corresponde à maior retração do concreto.

Segundo Swayze<sup>54</sup>, Bennett e Loat<sup>55</sup>, citados por Neville (1997, p. 362), o cimento fino não provoca aumento da retração do concreto produzido com agregados normais, embora aumente a retração de pastas puras. No entanto, de acordo como modelo desenvolvido pelo CEB-FIP *Model Code 1990*<sup>56</sup> (1990, COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990, p. 71) para a previsão da retração por secagem do concreto ao longo do tempo, foi identificado que a retração é maior para concretos com cimentos de alta resistência inicial, de maior finura, em comparação a concretos com cimentos de endurecimento lento, mesmo para concretos de mesma resistência à compressão aos 28 dias. No modelo desenvolvido pelo CEB-FIP *Model Code 1990*<sup>57</sup> (COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990, p. 68), ambos os efeitos de resistência do concreto e tipo de cimento foram levados em consideração. Quanto à retração final (residual), o efeito do tipo de cimento no concreto indicou pouca diferença entre a retração de concretos confeccionados com cimentos Portland de endurecimentos normal e

---

<sup>53</sup>SWAYZE, M. A. *Volumes changes of concretes*, Proceedings: 4th Int. Symp. On the chemistry of cement, Washington D.C., 1970, p.700-702

<sup>54</sup>SWAYZE, M. A. *Volumes changes of concretes*, Proceedings: 4th Int. Symp. On the chemistry of cement, Washington D.C., 1970, p.700-702

<sup>55</sup>BENNETT, E.W. e Loat, D.R. Shrinkage and creep of concrete as affected by the fineness of Portland cement. *Mag. Concr. Res.*, V.22, N.71, 1970, p:69-78

<sup>56</sup>CEB. *Evaluation of the time dependent behavior of concrete*, Bulletin d'Information, 1990,201 p.

<sup>57</sup>CEB. *Evaluation of the time dependent behavior of concrete*, Bulletin d'Information, 1990,201 p.

lento. Já para os concretos com cimentos de rápido endurecimento, as tensões por retração foram maiores. Tazawa e Miyazawa<sup>58</sup> (1997, *apud* MOKAREM, 2002, p.10), concluíram que a composição do cimento tem uma influência maior na retração autógena de concretos, do que na retração por secagem.

Segundo Roper<sup>59</sup> (1974, *apud* CCAA, 2002, p. 3), a influência do C<sub>3</sub>A e do teor de álcalis na retração dependem do teor de gesso do cimento. A retração de cimentos com o mesmo teor de C<sub>3</sub>A varia para diferentes teores de gesso (PICKETT<sup>60</sup>, 1974, *apud* CCAA, 2002, p. 3). Em função disso, por vários anos na Austrália a composição química do cimento foi considerada no controle da retração dos concretos utilizados em pontes e pavimentos, buscando-se limitar o conteúdo máximo de C<sub>3</sub>A em 7%, e mínimo de SO<sub>3</sub> em 1,8%. Contudo, sabe-se que outros cimentos que não atendiam a essas especificações apresentavam bom desempenho frente à retração. Neste sentido, um cimento de composição química especificada para possibilitar um bom desempenho frente à retração foi desenvolvido na Austrália, denominado SL – *Shrinkage Limited Cement*. Deve ser salientado, no entanto, que o uso deste tipo de cimento não garante, por si só, um bom desempenho, já que existem outros fatores que influenciam a retração, e que devem ser considerados (CCAA, 2002, p. 3).

Em geral, o uso de adições minerais, como sílica ativa e cinza volante aumenta a demanda de água requerida no concreto, aumentando, assim, a retração. Para Mehta e Monteiro (2014, p. 105), as pozolanas tendem a aumentar o volume de poros finos nos produtos da hidratação e, como a retração está associada à saída da água de poros pequenos, na faixa de 3 a 20 nm, os concretos capazes de refinar os poros normalmente apresentam maior retração por secagem. Conforme Mokarem (2002, p.10), o aumento da retração do concreto, causado pelo uso de adições minerais, nem sempre ocorre. Tazawa e Yonekura<sup>61</sup> (1991, *apud* MOKAREM, 2002, p.11) comparam o desempenho frente à retração de concretos com e sem sílica ativa. Os concretos com sílica ativa apresentaram menores deformações por retração.

---

<sup>58</sup>TAZAWA, E. e MIYAZAWA, S. Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials, *Magazine of Concrete Research*, V.49, N.178, 1997, pp: 15-22

<sup>59</sup>ROPER, H. Shrinkage Tensile Creep and Cracking Tendency of Concretes. *Australian Road Research*, V. 5, N. 6, December 1974, pp 26–35.

<sup>60</sup>PICKETT, G. *Effect of Gypsum Content and Other Factors on Shrinkage of Concrete Prisms* Proceedings, American Concrete Institute, V.. 44, October 1974, pp 149–175.

<sup>61</sup>TAZAWA, E. e YONEKURA, A. *Drying shrinkage and creep of concrete with condensed silica fume* Publication SP ACI, 1991.

A fim de verificar a influência da adição de escória ao cimento na retração do concreto, a *SCA- Slag Cement Association*, associação que representa empresas produtoras de cimento de escória nos Estados Unidos, promoveu a realização de um estudo sobre retração de concretos produzidos com cimentos de escória, a partir da revisão crítica de 32 publicações científicas sobre o assunto. A partir dos resultados dos ensaios disponíveis nestas pesquisas, o desempenho de 62 misturas de concretos produzidos com cimento de escória, ou com adição de escória à mistura, foi comparado ao de concretos produzidos sem escória (SCA, 2013<sup>62</sup>). O estudo promovido pela SCA concluiu que para concretos não restringidos, a retração por secagem dos concretos com cimento de escória foi um pouco superior em relação aos concretos sem escória. Este acréscimo foi de 2,9%, considerado insignificante.

### 3.1.2 Relação água/cimento

A relação a/c, a quantidade de água e o teor de cimento são três fatores inter-relacionados, uma vez que, fixando-se dois deles, o terceiro pode ser facilmente determinado. Aumentando-se a quantidade de água, maior será a quantidade de água evaporável e, assim, maior será o potencial do concreto para sofrer tensões de retração. Quanto maior o teor de cimento, maior será a fração da pasta de cimento e, assim, maior será o potencial para a retração do material (IDIART, 2009, p.50). Portanto, a influência dos consumos de cimento e de água na retração por secagem não é direta, contudo promove um aumento no volume da pasta de cimento, o que significa um decréscimo na fração do agregado, que tem o papel de restringir a retração (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 99).

A relação a/c é com frequência utilizada como uma medida indireta da qualidade e da durabilidade do concreto, tendo em vista que está diretamente relacionada à porosidade da matriz. Quanto maior a relação a/c, menor é a resistência do concreto e, portanto, maior a retração por secagem, em função do decréscimo de resistência e do módulo de deformação. Salienta-se que esta análise nem sempre funciona para a fluência do concreto (NEVILLE, 1997, p. 362; MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 100, IDIART, 2009, p. 51).

Um concreto com trabalhabilidade menor e maior teor de agregado apresenta retração menor, em comparação a outro concreto com trabalhabilidade maior, confeccionado com agregado de

---

<sup>62</sup>SCA Effect of slag cement on shrinkage in concrete. *Slag Cement in Construction*, N. 27. Disponível em: <http://www.slagcement.org/Publications/pdf/no27%20Effect%20of%20Slag%20Cement%20on%20Shrinkage%20in%20Concrete.pdf> Acesso em 25/07/2014

mesmo tamanho e com a mesma resistência (POWERS<sup>63</sup>, 1959, *apud* NEVILLE, 1997, p. 360). Quanto ao efeito da trabalhabilidade, conforme publicado no Boletim Informativo do CEB-FIP *Model Code* 1990<sup>64</sup>, a consistência do concreto fresco, por si só, não exerce influência sobre a retração, contudo pode ser uma medida do efeito combinado do conteúdo de cimento e da relação água/cimento na retração. Portanto, concretos estruturais que apresentem abatimentos menores, tendem a apresentar menor retração do que concretos com elevados abatimentos, desconsiderando-se o efeito do uso de aditivos redutores de água (COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990, p. 142).

### 3.1.3 Tempo de cura

A cura exerce um efeito benéfico, reduzindo a retração para períodos superiores a duas semanas. Contudo, este efeito também depende do tamanho do elemento de concreto que está sendo avaliado frente à retração por secagem (COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990, p. 70).

Segundo Powers<sup>65</sup> (1959, *apud* NEVILLE, 1997, p. 364), o efeito da cura prolongada sobre a magnitude das tensões geradas pela retração é pequeno e bastante complexo. Por um lado, com a cura prolongada, uma maior quantidade de cimento pode hidratar, reduzindo o volume de grãos anidros de cimento, que restringiriam a retração. Paralelamente, a pasta torna-se mais resistente com o tempo, podendo resistir a maiores tensões devidas à retração, sem fissurar.

A cura deve ser iniciada tão logo inicie a hidratação, contudo, para Benz e Garboczi<sup>66</sup> (1991, *apud* BENZ e JENSEN, 2004, p.682), o grau de hidratação necessário para que a percolação da porosidade capilar seja atingida diminui, na medida que a relação a/c diminui. Isso significa que, para concretos de alto desempenho, com baixas relações a/c, existe um ponto a partir do qual a percolação é atingida, praticamente eliminando o ingresso de água externa proveniente da cura. No entanto, mesmo assim a cura externa pode resultar em melhorias significativas, tanto para as propriedades mecânicas como de transporte do concreto.

---

<sup>63</sup>POWERS, T. C. Causes and control of volume changes. *J. of Portland Cem. Assoc. Research and Development Laboratories*, V. 1, N. 1, 1959, p: 29-39.

<sup>64</sup>CEB. *Evaluation of the time dependent behavior of concrete*, Bulletin d'Information, 1990, 201 p.

<sup>65</sup>POWERS, T. C. Causes and control of volume changes. *J. of Portland Cem. Assoc. Research and Development Laboratories*, V. 1, N. 1, 1959, p: 29-39.

<sup>66</sup>BENZ, D.P. GARBOCZI, E.J. Percolation of phases in a three dimensional cement paste microstructural model. *Cement and Concrete Research*, 21 (2), 1991, pp: 325-344.

Outro aspecto benéfico da cura é que, na medida que a hidratação ocorre, a permeabilidade do concreto é reduzida, razão pela qual, o movimento da água fica bastante limitado nas camadas superficiais, consideradas mais críticas para a durabilidade (BENZ e JENSEN, 2004, p.682).

### 3.1.4 Tempo de secagem

A retração pode se manifestar por longos períodos de tempo, como verificado por Troxel et al.<sup>67</sup> (1958, *apud* NEVILLE, 1997, p. 364, MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 101) que, mesmo após 28 anos, constataram deformações devidas à retração para uma ampla faixa de dosagens de concreto, utilizando diferentes tipos de agregados, condições ambientais e de carregamento. Tais pesquisadores verificaram que a retração total dos 20 anos de observações ocorreu:

- 20 a 25%, em duas semanas;
- 50 a 60%, em 3 meses;
- 75 a 80%, em um ano.

Nesse estudo, foram observadas deformações até depois de 28 anos, mas parte dessa retração a longo prazo pode ter sido devida à carbonatação (TROXEL<sup>68</sup> *et al.*, *apud* NEVILLE, 1997, p. 364).

A retração do concreto é um processo de difusão e a previsão de modelos do fenômeno, até determinado ponto, baseia-se na teoria de difusão, particularmente com relação ao desenvolvimento da retração ao longo do tempo, como a consideração do efeito do tamanho do elemento de concreto (COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990, p. 62). A difusão da água adsorvida e da água mantida por tensão capilar nos pequenos poros da pasta endurecida (menores que 50 nm) para os grandes vazios capilares internos ao sistema, ou para a atmosfera, é um processo dependente do tempo (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.100).

A velocidade da retração decresce rapidamente com o tempo (NEVILLE, 1997, p. 364). A taxa relativa do fluxo de umidade do interior do concreto para as superfícies externas depende da umidade atmosférica. Para uma UR% de 100%, a retração por secagem pode ser admitida igual a zero, podendo atingir valores de  $200 \times 10^{-6}$  para UR% de 80% e  $400 \times 10^{-6}$  para UR%

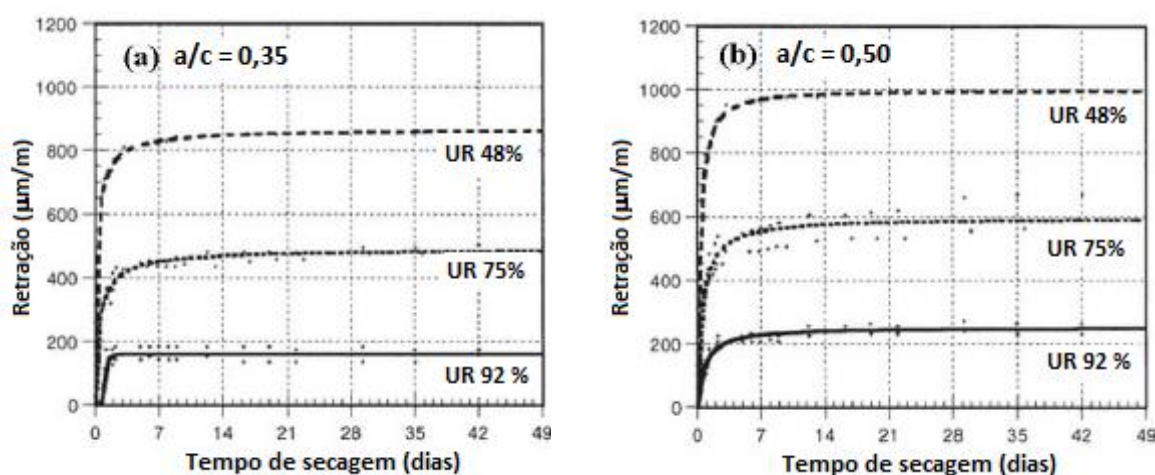
---

<sup>67</sup>TROXEL et al. *Long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete*. Proceedings ASTM, N. 58, 1958, p: 1101-1120

<sup>68</sup>TROXEL et al. *Long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete*. Proceedings ASTM, N. 58, 1958, p: 1101-1120

de 45% (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.101). A Figura 27 apresenta gráficos do efeito da UR% ambiental (constante) sobre a retração por secagem de cp's de argamassa, com dimensões (4 x 8 x 32) cm, para diferentes relações a/c (a) 0,35 e (b) 0,50, conforme Bissonnette *et al.*<sup>69</sup>(1999, *apud* IDIART, 2009, p. 49). Os resultados desse estudo mostram que a retração é menor para UR% maiores, com ambas as relações a/c. É possível verificar, também, uma retração menor para os cp's com relação a/c 0,35, para todas as condições de UR%. Segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 34), para UR% em torno de 100%, praticamente não ocorre variação dimensional.

Figura 27: Efeito da UR% na retração por secagem de argamassas com diferentes relações água/cimento



(a) a/c=0,35

(b) a/c=0,50

Fonte: Adaptado de Bissonnette *et al.*<sup>70</sup> (1999, *apud* IDIART, 2009, p. 49)

### 3.2 PERDA DE ÁGUA

O estudo da retração por secagem, nos níveis meso e microestrutural, aborda os mecanismos associados à perda de água do concreto, explicando como ocorre a movimentação de água nos microporos da pasta de cimento hidratada. A contração volumétrica devida à perda da água, presente na pasta sob várias formas, depende das condições de umidade do meio, podendo ou

<sup>69</sup>BISSONNETTE, B. et al. *Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials*. **CCR**, 1999, V. 29, p: 1655-1662

<sup>70</sup>BISSONNETTE, B. et al. *Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials*. **CCR**, 1999, V. 29, p: 1655-1662

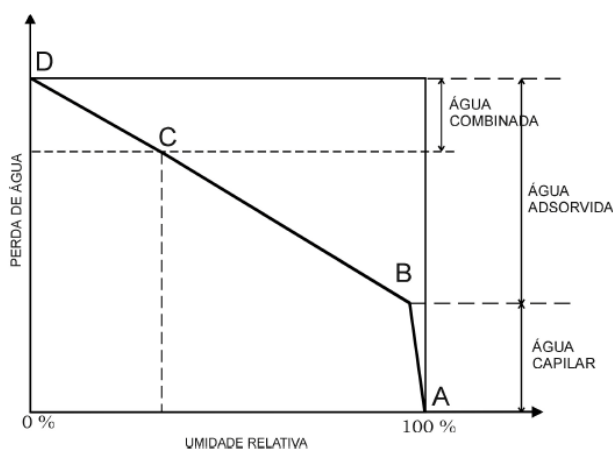
não afetar a estabilidade dimensional do concreto. Quando a secagem inicia, ocorre a *perda de água livre presente nos grandes poros capilares* (maiores que 50 nm, por exemplo) por evaporação para o ambiente. Considerando-se que a água livre não se encontra ligada aos hidratos através de ligações físico-químicas fortes (ver item 2.3.3), sua perda acarreta pouca ou nenhuma retração. Com o prosseguimento da secagem, quando a maior parte da água evaporável tiver sido perdida, ocorre a *perda da água fisicamente adsorvida* no C-S-H, havendo, em consequência, a deformação da pasta devido à retração. A variação de volume da pasta de cimento não confinada, neste estágio, é aproximadamente igual à perda de uma camada de água (NEVILLE, 1997, p.356). Para níveis mais baixos de UR% do ar, poderá também ocorrer a perda da *água mantida sob pressão hidrostática*, em pequenos capilares da pasta hidratada, com diâmetros menores que 50 nm (MEHTA e MONTEIRO, 2016, p.92).

A relação existente entre a perda de água da pasta hidratada e a UR% do ar foi mostrada por L'Hermite<sup>71</sup> (1960, *apud* NUNES e FIGUEIREDO, 2007, p.6), conforme diagrama da Figura 28, onde o trecho AB corresponde à perda de água livre e água capilar, o trecho BC corresponde à perda da água adsorvida e o trecho CD, à perda da água quimicamente combinada. É possível visualizar a grande parcela atribuída à saída da água adsorvida fisicamente às lamelas de C-S-H, principal responsável pela retração por secagem. Assim, a intensidade da retração por secagem do concreto depende da situação da água perdida para o ambiente e das condições de UR% do meio circundante. A saída da água do concreto é explicada por mecanismos que abordam fisicamente o fenômeno, os quais ocorrem de forma predominante sob determinadas condições de UR%.

---

<sup>71</sup>L'HERMITE, R. G. Volume Changes of Concrete. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF CHEMISTRY OF CEMENT**, 4., Washington, 1960. Proceedings. 1960. v.2, p.659-694.

Figura 28: Relação entre a perda de água na pasta e a umidade relativa



Fonte: L'Hermite (1962, *apud* Nunes e Figueiredo, 2007)

### 3.3 MECANISMOS DA RETRAÇÃO POR SECAGEM

Os mecanismos que explicam fisicamente o fenômeno da perda de água estão relacionados com a situação da água na pasta, podendo ocorrer perda de água capilar, adsorvida ou interlamelar (ver item 2.3.3). Na literatura existem três mecanismos principais que explicam a retração por secagem (POWERS<sup>72</sup>, 1965; WITTMANN<sup>73</sup>, 1976, *apud* HUA *et al.*, 1997, p. 245; BARON<sup>74</sup>, 1982; *apud* HUA e ACKER, 1995):

- variação da depressão capilar
- variação da pressão de disjunção
- variação da tensão de superfície de partículas coloidais

Os dois últimos mecanismos abordam as deformações na escala de partícula coloidal, explicando a retração por secagem apenas qualitativamente, enquanto que o primeiro mecanismo possibilita demonstrar quantitativamente o efeito causado pelas tensões capilares,

<sup>72</sup>POWERS, T.C. *Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardened cement paste*. Proc. Int. Symp. Struct. Concr. London, 1965, p: 319-344.

<sup>73</sup>WITTMANN, F.H *The structure of hardened cement paste-a basis for a better understanding of the materials properties*. Proc. Int. Conf. Hydraulic Cement Pastes: their structure and properties, Sheffield, 1976, p: 96-117.

<sup>74</sup>BARON, J. *Les retraits de la pate de ciment*. Le béton hydraulique, Edited by Baron J. & Sauterey R., Chap.27, Presses de l'ENPC, Paris, 1982, p:485-501.



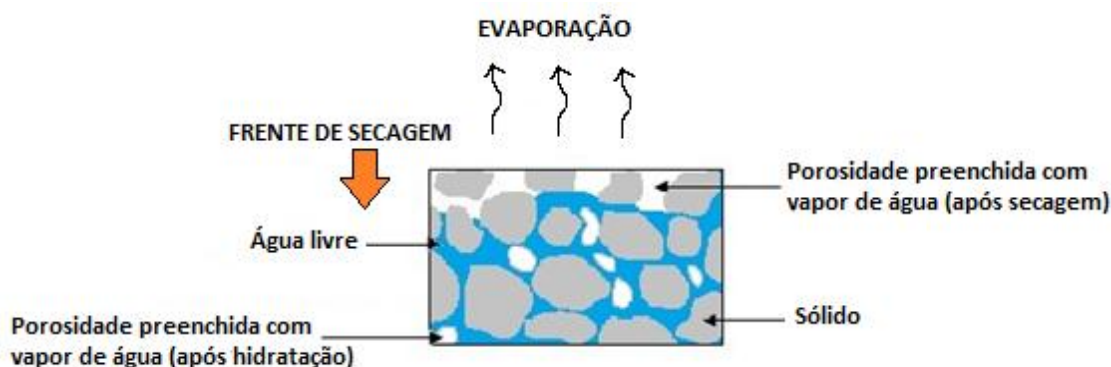
podendo no entanto conduzir a estimativas de retração por secagem menores do que os valores medidos (HUA *et al.*, 1997, p. 245).

Idiart (2009, p.45) comenta que os mecanismos envolvidos no processo de secagem são complexos e com frequência estão interrelacionados, principalmente devido à ampla gama de distribuição de tamanho dos poros nas misturas de concretos normais. A distribuição de poros de diferentes diâmetros determina, em grande parte, os mecanismos de transporte durante a secagem. Tendo em vista que a rede de poros se modifica com o avanço da hidratação, os mecanismos predominantes da retração, em determinada pasta, também podem mudar ao longo do tempo.

### **3.3.1 Mecanismo da depressão capilar**

Durante a hidratação do cimento, a água livre deixa espaços vazios no interior dos poros capilares da pasta de cimento, à medida que é consumida nas reações. Assim, com o avanço da hidratação, os espaços vazios da pasta hidratada vão sendo parcialmente preenchidos pelos hidratos. Portanto, como mencionado na seção 2.3.2, os espaços que não foram preenchidos pelos hidratos constituem os poros da pasta hidratada, que se apresentam preenchidos com vapor de água. Quando a UR% do ar é de 100%, existe um equilíbrio entre a água líquida do capilar e o vapor de água. Nas primeiras idades, ocorre a perda da água por secagem, formando-se um desequilíbrio entre a UR% interna da pasta e a UR% do ambiente, normalmente inferior a 100% (BASTOS, 2001, p. 22). A evaporação da água origina a perda da água condensada nos espaços vazios da pasta de cimento, à medida que a frente de secagem avança. A Figura 29 apresenta uma representação esquemática do processo de secagem na pasta de cimento hidratada, observando-se os sólidos da pasta e os poros capilares, que podem estar preenchidos com água na fase líquida ou gasosa (proveniente dos espaços criados durante a hidratação, ou devido à secagem por evaporação).

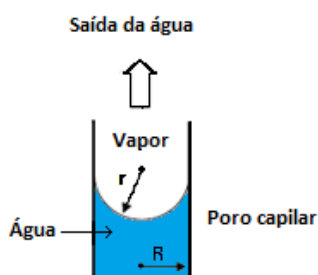
Figura 29: Representação esquemática da secagem da pasta de cimento hidratada



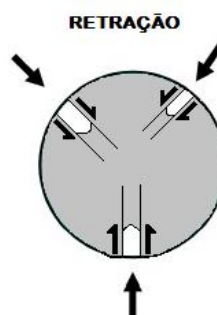
Fonte: HAOUAS, 2007, p.81

Durante a secagem da pasta de cimento, ocorre a movimentação da água condensada no interior dos poros capilares, havendo o desenvolvimento de tensões hidrostáticas na superfície da água. Devido à tensão superficial, a superfície da água se curva formando meniscos e, ao mesmo tempo, é estabelecida uma diferença de pressão entre a fase líquida e a fase gasosa do capilar, através do mecanismo denominado *depressão capilar* (BASTOS, 2001, p. 23). Devido à *depressão capilar*, surgem tensões de tração na água capilar que são equilibradas por tensões de compressão no sólido circundante, induzindo a aproximação das paredes dos poros (contração) e provocando tensões de retração. A Figura 30 (a) mostra a representação esquemática de um poro, admitido como um tubo de raio  $R$ , e o menisco com uma curvatura de raio  $r$ , formado na superfície da água capilar devido à pressão hidrostática. A Figura 30 (b) mostra o esqueleto sólido da pasta hidratada, sujeito às tensões de compressão originadas em função da saída da água, levando, conseqüentemente, à contração/retração do concreto.

Figura 30: Poro capilar durante a secagem



(a) Detalhe do poro capilar



(b) Contração do esqueleto sólido

Fonte: NUNES e FIGUEIREDO (2007, p. 13)

O mecanismo da depressão capilar foi proposto por Freyssinet, a partir das leis propostas por Kelvin e Laplace (BAROGHEL-BOUNY<sup>75</sup>, 1994, *apud* BASTOS, 2001, p.21), apresentadas no Quadro 6. Este mecanismo é frequentemente utilizado para explicar o fenômeno da retração do ponto de vista mecânico, devido à facilidade de compreensão. No entanto, as referidas leis possibilitam uma abordagem macroscópica da retração, constituindo-se em uma limitação (HUA<sup>76</sup>, 1995, *apud* BASTOS, 2001, p.23).

Quadro 6: Leis de Kelvin e Laplace

<p><b>Lei de Kelvin:</b> <math>\Delta P = (RT\rho/M) \ln h</math></p> <p><math>\Delta P</math> - diferença de pressão água/ar  <math>R</math> - constante geral dos gases perfeitos  <math>T</math> - temperatura  <math>\rho</math> - densidade da água  <math>M</math> - massa de um mol de água  <math>h</math> - umidade relativa</p>	<p><b>Lei de Laplace:</b> <math>\Delta P = \sigma (1/r + 1/R)</math></p> <p><math>\Delta P</math> - diferença de pressão água/ar  <math>\sigma</math> - tensão superficial na água  <math>r</math> - raio de curvatura do menisco  <math>R</math> - raio de curvatura do capilar</p> <p><math>\Delta P = 2\sigma/r</math>, para <math>r = R</math>.  <math>r</math> e <math>R</math> são chamados <i>raios de curvatura principais</i></p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: BASTOS (2007, p.21)

Sabe-se que o cimento e os agregados finos têm alta capacidade de molhagem, gerando um ângulo de contato aproximadamente igual a zero, o que implica um  $r$  muito baixo. Portanto,  $r$  é diretamente proporcional ao espaçamento entre as partículas do cimento/finos, sendo assim a tensão capilar controlada pela geometria entre as partículas, ou seja, basicamente pelo espaçamento entre as mesmas, para uma dada taxa de evaporação (HAMMER, 2007, p.30). Conseqüentemente, a pressão capilar aumenta com a redução do espaçamento entre as partículas, segundo Hammer (2007, p. 30). Neste sentido, Haouas (2007, p. 187) acrescenta que o valor da pressão capilar será tanto maior, quanto maior a curvatura do menisco.

Supõe-se que este mecanismo ocorra com UR% mais elevadas, até cerca de 50%. Nos casos em que as UR% forem baixas (abaixo de 40% a 50%), não ocorre a formação de meniscos, pois não são estáveis nestas condições (IDIART, 2009, p. 46). Wittmann<sup>77</sup> (1976, *apud* HAMMER, 2007 p. 31) mostrou que a tensão capilar causa forças de contração entre as

<sup>75</sup>BAROGHEL-BOUNY, V. *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons*. Paris, Laboratoire Centraldes Ponts et Chaussées, 1994.

<sup>76</sup>HUA, C. *Analyses et modélisations du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment durcissante*. Paris, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1995.

<sup>77</sup>WITTMAN et al. Shrinkage mechanisms, crack formation and service life of reinforced concrete structures. *Structural Engineering*, Inglaterra, Oxford, v. 1, p. 13-28, 2009.

<sup>64</sup>BOIVIN, S. G. *Retrait au jeune âge du béton: développement d'une method expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène*. 2001. 249 p. Thèse de doctorat de L.C.P.C., Paris.

partículas, resultando em movimentos horizontais associados à retração, e comprovou experimentalmente a relação existente entre a retração e a pressão da água dos poros.

De acordo com BOIVIN<sup>78</sup> (2001, *apud* RODRIGUES 2010, p. 38), a intensidade das pressões capilares aumenta com o avanço da hidratação, em primeiro lugar, devido à autodessecação, atingindo poros cada vez menores no interior da pasta. Além disso, o avanço da hidratação promove o refinamento dos poros devido ao preenchimento dos vazios pelos produtos da hidratação, provocando depressões capilares mais fortes. A tensão capilar que surge nos poros capilares será tanto maior quanto menores forem os raios dos meniscos formados (MINDESS e YOUNG<sup>79</sup>, 1981, *apud* NUNES e FIGUEIREDO, 2007, p.12).

### 3.3.2 Mecanismo da pressão de desligamento

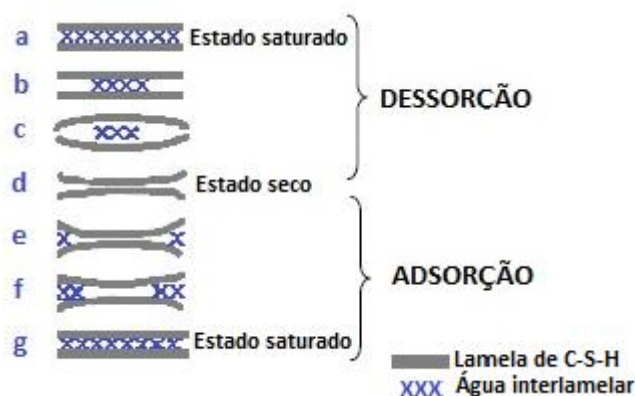
As lamelas do C-S-H encontram-se muito próximas, sendo separadas por uma fina camada de água que se encontra adsorvida sob a influência das forças de atração superficial das partículas de gel. Quando diferentes camadas estiverem muito próximas umas às outras dentro do material, pode não haver condições adequadas para se desenvolverem completamente, em função da UR% circundante. Assim, formam-se zonas onde a adsorção é impedida, desenvolvendo-se *pressões de desligamento*. Essas pressões tendem a separar as duas superfícies, causando expansão do material (IDIART, 2009, p.47). A *pressão de desligamento* varia em função da UR%, sendo significativa para valores maiores que 50%. Para valores de UR% próximos a 100%, há possibilidade de que seis moléculas de água sejam adsorvidas sobre uma superfície, havendo uma adsorção completa quando o espaço entre as paredes do poro é maior do que 31,2 Å. Um aumento na UR% produz um aumento na espessura da camada de água adsorvida presente entre as partículas sólidas do C-S-H e, quanto maior for a espessura desta camada, maior será a *pressão de desligamento* (BASTOS, 2007, p. 26). No caso contrário, ou seja, quando ocorre perda da água adsorvida, a espessura do filme de água diminui, havendo, em consequência, a atração das partículas de C-S-H devido às forças de Van der Waals. Este mecanismo causa, portanto, o fenômeno de contração ou retração da estrutura sólida da pasta hidratada (NUNES e FIGUEIREDO, 2007, p. 13). O mecanismo da *pressão de desligamento* (disjunção) foi proposto nos anos 1960 por Powers, buscando explicar a continuidade da retração para pastas expostas a UR% abaixo de 40%. A Figura 31

---

<sup>65</sup>MINDESS, S. e YOUNG, J. F. *Concrete*, 1981, p: 486-501

ilustra o movimento de água entre as lamelas do C-S-H. De acordo com Idiart (2009, p. 47), quando a UR% chega a níveis muito baixos, a água presente nas intercamadas migra para fora das lamelas de C-S-H, reduzindo assim a distância entre as camadas e causando tensões de retração.

Figura 31: Movimento da água entre as lamelas do C-S-H



Fonte: Adaptado de Feldman e Sereda (1968, p. 518)

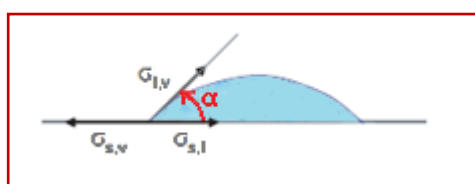
### 3.3.3 Mecanismo da variação da tensão superficial

Quando uma gota é depositada sobre uma superfície plana, dois casos são possíveis (HAOUAS, 2007, p. 187):

- a gota se espalha sem limites, gerando uma molhagem perfeita;
- no segundo caso, a molhagem é parcial e a gota se espalha até a linha de contato entre as três fases: sólido, líquido e vapor.

Nessa linha, o ângulo entre a interface líquido-vapor e a interface sólido-líquido é chamado ângulo de contato  $\alpha$ , conforme apresenta a Figura 32. Se  $\alpha$  for maior que  $90^\circ$ , a superfície não molhará, sendo hidrofóbica (no caso da água). Então, é exercida uma tensão denominada *tensão superficial* sobre cada interface.

Figura 32: Tensões superficiais aplicadas a uma gota de água

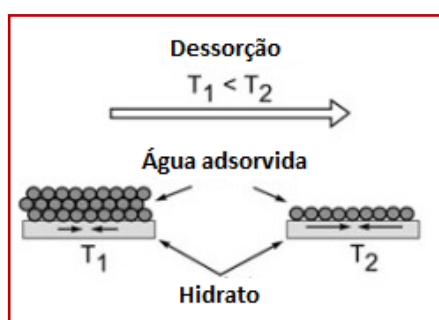


Fonte: Adaptado de Haouas (2007, p. 188)

A *tensão superficial* é um fenômeno físico que resulta do desequilíbrio das forças de atração dos átomos e moléculas existentes próximo das superfícies, induzindo o aparecimento de forças tangentes às mesmas (BASTOS, 2001, p. 27). Devido à *tensão superficial* surgem tensões de compressão e o material sofre deformações elásticas. No caso das partículas de gel de cimento, as reduções de volume decorrentes da *tensão superficial* não devem ser negligenciadas, devido à elevada relação superfície/volume (IDIART, 2009, p. 46). O fenômeno é altamente afetado pelas camadas de água adsorvida na superfície do material. Quando uma camada de água adsorvida está presente, ocorre a redução nas forças de compressão e da *tensão superficial*, havendo um aumento de volume ou expansão. Da mesma forma, quando ocorre a secagem, esta camada pode eventualmente desaparecer, causando redução de volume ou retração devido ao aumento da *tensão superficial* (IDIART, 2009, p. 46).

Segundo Tanesi<sup>80</sup> (1999, *apud* NUNES e FIGUEIREDO, 2007, p.12), mudanças na energia livre da superfície são mecanismos responsáveis pelas deformações associadas à retração por secagem. A Figura 33 ilustra o fenômeno, mostrando que a energia da superfície é menor quanto mais camadas estão adsorvidas na superfície, aumentando à medida que ocorre dessorção. A energia da superfície aumenta quando a camada de água adsorvida é baixa (T2), correspondendo a uma UR% baixa. No entanto, a partir de uma certa UR%, o sólido é coberto de várias camadas de água adsorvidas que induzem uma redução da energia de superfície (T1). Assim, o mecanismo funciona apenas para UR% baixas (PERTUÉ, 2008, p. 15).

Figura 33: Efeito da dessorção na tensão superficial



Fonte: Adaptado de PERTUÉ (2008, p. 15)

<sup>80</sup>TANESI, J. A **Influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração**. 1999. 132 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

O mecanismo da tensão superficial ocorre em UR% relativamente baixas. Segundo Wittmann<sup>81</sup> (1968, *apud* IDIART, 2009, p. 46) este mecanismo só é válido para valores de UR% até 40%. Acima de uma determinada UR% toda a superfície é coberta por moléculas de água adsorvidas, assim, variações em UR% não causam mais variações da tensão superficial (MOKAREM, 2002, p.4).

### 3.4 COMPORTAMENTO DO CONCRETO SOB TENSÃO

O concreto apresenta um comportamento bastante complexo considerando-se os estados de tensão a que está submetido. Isto se deve a vários fatores, tais como a diferença significativa existente entre as resistências à tração e à compressão do concreto, à não-linearidade da relação tensão-deformação, mesmo para níveis de tensão relativamente baixos, além da fluência e retração. Somado a isto, deve-se considerar que os fenômenos de fluência e retração, por sua vez, sofrem a influência de muitos fatores, como UR%, temperatura do ambiente, dimensões dos elementos estruturais, fissuração do concreto desde as primeiras idades, e transmissão de esforços através das fissuras, o que amplia ainda mais a gama de aspectos a serem considerados na análise das estruturas de concreto (AURICH, 2008, p.30).

Como mencionado, o fenômeno da retração por secagem está associado a uma contração volumétrica devido à saída da água da pasta de cimento hidratada, provocando deformações por secagem sem a influência da ação de cargas externas. Quando o concreto estiver restringido, isto é, impedido de se movimentar livremente, e quando as tensões geradas pela saída da água do concreto ultrapassam a tensão de tração do concreto, ocorrem fissuras. A principal consequência da ocorrência de fissuras por retração é o ingresso de agentes agressivos, como cloretos, sulfatos e outros compostos solúveis em água para o interior dos elementos estruturais devido à ação capilar das fissuras, causando efeitos deletérios ao concreto e reduzindo a vida útil da estrutura (WITTMANN *et al.*, 2009, p. 14).

#### 3.4.1 Comportamento do concreto sob compressão axial

O concreto é um material com grande capacidade resistente frente às solicitações de compressão. A resistência à compressão axial é aceita como índice geral da resistência do concreto, sendo a propriedade mais valorizada pelos projetistas estruturais e considerada

---

<sup>81</sup>WITTMANN, F. H. Surface tension, shrinkage and strength of hardened cement paste, **M&S**, V.1, 1968, p:547-552

parâmetro indicativo da qualidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.43). Embora os elementos estruturais estejam submetidos a uma combinação de esforços de compressão, cisalhamento, tração e flexão, a resistência à compressão aos 28 dias, determinada através do ensaio padrão de compressão axial (NBR 5739, ABNT, 2007), tem sido aceita universalmente como um índice geral da resistência do concreto, conforme Mehta e Monteiro (2014, p.44).

Existe uma relação inversa entre a resistência e a porosidade de cada fase do concreto (agregados, matriz e zona de transição). De acordo com um estudo desenvolvido por Powers<sup>82</sup> (1958, *apud* MEHTA e MONTEIRO, 2014, p.45), a resistência à compressão aos 28 dias de argamassas está relacionada com a razão gel/vazios através da Equação 17.

$$f_c = a (x)^3$$

Equação 17

Onde:

$f_c$  = resistência à compressão aos 28 dias

$a$  = resistência intrínseca do material c/ porosidade zero ( $p$ ),

$x$  = razão de sólidos / vazios =  $(1-p)$

*Observação:* Powers calculou  $a = 234$  MPa

Salienta-se, contudo, que a porosidade do concreto não pode ser diretamente relacionada com a resistência, como ocorre em pastas ou argamassas, devido à existência de microfissuras existentes na zona de transição entre o agregado graúdo e a matriz, o que torna mais complexo o prognóstico da resistência através da relação exata *resistência-porosidade*. Um concreto com agregados de baixa porosidade, ou alta resistência, apresenta resistência governada pelas resistências da matriz da pasta de cimento ou da zona de transição. Os efeitos de superfície favorecem uma pasta com maior relação água/cimento na zona de transição (THOMAZ, 2008, p.15). A resistência da zona de transição tende a ser mais fraca do que a da matriz nas primeiras idades, ocorrendo o inverso, a idades mais avançadas, segundo Mehta e Monteiro (2014, p.46). A existência de microfissuras na zona de transição é uma característica determinante do comportamento do concreto sob os vários estados de tensão. Com relação às tensões de compressão uniaxial, pode-se dizer que o concreto não apresenta um comportamento linear elástico.

---

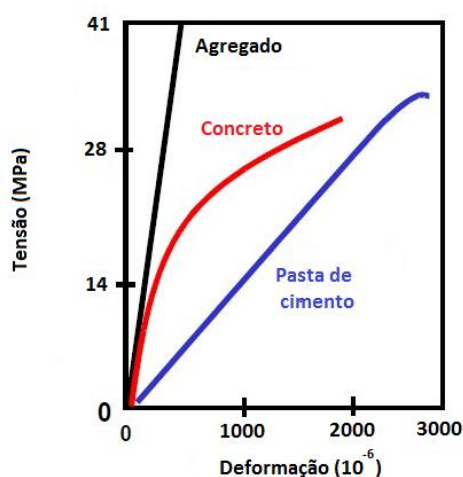
<sup>82</sup> Powers, T.C. The physical structure and engineering properties of concrete, Portland Cement Assoc Res Dept 1958:90



De acordo com a Lei de Hooke, um material é considerado elástico quando apresenta deformação proporcional à tensão aplicada. O módulo de elasticidade é a propriedade que expressa o quanto o material é resistente às deformações elásticas. Assim, quanto menor for o módulo de elasticidade do material, maior será a tendência de se deformar sob a ação de solicitações mecânicas. Portanto, é desejável que o concreto tenha alto módulo de elasticidade, de modo a não sofrer deflexões excessivas. Quando o nível de resistência das forças interatômicas é ultrapassado, ocorre o fenômeno da plasticidade, ocasionando modificações interatômicas irreversíveis, mesmo se houver capacidade de rearranjo através de novas ligações químicas, ou nova conformação para o material. Viscosidade é a deformação crescente quando o concreto é submetido a uma solicitação constante ao longo do tempo, devido ao cisalhamento de ligações fracas de superfície entre arranjos interatômicos (MONTIJA e FIGUEIREDO<sup>83</sup>, 2008 *apud* RODRIGUES, 2010, p. 53).

Embora a pasta de cimento e os agregados apresentem um comportamento linear frente ao carregamento mecânico, o concreto caracteriza-se por apresentar um comportamento diferente dos seus constituintes, como se observa através do gráfico da Figura 34.

Figura 34: Curvas típicas de tensão-deformação para o agregado, pasta de cimento e concreto submetidos à compressão axial



Fonte: Adaptado de HSU<sup>84</sup> *et al.* (1968 *apud* Mehta e Monteiro, 2008, p. 84)

<sup>83</sup>MONTIJA, F.C. e FIGUEIREDO, A.D. Alguns aspectos da relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão do concreto. **BT/PCC/448**. São Paulo: EPUSP, 2008

<sup>84</sup>HSU, T. C. *et al.* J. *ACI Proc.* 1963, V. 60, N.2, p: 209-223; SHAH, S.P. e SLATE, F.O. Proc. Conference on Structure of Concrete, *Cement and Concrete Association*, 1968, p:82-92.

A não-linearidade do concreto em relação à compressão axial é atribuída ao desenvolvimento de microfissuras na matriz, quando o carregamento é aplicado (HSU *et al*<sup>85</sup>, 1963, *apud* TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2006, p. 4). Para Mehta e Monteiro (2014, p. 85) este comportamento pode ser atribuído à existência de microfissuras na zona de transição entre a matriz e o agregado. Principalmente nas primeiras idades, quando ocorre considerável exsudação interna, o tamanho e o volume de vazios da zona de transição são maiores do que na matriz de pasta de cimento. Além disso, nesta área há maior concentração de compostos cristalinos, como hidróxido de cálcio e etringita. Assim, a existência de microfissuras na zona de transição favorece a ruptura do concreto a um nível de tensão consideravelmente mais baixo do que a resistência do agregado e da pasta de cimento.

Shah e Slate<sup>86</sup> (1965, *apud* TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2006, p. 4), consideram, também, que as fissuras podem ser atribuídas ao desenvolvimento localizado de tensões elevadas que ocorrem na zona de transição. Tipicamente, as fissuras se localizam em pontos de maior concentração de tensões, como seções reduzidas ou áreas com falhas pré-existentes. A mecânica da fratura estuda o modo como as fissuras se desenvolvem e se propagam na estrutura. O mecanismo da fratura difere da abordagem da mecânica contínua, na qual se relacionam os níveis da tensão localizada com a existência da fissura. A energia liberada com o crescimento da fissura pode estar relacionada a variações na tensão local (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2006, p. 7). A causa da não-linearidade da relação tensão-deformação foi explicada por pesquisadores<sup>87</sup> a partir do processo da microfissuração progressiva do concreto sob carga (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 83). A Figura 35 ilustra o comportamento do concreto submetido à compressão axial e a evolução da microfissuração, apresentando em paralelo o desenvolvimento da curva tensão-deformação do concreto a cada estágio de incremento de carga, tomando-se como base a pesquisa mencionada.

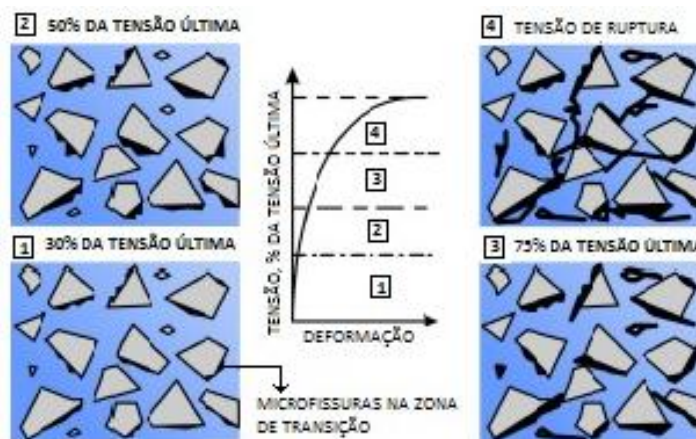
---

<sup>85</sup>HSU, T. C. *et al.* J. *ACI Proc.* 1963, V. 60, N.2, p: 209-223; SHAH, S.P. e SLATE, F.O. Proc. Conference on Structure of Concrete, *Cement and Concrete Association*, 1968, p:82-92

<sup>86</sup>SHAH, S. P.;SLATE, F. O. Slate. *Internal Micro-Cracking, Mortar-Aggregate Bond, and Stress Strain Curve of Concrete.* Proc., International Conference on the Structure of Concrete, Imperial College, London,England, 1965, p: 1-11

<sup>87</sup>HSU, T. C. *et al.* J. *ACI Proc.* 1963, V. 60, N.2, p: 209-223; SHAH, S.P. e SLATE, F.O. Proc. Conference on Structure of Concrete, *Cement and Concrete Association*, 1968, p:82-92.

Figura 35: Comportamento tensão-deformação do concreto convencional sob compressão uniaxial



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2014, p. 84)

Observa-se que à medida que o nível de tensão, expresso em percentual da carga última, aumenta, a microfissuração interna também evolui. Conforme enfatizam Mehta e Monteiro (2014, p.85), já existem microfissuras na zona de transição entre a matriz e o agregado gráúdo.

Com relação ao comportamento tensão-deformação do concreto quando submetido à compressão uniaxial, o gráfico da Figura 35 evidencia um comportamento linear elástico até aproximadamente 30% da resistência à compressão final. De acordo com Mehta e Monteiro (2014, p.63), para cargas rápidas, as microfissuras na zona de transição permanecem inalteradas. De acordo com a representação esquemática, a partir de 30% da carga última, a curva evidencia um aumento gradual de curvatura e as microfissuras começam a aumentar em comprimento, largura e número, havendo concentração de tensões nas extremidades das fissuras. Até cerca de 50% da carga última pode ser admitido um sistema estável de microfissuras na zona de transição e, até este estágio, a fissuração da matriz pode ser considerada desprezível. Na medida em que a carga aumenta, entre 50% a 60% da carga última, começam a surgir fissuras na matriz. Até cerca de 75% da carga última, o sistema de fissuras na zona de transição torna-se instável, e também ocorre a propagação de fissuras na matriz, fazendo com que a curva tensão-deformação incline-se consideravelmente na direção horizontal. Nesta fase, a energia interna disponível excede a energia necessária para liberar fissuras, aumentando sua velocidade de propagação. Mehta e Monteiro (2014, p.64) destacam que o nível de tensão de aproximadamente 75% da carga última representa o início da propagação instável de fissuras e corresponde à tensão crítica, ou seja, tensão a partir da qual

a deformação volumétrica atinge seu máximo valor. De 75% a 80% da carga última, as deformações atingem valores muito elevados, havendo o crescimento espontâneo de fissuras sob tensão constante e risco de colapso. Neste estágio, ocorre a propagação de fissuras não apenas na zona de transição, mas também na matriz.

O efeito da velocidade de carregamento exerce influência sobre a resistência final do concreto, segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 65). Em geral, quanto maior a velocidade de carregamento do cp, maior é o valor de resistência. Assim, devido à progressiva microfissuração sob carregamento constante, o concreto atinge a ruptura a uma tensão menor do que com tensões induzidas por carregamentos rápidos e instantâneos, que normalmente ocorrem quando se realizam ensaios de laboratório.

Tipicamente, o ganho em resistência à compressão é mais rápido nas primeiras idades, tornando-se mais lento às idades avançadas. O rápido crescimento na resistência é diretamente relacionado ao aumento da relação gel/espaco (NEVILLE, 1997, p. 262).

O comportamento do concreto frente às solicitações a que está submetido depende de uma série de fatores que afetam a porosidade, como as propriedades e proporções dos materiais, grau de adensamento e condições de cura. A resistência é fortemente influenciada pela relação a/c, que afeta tanto a porosidade da matriz, como da zona de transição. A hidratação rápida do cimento leva a um elevado grau de hidratação e, conseqüentemente, a uma resistência maior a baixas idades para uma determinada relação a/c (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 47).

As condições de cura, notadamente a umidade disponível e a temperatura, afetam drasticamente o ganho de resistência. Às primeiras idades, a umidade tem um efeito limitado sobre a resistência porque o concreto ainda está molhado. Contudo, a cura úmida inadequada durante o primeiro dia depois da moldagem poderia levar à perda de resistência nas idades mais avançadas (RILEM, 1981, *apud* NEHDI e SOLIMAN, 2011, p. 62).

### **3.4.2 Comportamento do concreto sob tração**

Com relação aos esforços de tração, pode-se dizer que o concreto apresenta um comportamento relativamente frágil. Os ensaios de tração direta do concreto dificilmente são realizados porque os dispositivos de fixação do cp introduzem tensões secundárias que não podem ser ignoradas, segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 68). Os ensaios utilizados para determinação da resistência à tração do concreto são os ensaios por compressão diametral, conforme ASTM C496 (ASTM, 2011) ou NBR 7222 (ABNT, 2011) e ensaio na flexão com

carregamento nos terços do vão de um prisma, conforme ASTM C78 (ASTM, 2010) ou NBR 12142 (ABNT, 2010).

Segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 69), o ensaio de tração por compressão diametral superestima a resistência à tração do concreto cerca de 10% a 15 % em comparação com a tração direta, enquanto o ensaio de resistência à tração por flexão tende a superestimar a resistência do concreto em 50% a 100 %. Deve-se observar que no ensaio à tração direta todo cp está submetido à tração, enquanto que na flexão, uma pequena porção do prisma, localizada na parte central e inferior do cp, é submetida às maiores tensões, durante o ensaio. A resistência à tração pode ser calculada como uma função da resistência à compressão, através da Equação 18.

$$f_t = k (f_c)^n$$

Equação 18

Onde:

$f_t$  = resistência à tração

$f_c$  = resistência à compressão

$k = 0,33$

$n = 2/3$

$k$  e  $n$  coeficientes obtidos na tabela 7, CEB-FIP (1991)<sup>88</sup>

Embora a resistência predominante no concreto seja a resistência à compressão, devido à facilidade com que as fissuras se propagam quando o concreto está sob tensões de tração, a resistência à tração pode ser considerada o fator limitante de ruptura para uma estrutura onde este tipo de solicitação aparece, como vigas e pavimentos rígidos rodoviários (RANGEL, 2011, p.5). Portanto, as tensões de tração devem ser adequadamente consideradas nos projetos estruturais.

### 3.4.3 Relação entre as resistências à compressão e à tração

As resistências à compressão e à tração do concreto, em geral, são influenciadas pelos mesmos fatores e estão fortemente relacionadas. Esta relação é influenciada pela idade, relação a/c, granulometria, tipo e densidade dos agregados, tempo e condições de cura, além do método de avaliação da resistência (NEHDI e SOLIMAN, 2011, p.64). A relação

---

<sup>88</sup>Model Code for Concrete Structures 1990. **Evaluation of the Time Dependent Behaviour of Concrete**. Bulletin d' Information No. 199, Comité Européen du Béton/Fédération Internationale de la Précontrainte, Lausanne, Switzerland.

tração/compressão é diretamente proporcional à relação a/c, para uma dada idade de cura (MEHTA e MONTEIRO, 2008, p. 72).

À medida que a resistência à compressão aumentar, a resistência à tração também aumentará, com uma velocidade decrescente, segundo Mehta e Monteiro (2008, p. 70). Nas primeiras idades, a resistência à tração tende a aumentar mais rapidamente do que a resistência à compressão (BENTUR<sup>89</sup>, 2003, *apud* NEHDI e SOLIMAN, 2011, p.64).

De um modo geral, embora a redução da porosidade da matriz e zona de transição seja benéfica para as resistências à compressão e à tração do concreto, o aumento na resistência à tração não será de grande magnitude, a menos que a resistência intrínseca dos produtos de hidratação compreendidos na zona de transição seja também melhorada (MEHTA e MONTEIRO, 2008, p. 72).

### 3.5 ESTABILIDADE DIMENSIONAL

Conforme item 3.4, pode-se dizer que o concreto tem baixa capacidade para deformação causada pelo desenvolvimento de tensões de tração, como resultado do carregamento mecânico, de reações deletérias, ou de cargas devidas ao meio ambiente. Estas tensões de tração frequentemente causam fissuração, podendo afetar o desempenho do concreto. O carregamento mecânico induz o surgimento de tensões que podem exceder a capacidade resistente do concreto, causando fissuração, sendo que nas primeiras idades o concreto está particularmente suscetível, devido à baixa resistência à tração (KASAI, 1972, *apud Transportation Research Board*, 2006, p. 4). Existem diversos fatores relacionados à fissuração do concreto causada por efeitos ambientais mas, de um modo geral, ocorre em função de tensões desenvolvidas devido à expansão interna ligada a ataques químicos, ou congelamento da água dos poros ou, ainda, devido a contrações de volume causadas por reações químicas, variações térmicas e variações de umidade (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2006, p. 4). Quando o concreto é exposto à secagem, ocorrem deformações devidas à contração volumétrica do material, desenvolvendo-se tensões de tração que, se superiores à resistência à tração do concreto, causam fissuras. Normalmente, os elementos estruturais estão restringidos, seja pelo atrito na base ou restrição nos extremos,

---

<sup>89</sup>BENTUR, A. **Early-age Cracking in Cementitious Systems**. RILEM Technical Committee 181-EAS: Early-age Shrinkage Induced Stresses and Cracking in Cementitious Systems. RILEM, Report 25, 2003, 335 pp.

devido às armaduras ou, mesmo, surgem fissuras devido às deformações diferenciais entre o interior do concreto e o meio exterior.

Para a determinação das tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais, conforme Mehta e Monteiro (2014, p.83), é necessário uma estimativa do módulo de deformação<sup>90</sup>, apesar do comportamento não-linear do concreto. Essa estimativa deve ser considerada pelo calculista estrutural, principalmente para o cálculo de estruturas mais complexas. Quando ocorrer uma combinação desfavorável do módulo de deformação e da deformação por retração, será induzido um nível de tensão que pode ultrapassar a resistência à tração do concreto.

### **3.5.1 Deformações por retração e fluência**

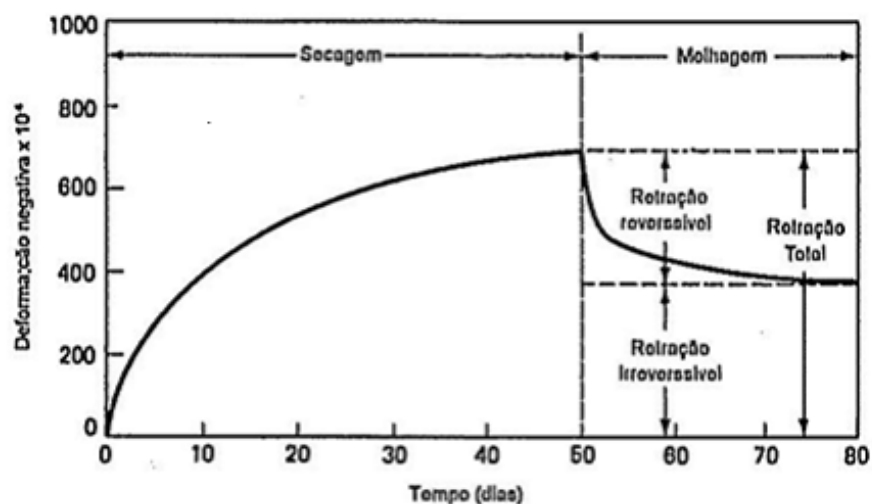
A fluência do concreto corresponde a uma deformação crescente com o tempo, sob tensão constante, sendo adicional à deformação elástica instantânea causada pelo carregamento. Denomina-se fluência básica aquela desenvolvida em saturação de umidade nos concretos submetidos à tensão constante, em ambientes com UR% e temperatura mantidas constantes. Quando o concreto é exposto à secagem, com UR% inferiores a 100%, o efeito da fluência por secagem se soma aos efeitos da deformação elástica, fluência básica e retração por secagem (MEHTA e MONTEIRO, 2008, p. 93).

Embora os efeitos da retração e da fluência não sejam os mesmos, os dois fenômenos apresentam comportamentos bastante semelhantes, sendo frequentemente analisados conjuntamente. Quando a pasta endurecida de cimento estiver sujeita a uma tensão constante em função de carregamento externo, dependendo de sua magnitude, pode ocorrer a perda de água. Nos dois fenômenos existe um grau de irreversibilidade a partir do qual o concreto não retorna à dimensão original (MEHTA e MONTEIRO, 2008, p. 81 e 93). As Figuras 36 e 37 apresentam gráficos que permitem observar a grande semelhança nos comportamentos típicos do concreto frente à retração por secagem, em ciclos de molhagem/secagem, e frente à fluência, em ciclos de carregamento/descarregamento (compressão uniaxial).

---

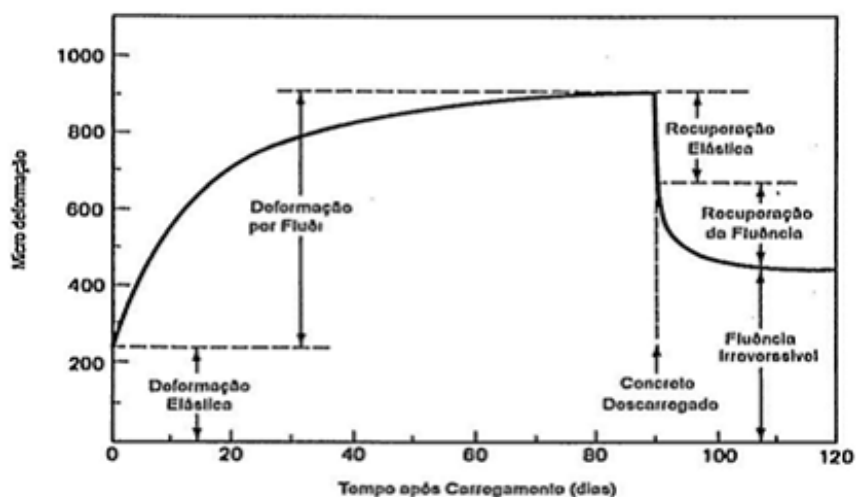
<sup>90</sup>Nota: Relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado

Figura 36: Reversibilidade da retração por secagem, após ciclos de secagem/molhagem



Fonte: MINDESS e YOUNG<sup>91</sup>, (1981, *apud* MEHTA e MONTEIRO, 2008, p. 95)

Figura 37: Reversibilidade da fluência, após ciclos de carregamento/descarregamento



Fonte: MINDESS e YOUNG<sup>92</sup> (1981, *apud* MEHTA e MONTEIRO, 2008, p. 95)

É possível obter um melhor entendimento de como as variações volumétricas do concreto endurecido podem resultar em fissuração através do gráfico da Figura 38 (a), que compara o desenvolvimento das tensões residuais, ao longo do tempo. Um elemento de concreto pode

<sup>91</sup>MINDESS, S. e Young, J. F. Concrete, 1981, p: 486-501

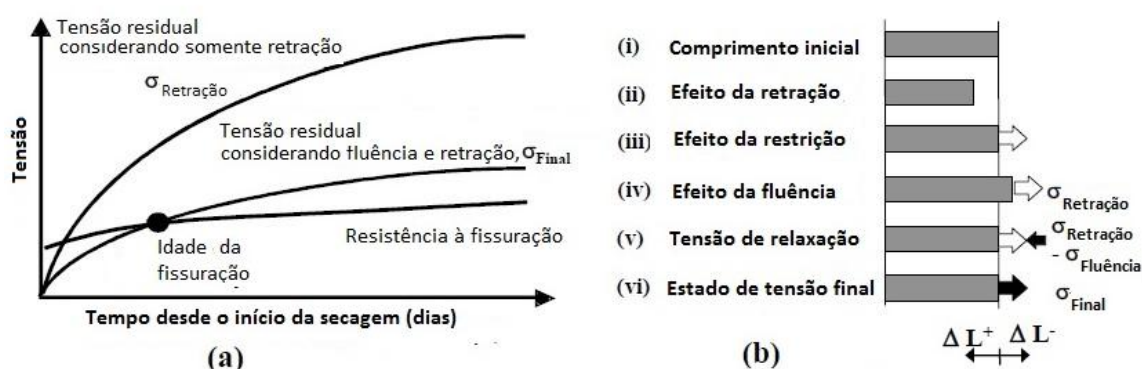
<sup>92</sup>MINDESS, S. e Young, J. F. Concrete, 1981, p: 486-501



fissurar ou não em função do ambiente, dependendo de seu desempenho quando submetido a tensões constantes ou deformações constantes (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2006, p. 4). Tendo em vista que o concreto é um material viscoelástico, sofre um decréscimo progressivo de tensão ao longo do tempo. Pode-se dizer que quando o desenvolvimento da tensão residual e da resistência se interceptarem, ocorre a fissura. No entanto, se a resistência do concreto for sempre maior do que o desenvolvimento das tensões, nenhuma fissura visível ocorrerá.

Na Figura 38 (b) pode-se observar um cp de comprimento original  $L$  que, ao ser exposto à secagem, é submetido a uma tensão de retração uniforme que se desenvolve através da seção transversal (i). Se o cp não for restringido, a retração causa uma variação de comprimento de  $\Delta L$  (ii). Para manter a condição de restrição perfeita (nenhuma variação de comprimento), uma carga fictícia é aplicada (iii). Supondo-se que o cp seja livre para se deslocar sob esta carga fictícia, seu comprimento aumenta de  $\Delta L$ , devido à fluência (iv). Novamente, para manter a restrição perfeita (nenhuma variação de comprimento), uma tensão fictícia é aplicada (v), resultando em uma redução completa da tensão de retração. Verifica-se, assim, que a fluência pode desempenhar um papel muito importante na determinação da magnitude das tensões que se desenvolvem às primeiras idades, estimando-se que pode relaxar de 30% a 70% das tensões (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2006, p.11).

Figura 38: Desenvolvimento da tensão (a); Descrição conceitual da relaxação (b)



Fonte: Adaptado de Transportation Research Board<sup>93</sup>E-C107 (2006, p. 11)

<sup>93</sup>**Transportation Transportation Board** é uma divisão do Conselho de Pesquisa Nacional dos EUA, que atua na prestação de consultoria independente para o governo federal, em questões científicas e técnicas de importância nacional

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

De modo a atingir os objetivos desta tese, o programa experimental foi proposto em duas etapas complementares, conforme segue:

ETAPA 1: Inicialmente, foi realizado o planejamento do programa experimental, a seleção e a caracterização dos materiais a serem utilizados. Após, realizaram-se a dosagem, moldagem, desmoldagem e cura dos cp's. Para cumprir o programa experimental, parte dos cp's produzidos foi submetida ao pré-carregamento através do ensaio resistência à tração na flexão, com base na NBR 12142 (ABNT, 2010), sendo também produzidos cp's de referência. Após os períodos de cura adotados, realizou-se o ensaio de retração livre, com base na ASTM C 157 (ASTM, 2014). Foi utilizado, também, o ensaio de resistência à tração na flexão para a caracterização mecânica dos materiais. Os resultados obtidos no ensaio de retração foram analisados estatisticamente (ANOVA), identificando-se a influência das variáveis adotadas: *tempo de secagem* (semanas), *idade de cura* (dias), *relação a/c*, *pré-carregamento* (%) e *idade de pré-carregamento* (dias), na variável de resposta: *retração por secagem* ( $\times 10^{-6}$ ).

ETAPA 2: O objetivo principal desta segunda etapa consistiu em avaliar os efeitos do pré-carregamento na porosidade e compacidade dos concretos produzidos, além de identificar indícios da ocorrência de autocicatrização (*self-healing*) das microfissuras causadas pelo pré-carregamento. Para tanto, foi proposto um programa experimental reduzido, realizando-se as seguintes análises em amostras dos concretos pré-carregados e de referência: porosimetria por intrusão de mercúrio (ISO 15901, 2005), microtomografia de raios X e ensaio para determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica, de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 1996).

Como mencionado no *Capítulo 1*, o planejamento do programa experimental da presente tese foi realizado de forma integrada ao planejamento das pesquisas desenvolvidas por Vieira (2008, p.65-86) e Venquiaruto (2012, em desenvolvimento), possibilitando que os três estudos tivessem um caráter complementar, e que os resultados específicos a cada uma das pesquisas pudessem ser correlacionados. Assim, a definição das variáveis independentes ou fatores controláveis, a seleção dos materiais, a dosagem experimental, a moldagem e o pré-carregamento dos cp's foram etapas comuns às três pesquisas. Salienta-se, contudo, que em cada uma das pesquisas foram definidas diferentes variáveis de resposta, conforme a abordagem de cada estudo.

Tendo em vista que as ETAPAS 1 e 2 desta pesquisa foram complementares, adotaram-se programas experimentais distintos, sendo realizados em períodos subsequentes. Assim, serão apresentados separadamente neste capítulo.

#### 4.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO – ETAPA 1

O planejamento de um experimento tem grande importância, tendo em vista que as definições adotadas nesta etapa permitem a realização de uma análise estatística adequada dos resultados. Na ETAPA 1, inicialmente foram definidas as variáveis de interesse e seus respectivos níveis, possibilitando a concepção da matriz experimental. Durante o planejamento do experimento foram também estabelecidos os procedimentos para realização do pré-carregamento dos concretos.

##### 4.1.1 Definição das variáveis

Segundo Ribeiro e Ten Caten (2003, p.9), as variáveis de resposta permitem quantificar e avaliar as características e propriedades dos materiais. A fim de avaliar o efeito do carregamento precoce sobre a retração dos concretos estudados, definiu-se como principal variável de resposta a *retração por secagem* medida ao longo do tempo, tomando-se como referência a ASTM C 157 (ASTM, 2014). Definiu-se, também, a utilização da variável de resposta *resistência à tração na flexão* (NBR 12142, ABNT, 2010), para estabelecer comparações com os resultados de retração por secagem, bem como para controle do processo. Foram, também, adotadas as seguintes variáveis independentes ou fatores controláveis, em diferentes níveis.

- *relação água/cimento (a/c)*: foram utilizados três níveis (0,35; 0,50 e 0,70), para possibilitar a obtenção de concretos com diferentes faixas de resistência à compressão;

- *idade de cura (id\_cura)*: foram utilizadas duas idades de cura (7 e 28 dias), para verificar a influência do período de cura na retração por secagem dos concretos utilizados, levando-se em consideração o pré-carregamento. A idade de cura de 7 dias é comumente adotada na execução de estruturas e, a de 28 dias, corresponde à idade proposta na ASTM C 157 (ASTM, 2014), representando a situação ideal de cura;
- *tempo de secagem (TS)*: para os concretos com cura de 7 dias foram adotados os níveis 1, 4, 8, 16, 32 e 64 semanas e, para os concretos com cura de 28 dias, os níveis 4, 8, 16, 32 e 64 semanas;
- *pré-carregamento (car)*: foram utilizados quatro níveis: 0%; 25%; 50% e 75% da carga última de ruptura à flexão, permitindo a avaliação de três diferentes faixas de pré-carregamento, comparando-se com concretos de referência (0%);
- *idade de pré-carregamento (id\_car)*: foram utilizados três níveis (1; 3 e 7 dias), permitindo a avaliação do efeito do pré-carregamento nas idades iniciais.

Foram adotados dois tipos de cimento, com diferentes características físico-químicas, como será justificado no item 4.1.3.1. Devido a tais diferenças, optou-se por não utilizar o *tipo de cimento* como variável, considerando-se que poderiam ocorrer influências não controláveis nos resultados, inviabilizando a análise estatística.

De acordo com a ASTM C 157 (ASTM, 2014), as leituras devem ser realizadas nas idades de 1, 4, 7, 14, 28, 56, 112, 224 e 448 dias após o período de cura. Na presente tese, planejou-se a realização das medições da variação de comprimento de todos os cp's nas idades de 1, 3, 7, 28, 56, 112, 224 e 448 dias, a partir da data de moldagem, de modo que as três primeiras leituras coincidiram com as idades adotadas para o pré-carregamento dos concretos. Na análise estatística dos resultados foram consideradas apenas as idades correspondentes ao período de secagem, efetivamente, conforme idades de cura adotadas (7 ou 28 dias). Assim, denominou-se *tempo de secagem (TS)* a variável independente definida para avaliar a influência da secagem ao longo do tempo, na retração dos concretos. A Figura 39 apresenta a linha de tempo correspondente à duração do ensaio, para as duas idades de cura propostas.

Os níveis das variáveis independentes estão indicados na Tabela 1.

Figura 39: Linha de tempo da duração do ensaio, conforme idade de cura (7 e 28 dias)

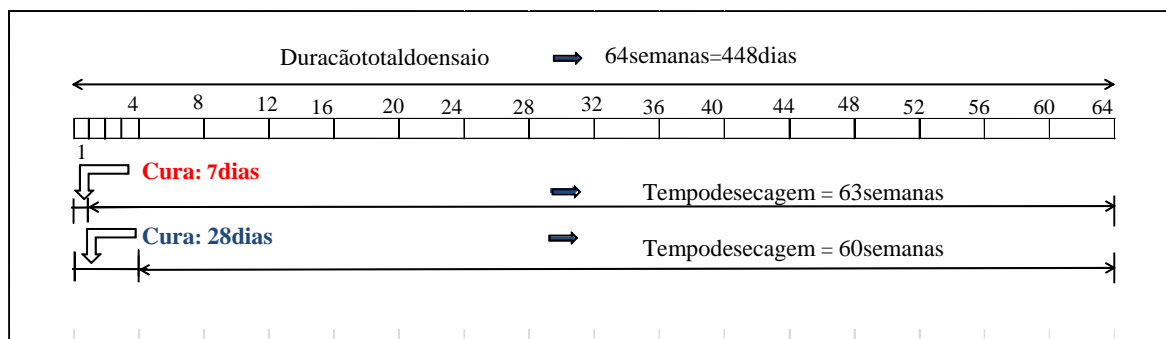


Tabela 1: Níveis das variáveis independentes ou fatores controláveis

<i>Variáveis independentes</i>	<i>Número de níveis</i>	<i>Níveis</i>	<i>Unidade</i>
a/c	3	0,35 0,50 0,70	--
Id_cura	2	7 28	dias
TS	6 e 5	1   4 4   4 8   8 16   16 32   32 64   64	semanas
car	4	0 25 50 75	%
id_car	3	1 3 7	dias

Onde:

a/c = relação a/c

Id\_cura = idade de cura (dias)

TS = tempo de secagem (semanas)

Car = pré-carregamento (%)

Id\_car = idade de pré-carregamento

#### 4.1.2 Definição da matriz experimental

A partir da identificação das variáveis de interesse, definiu-se a matriz experimental, conforme representação esquemática apresentada na Tabela 2. Foi proposta a moldagem de 3 corpos de prova (cp's) prismáticos para cada percentual de pré-carregamento (25%, 50% e 75%), bem como, a moldagem de 3 cp's de referência (pré-carregamento=0%), sendo 30 cp's por relação a/c e, portanto, 90 cp's por idade de cura. Assim, para cada tipo de cimento foram necessários 180 cp's para a realização do ensaio de retração por secagem.

Tabela 2: Matriz experimental do projeto experimental – ETAPA 1

<i>Total de cp's /Idade de cura/Tipo de cimento</i>						
a/c	Id_car (dias)	Car (%)				Nº cp's
		0	25	50	75	
0,35	1	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	30 cp's
	3		3 cp's	3 cp's	3 cp's	
	7		3 cp's	3 cp's	3 cp's	
0,50	1	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	30 cp's
	3		3 cp's	3 cp's	3 cp's	
	7		3 cp's	3 cp's	3 cp's	
0,70	1	3 cp's	3 cp's	3 cp's	3 cp's	30 cp's
	3		3 cp's	3 cp's	3 cp's	
	7		3 cp's	3 cp's	3 cp's	

Considerando-se o projeto estatístico adotado (fatorial cruzado completo) e os níveis estabelecidos para cada variável, para cada cimento utilizado foram obtidas as combinações apresentadas na Tabela 3, conforme idade de cura.

Tabela 3: Número de combinações, considerando a idade de cura

<i>Cura (dias)</i>	<i>Combinações</i>
7	$3 \times 4 \times 3 \times 6 = 216$
28	$3 \times 4 \times 3 \times 5 = 180$

Salienta-se que, além dos cp's destinados ao programa de pré-carregamento, como apresentado na Tabela 2, foram também moldados 9 cp's prismáticos (sendo 3 para cada idade de pré-carregamento) para ruptura à tração na flexão (NBR 12142, ABNT, 2010) e cálculo dos percentuais de pré-carregamento (ver Tabela 2). Os resultados dos ensaios de ruptura por tração na flexão obtidos durante o pré-carregamento foram utilizados, também, para controle da resistência à tração na flexão nas idades 1, 3 e 7 dias. Foram moldados outros 3 cp's para controle da resistência à tração na flexão na idade de 28 dias.

### **4.1.3 Seleção e caracterização dos materiais**

Os materiais foram selecionados e devidamente caracterizados, conforme itens seguintes.

#### **4.1.3.1 Cimentos**

A finura do cimento exerce influência na cinética das reações de hidratação. Cimentos mais finos aumentam a taxa de hidratação, que depende da área superficial das partículas de clínquer, promovendo, assim, o desenvolvimento da resistência do concreto mais rapidamente (DESHPANDE *et al.* 2007, p.12). No entanto, conforme mencionado no item 3.1.1, a retração é maior para concretos com cimentos de alta resistência inicial, de maior finura, em comparação a concretos com cimentos de endurecimento lento, mesmo para concretos de mesma resistência à compressão aos 28 dias (COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990, p. 68). A estrutura de poros tende a ser mais fina quando se utilizam os cimentos mais finos, levando a deformações por retração mais elevadas nas primeiras idades (DESHPANDE *et al.* 2007, p.12).

Além da influência da finura do cimento na porosidade e na capacidade resistente do concreto, a sua composição química também pode influenciar a retração do concreto. Cimentos com elevadas quantidades de alumina, por exemplo, podem aumentar a retração, conforme abordado no item 3.1.1. Considerou-se importante a comparação da influência do pré-carregamento na retração por secagem de concretos produzidos com cimentos de diferentes composições químicas e velocidades de hidratação distintas.

Assim, foram então selecionados dois cimentos:

- cimento Portland CP V ARI (alta resistência inicial – NBR 5733, ABNT, 1991), sem adições quimicamente ativas, e que apresenta endurecimento rápido; e
- cimento CP IV (pozolânico – NBR 5736, ABNT, 1999), com alto percentual de cinza volante, e que apresenta endurecimento lento.

As Tabelas 4 e 5 apresentam a caracterização química, física e mecânica dos cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente, de acordo com os fabricantes.

Tabela 4: Caracterizações química, física e mecânica do cimento CP V ARI

<i>Ensaios químicos</i>		<i>Valores (%)</i>	<i>Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)</i>
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )		3,15	≤ 4,0
Óxido de magnésio (MgO)		4,99	≤ 6,5
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		4,24	--
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )		19,06	--
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		2,58	--
Óxido de cálcio (CaO)		60,23	--
Perda ao fogo		3,24	--
Resíduo insolúvel		0,68	--
Óxido de cal livre (CaO livre)		1,43	--
Equivalente alcalino		0,59	--
<i>Ensaios físicos</i>		<i>Valores</i>	<i>Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)</i>
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4439,00	≥ 2600
Tempo de pega	Inicial (h:min)	2:13	≥ 01:00
	Final (h:min)	3:00	≤ 10:00
Resíduo na peneira # 200 (%)		0,13	≤ 12
Resíduo na peneira # 325 (%)		1,24	--
Consistência normal (%)		29,20	--
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,12	--
<i>Ensaios mecânicos</i>		<i>Valores</i>	<i>Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)</i>
Resistência à compressão axial (MPa)	1 dia	24,1	≥ 14
	3 dias	35,5	≥ 24
	7 dias	41,4	≥ 34
	28 dias	50,2	--

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante



Tabela 5: Caracterizações química, física e mecânica do cimento CP IV

<i>Ensaaios químicos</i>		<i>Valores (%)</i>	<i>Limites NBR 5736 (ABNT, 1999)</i>
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )		2,69	≤ 4,0
Óxido de magnésio (MgO)		4,57	≤ 6,5
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		11,05	--
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )		31,81	--
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		4,09	--
Óxido de cálcio (CaO)		40,60	--
Perda ao fogo		3,43	--
Resíduo insolúvel		32,09	≤ 4,5
Óxido de cal livre (CaO livre)		--	
Equivalente alcalino		--	
<i>Ensaaios físicos</i>		<i>Valores</i>	<i>Limites NBR 5736 (ABNT, 1999)</i>
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4625	> 2600
Tempo de pega	Inicial (h:min)	3:50	> 01:00
	Final (h:min)	5:06	> 12:00
Resíduo na peneira # 200 (%)		0,40	≤ 8
Resíduo na peneira # 325 (%)		2,40	--
Consistência normal (%)		35,50	--
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,80	--
<i>Ensaaios mecânicos</i>		<i>Valores</i>	<i>Limites NBR 5736 (ABNT, 1999)</i>
Resistência à compressão axial (MPa)	1 dia	12,80	≥ 10
	3 dias	21,80	≥ 20
	7 dias	27,40	≥ 32
	28 dias	41,30	--

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante

Propriedades mecânicas –Laboratório LAMTAC/NORIE/UFRGS

#### 4.1.3.2 Agregados

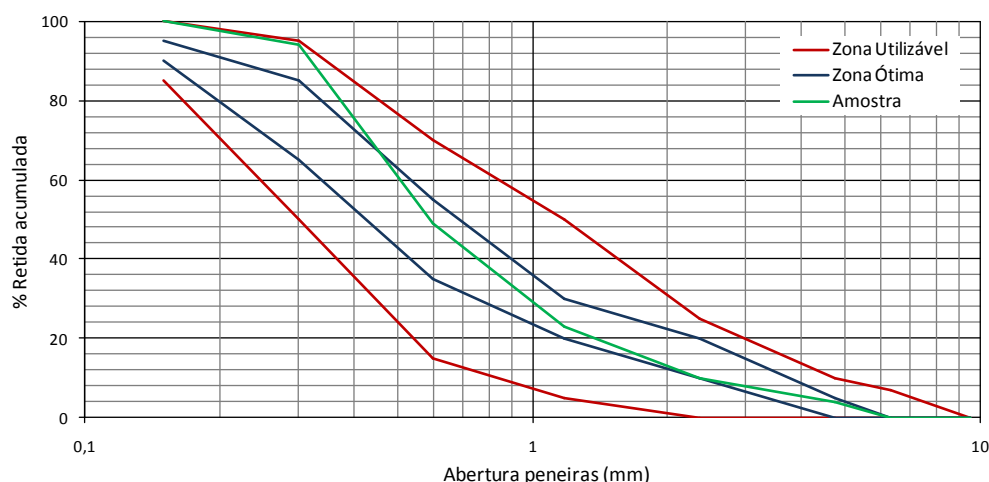
Os agregados exercem um papel importante com relação à retração da pasta de cimento, restringindo as variações dimensionais dos elementos de concreto. Nesta pesquisa, contudo, não foi avaliada a influência do tipo de agregado na retração dos concretos produzidos (pré-carregados e de referência). Assim, foram utilizados agregados miúdos e graúdos de características semelhantes, ao longo das etapas do trabalho experimental.

Por razão de economia e acessibilidade, foram selecionados agregados disponíveis na região de Porto Alegre/RS. Na ETAPA 1, utilizou-se como agregado miúdo, uma areia quartzosa proveniente do Rio Jacuí-RS, devidamente seca ao ar e peneirada na malha de # 4,75 mm, eliminando-se as frações retidas na peneira. A caracterização física do agregado miúdo está apresentada na Tabela 6, e a sua composição granulométrica, na Figura 40.

Tabela 6: Caracterização física do agregado miúdo

Determinações	Método de ensaio	Resultados		
		Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
Composição Granulométrica	NM 248 (ABNT, 2003)	4,75	4	4
		2,36	6	10
		1,18	13	23
		0,6	26	49
		0,3	45	94
		0,15	6	100
		< 0,15	0	100
		Total	100	--
		Módulo de Finura – NBR NM 248 (ABNT, 2003)		2,80
Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> ) – NBR NM 52 (ABNT, 2009)		1,57		
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> ) – NBR NM 52 (ABNT, 2009)		2,62		
Dimensão Máxima Característica (mm) – NBR NM 248 (ABNT, 2003)		4,75		

Figura 40: Distribuição granulométrica do agregado miúdo (NBR NM 248, ABNT, 2003)



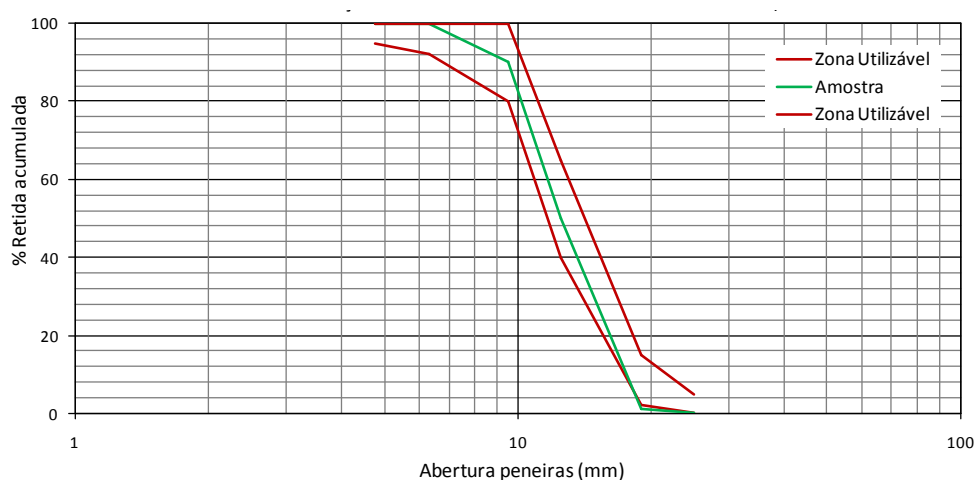
O agregado graúdo empregado na ETAPA 1, foi uma brita de origem basáltica, adquirida em Porto Alegre/RS, com dimensão máxima característica de 19 mm. Observando-se o item 7.2

da ASTM C 157 (ASTM, 2014), foram empregados prismas de concreto com seção de 75 mm, já que todos os agregados graúdos forem passantes na peneira # 25 mm. A caracterização física do agregado graúdo está apresentada na Tabela 7 e, sua composição granulométrica, na Figura 41.

Tabela 7: Caracterização física do agregado graúdo

<i>Determinações</i>	<i>Método de ensaio</i>	<i>Resultados</i>		
		Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
Composição Granulométrica	NM 248 (ABNT, 2003)	25	0	0
		19	1	1
		12,5	49	50
		9,5	40	90
		6,3	10	100
		4,75	0	100
		< 4,75	0	100
		Total	100	--
Módulo de Finura – NBR NM 248 (ABNT, 2003)		6,91		
Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> ) – NBR NM 52 (ABNT, 2009)		1,48		
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> ) – NBR NM 52 (ABNT, 2009)		2,73		
Dimensão Máxima Característica (mm) – NBR NM 248 (ABNT, 2003)		19		

Figura 41: Distribuição granulométrica do agregado graúdo (NBR NM 248, ABNT, 2003)



#### 4.1.4 Dosagem dos concretos

A dosagem dos concretos foi realizada com base no método proposto pelo IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992, p.225-274), que consiste na determinação do teor ótimo de argamassa da mistura para um determinado traço, fixando-se um valor de abatimento. A partir deste traço, denominado intermediário, são confeccionados os traços mais pobre e mais rico em cimento, elaborando-se posteriormente o diagrama de dosagem. Com base no método adotado, inicialmente definiu-se o traço intermediário (1:5), a partir de um teor de argamassa de 53%, considerado ideal para os materiais selecionados. O abatimento do concreto, medido conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998), foi fixado em  $100 \pm 20$  mm. Realizou-se a moldagem de cp's para a determinação da resistência à compressão axial, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007). Posteriormente, foram executados os traços rico (1:2,5) e pobre (1:7,5). A fim de atender ao planejamento do experimento, a partir da dosagem experimental buscou-se obter traços de concretos com relações a/c compreendidas no intervalo entre 0,35 e 0,70. As Tabelas 8 e 9 apresentam os traços unitários em massa, relações a/c e consumo dos materiais utilizados na produção dos concretos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente, obtidos a partir da dosagem dos materiais. O diagrama de dosagem está apresentado no Apêndice A.

Tabela 8: Traços unitários e consumo de materiais: CP V ARI

Relação a/c	Traço unitário em massa	Consumo de materiais (kg/m <sup>3</sup> )			
		Cimento	Ag.miúdo	Ag.graúdo	Água
0,35	1:0,98:1,75	593	581	1038	207,6
0,50	1:2,09:2,74	381	795	1041	190,5
0,70	1:3,56:4,05	259	918	1045	175,0

Tabela 9: Traços unitários e consumo de materiais: CP IV

Relação a/c	Traço unitário em massa	Consumo de materiais (kg/m <sup>3</sup> )			
		Cimento	Ag.miúdo	Ag.graúdo	Água
0,35	1:0,68:1,49 *	661	451	988	231
0,50	1:1,68:2,38	422	716	1014	211
0,70	1:3,00:3,55 *	286	855	1012	200

\* Ver considerações apresentadas no Apêndice A.

#### 4.1.5 Moldagem, desmoldagem e cura dos cp's

A confecção dos concretos foi realizada buscando-se compatibilizar as necessidades do programa experimental com algumas restrições, tais como número de fôrmas disponíveis, capacidade da betoneira, idades de pré-carregamento e realização dos ensaios, sem prejuízo da qualidade e confiabilidade dos resultados. A fim de atender ao cronograma adotado, os materiais necessários foram preparados anteriormente à realização das moldagens, sendo devidamente lavados e secos. A pesagem dos materiais foi realizada de acordo com os quantitativos, calculados a partir dos traços unitários. Para cada condição a ser testada, foram moldados 3 cp's. Atendendo-se à ASTM C 157 (ASTM, 2014), como os agregados graúdos utilizados eram passantes na peneira de abertura # 25 mm, foram utilizadas fôrmas metálicas com dimensões (7,5 x 7,5 x 28,5) cm. Para fechamento das extremidades das fôrmas, foram utilizadas peças laterais de dimensões (7,5 x 7,5 x 1,5) cm, usinadas com orifícios centrais para a fixação de pinos metálicos, confeccionados com aço AISI 316<sup>94</sup>, diâmetro  $\varnothing=1/4"$  e comprimento  $l=22,5$  mm. Os pinos ficavam parcialmente inseridos no interior do concreto, e tinham como função servir de referência para as medições da variação de comprimento dos cp's, ao longo da realização do ensaio de retração livre. Durante o preparo das fôrmas, os pinos eram revestidos com fita vedante, tipo veda-rosca, a fim de garantir a adequada estanqueidade. Posteriormente, eram parcialmente rosqueados nos orifícios das peças laterais, colocadas em cada extremidade das fôrmas. Tomava-se o cuidado, também, de deixá-los bem presos às laterais, evitando-se possíveis deslocamentos durante as moldagens. Aplicava-se desmoldante nas fôrmas antes das moldagens.

Para a confecção dos concretos utilizou-se uma betoneira de eixo vertical, de acordo com as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2016). Após a devida imprimação, os materiais eram colocados na betoneira, adotando-se a seguinte sequência: 100% da brita, 30% da água (aproximadamente); 100% do cimento; restante da água e 100% da areia. A mistura dos materiais na betoneira era realizada por aproximadamente 4 minutos. A cada betonada, realizava-se a verificação do abatimento do tronco de cone de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 2008), buscando-se manter fidelidade ao traço pré-fixado, tendo em vista que o

---





<sup>94</sup>Classe de aço inoxidável, destinado à fabricação de peças que exigem alta resistência à corrosão, caracterizado por apresentar cromo-níquel molibdênio, inoxidável austenítico, não temperável, não-magnético, com resistência à oxidação até a temperatura de 875 °C. Fonte: <http://www.favorit.com.br/produtos/acos-inoxidaveis/aco-aisi-316-aisi-316-l> Acesso em 13/07/2014

mesmo não poderia ser alterado através da adição de quantidades adicionais de água ou de aditivos.

Conforme procedimentos indicados na ASTM C 157 (ASTM, 2014), a colocação do concreto nas fôrmas foi realizada em duas camadas, adensando-as com uma haste metálica. Na medida em que a camada superior era colocada nas fôrmas, procurava-se trabalhar o concreto ao redor dos pinos, com auxílio dos dedos, para garantir que ficassem totalmente inseridos no concreto, sem falhas. Após completar o preenchimento das fôrmas, realizava-se o acabamento do concreto na face superior dos cp's. Posteriormente, utilizava-se um martelo de borracha para bater levemente na fôrma, complementando o adensamento.

Durante as primeiras  $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$  horas, os cp's permaneciam em ambiente de cura ( $UR \cong 100\%$  e  $t = 23^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ), com a superfície superior das fôrmas devidamente protegida. Para evitar a ocorrência de danos, os cp's moldados com CP IV somente eram desmoldados quando adquiriam resistência suficiente, o que podia ocorrer em período superior a 24 horas. Após a desmoldagem, as laterais das fôrmas eram cuidadosamente removidas (desrosqueadas) dos cp's e os pinos ficavam parcialmente inseridos no interior do concreto. Realizava-se a identificação dos cp's com tinta à prova d'água. No Quadro 7, apresenta-se um exemplo da convenção adotada.

Quadro 7: Convenção adotada para identificação dos cp's prismáticos

<b>V / 70 / 50 / 7d</b>			
<b>V /</b>	<b>70 /</b>	<b>50 /</b>	<b>7d</b>
			
<b>CP VARI</b>	<b>0,70</b>	<b>50%</b>	<b>7 dias</b>

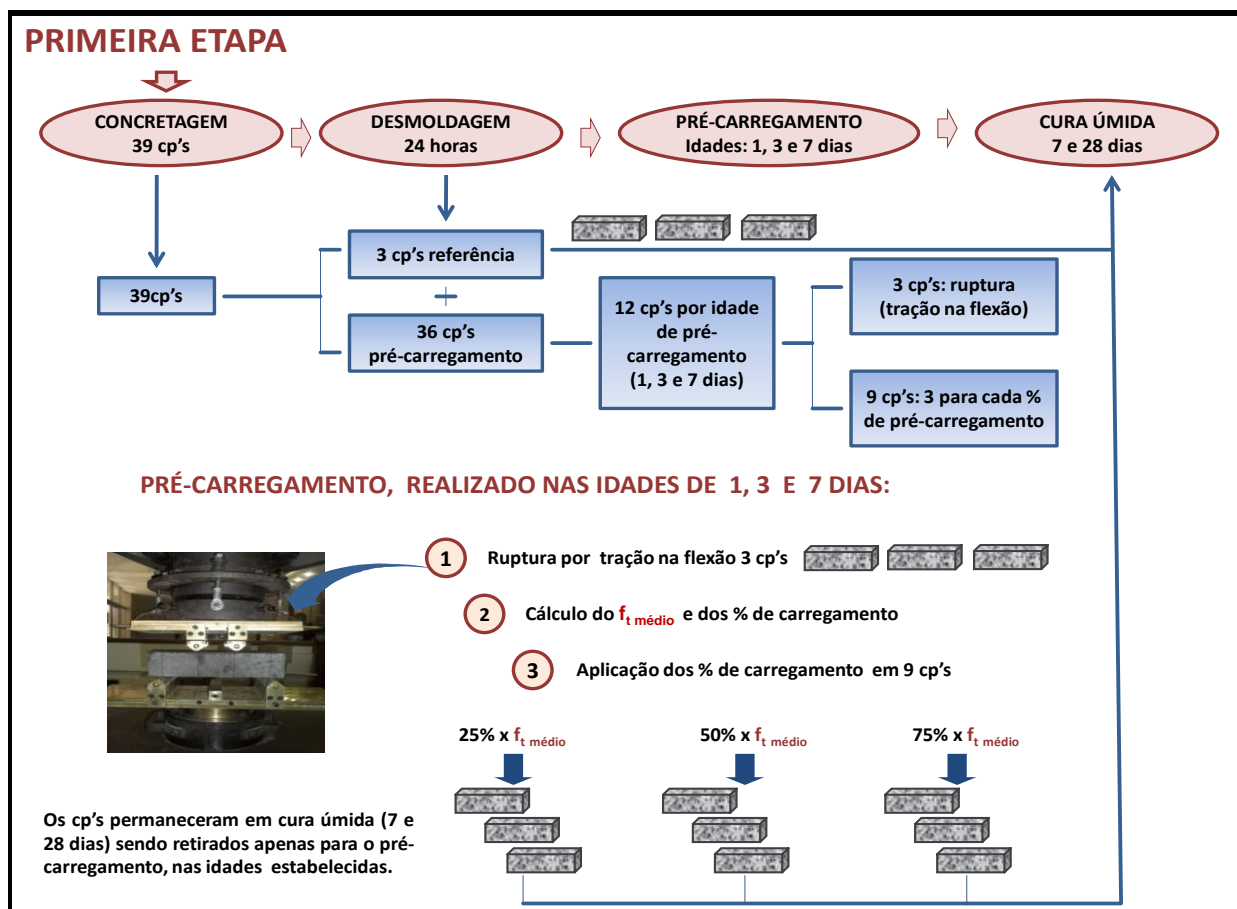
Posteriormente, os cp's eram colocados em recipientes com solução saturada de água e cal, a uma temperatura  $t = 23^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , por um mínimo de 30 minutos antes da realização da leitura inicial, a fim de minimizar a variação de comprimento devido à variações de temperatura. Na idade de  $24 \pm \frac{1}{2}$  h, contada a partir da adição de água ao cimento, durante a mistura, os cp's eram retirados, um a um, dos recipientes, sendo limpos com auxílio de um pano úmido. Imediatamente, realizava-se a leitura inicial ou de referência. Os cp's destinados ao pré-

carregamento, nas idades de 3 e 7 dias, eram novamente colocados nos recipientes com água e cal, e levados ao ambiente de cura ( $t=23^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ). Os cp's destinados ao pré-carregamento na idade de 1 dia eram levados à sala da prensa, realizando-se os procedimentos conforme descrito no item 4.5. Depois do pré-carregamento, os cp's eram também recolocados nos recipientes com água e cal, sendo mantidos em ambiente de cura ( $t=23^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ) até o final do período (7 e 28 dias), conforme o caso. Após o término da cura, os cp's eram armazenados em ambiente climatizado, atendendo às condições de temperatura e umidade indicadas na ASTM C 157 (ASTM, 2014), onde eram realizadas as medições da variação do comprimento para cálculo da retração por secagem, conforme descrito no item 4.6.1.

#### **4.1.6 Pré-carregamento dos cp's**

O pré-carregamento dos concretos destinados ao ensaio de retração por secagem foi realizado nas idades de 1, 3 e 7 dias, atendendo ao programa experimental. A cada uma dessas idades de pré-carregamento, para cada condição a ser testada, eram rompidos 3 cp's prismáticos à tração na flexão (NBR 12142, 2010), calculando-se a média das cargas de ruptura dos mesmos. Posteriormente, calculavam-se os percentuais de 25%, 50% e 75% a partir do valor da carga média de ruptura à tração na flexão. Cada um dos percentuais de pré-carregamento era aplicado em 3 cp's prismáticos, sendo ainda mantidos outros 3 cp's prismáticos como referência (pré-carregamento=0%). O pré-carregamento dos cp's foi realizado utilizando-se uma prensa de marca Shimadzu AG100KNG com velocidade de aplicação da carga estabelecida em 1,0 MPa/min, atendendo aos requisitos da NBR 12142 (ABNT, 2010). A Figura 42 apresenta uma representação esquemática da sequência de atividades da ETAPA 1, indicando os passos para a realização do pré-carregamento dos cp's.

Figura 42: Detalhamento do pré-carregamento dos cp's



A prensa, equipada com dispositivos para controle da taxa e aplicação do carregamento, era interrompida quando atingido o percentual de carga (25%, 50% e 75%) calculado. Os ensaios de pré-carregamento à flexão foram realizados no LAMTAC, vinculado ao NORIE da UFRGS. Após o pré-carregamento, os cp's retornavam ao ambiente de cura.

#### 4.1.7 Realização do ensaio de retração por secagem

Os cp's prismáticos foram ensaiados com base na ASTM C 157 (ASTM, 2014) para verificação da influência do pré-carregamento na retração por secagem dos concretos. De acordo com a norma utilizada como referência, o termo variação de comprimento deve ser entendido como aumento ou redução da dimensão linear de cp's, excluindo-se fatores relacionados à aplicação de forças externas e a variações de temperatura. Assim, a medição das variações de comprimento permite a avaliação do potencial para expansão e contração volumétrica do material, o que é bastante útil em estudos comparativos entre concretos produzidos com diferentes cimentos hidráulicos.



Desse modo, com o objetivo de avaliar a retração potencial dos concretos estudados, após os respectivos períodos de cura (7 e 28 dias), tanto os cp's submetidos ao pré-carregamento, como os de referência foram armazenados para secagem em uma sala onde se realizaram os ensaios de retração. Para controle da climatização da sala de ensaios, de acordo com as prescrições da ASTM C 157 (ASTM, 2014), foi instalado um sistema que possibilitou manter constantes a temperatura e a UR% do ar ( $t=23\pm 1,7^{\circ}\text{C}$  e  $\text{UR}=50\pm 4\%$ ), conforme Figura 43 (a). Os cp's prismáticos foram armazenados sobre espaçadores, como ilustra a Figura 43 (b), a fim de ser evitado o atrito com a superfície de apoio. Dessa forma, buscou-se eliminar possíveis restrições à livre movimentação dos concretos, além de possibilitar a secagem homogênea nas 6 faces dos cp's.

Figura 43: Sistema de controle de temperatura e umidade da sala (a);  
(b) armazenamento dos cp's sobre estrados



(a)



(b)

Sala climatizada no Laboratório LAMTAC/NORIE/UFRGS

Para a realização das medições do comprimento dos cp's, ao longo do tempo, foi confeccionado um aparato metálico, constituído de uma base comparadora horizontal. Esta base era munida de um relógio digital, com precisão de milésimo de milímetro, em uma das extremidades, e de uma rosca para ajustes, na outra extremidade. O aparato foi confeccionado com base nas especificações contidas na ASTM C 490 (ASTM, 2011). Antes da realização das leituras, o relógio digital era zerado através de uma barra metálica padrão, utilizada para as aferições. Após esse procedimento, realizava-se um ajuste através da rosca localizada na

extremidade do aparato, zerando novamente o relógio com uma folga de 1 a 5 mm, para possibilitar a obtenção das leituras no período de contração volumétrica dos concretos. O valor da folga era devidamente registrado em planilhas e descontado no cálculo da retração, realizado posteriormente. A Figura 44 (a) apresenta o aspecto da base comparadora, da barra metálica padrão utilizada para as aferições, de comprimento igual ao dos cp's (285 mm), e dos dois suportes da barra padrão, acopláveis à base horizontal comparadora. Na Figura 46 (b), observa-se um cp inserido na base comparadora durante a realização da medição da variação de comprimento.

Figura 44: Aparato para medição do comprimento dos cp's



(a) Base horizontal comparadora, barra padrão e suportes acopláveis

(b) Medição da variação de comprimento do cp

Considerando-se a variabilidade inerente a este ensaio, a fim de garantir a adequada confiabilidade dos resultados, foram adotados sempre os mesmos procedimentos, principalmente na realização das leituras, destacando-se:

- a base comparadora e a barra padrão permaneciam na sala de ensaio, com controle de temperatura e UR% do ar;
- a base comparadora era posicionada em uma superfície horizontal devidamente nivelada durante a realização das leituras;
- a cada aferição, eram verificadas as condições de limpeza e funcionamento do aparato, principalmente quanto à livre movimentação do pino do relógio digital, evitando-se possíveis falhas durante as leituras;
- os cp's eram inseridos na base comparadora com a face superior (mais rugosa) para cima, marcando-se, através de uma pequena seta feita com tinta, a extremidade a ser inserida do mesmo lado onde estava posicionado o relógio, de modo que todas as medições fossem sempre realizadas na mesma posição, para cada cp;

- para cada cp eram realizadas 3 leituras, no mínimo, eliminando-se os valores que apresentassem diferenças na ordem de décimo de milímetro em relação aos demais valores lidos, na respectiva idade de leitura. O valor final correspondia à média entre as 3 leituras.

O cálculo da deformação linear por retração dos cp's foi realizado com base no item 11.2 da ASTM C 157 (ASTM, 2014), a partir da sua variação de comprimento, conforme Equação 19.

$$\Delta L_x = ((L_f - L_p) - L_{ref} / G) \times 100 \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

$\Delta L_x$  = variação de comprimento do cp, em qualquer idade de leitura;

$L_f$  = leitura realizada em qualquer idade de leitura (mm);

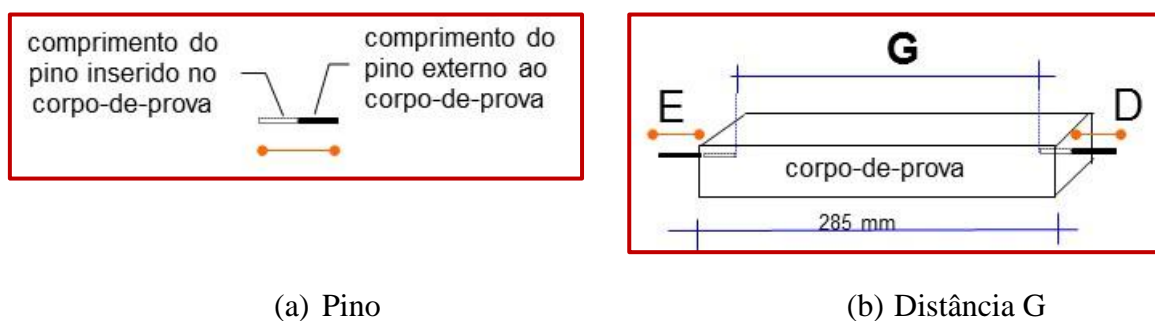
$L_p$  = valor do ajuste adotado para a leitura do comprimento do cp;

$L_{ref}$  = leitura inicial ou de referência (leitura realizada na idade de 1 dia);

$G$  = distância entre pinos, no interior do cp (mm).

As Figuras 45 (a) e (b) apresentam representações esquemáticas do pino e da distância entre os pinos, no interior do cp.

Figura 45: Representação esquemática de um cp com os pinos



A norma ASTM C 157 (ASTM, 2014) indica a adoção do valor de 250 mm para  $G$ . Nesta pesquisa, a distância  $G$  foi calculada para cada cp, segundo a expressão apresentada na Equação 19, buscando-se atender às recomendações da norma mencionada.

$$G = 285 - \text{padronização do relógio} + (\text{leitura} - (22,5 + 22,5)) \quad \text{Equação 20}$$

Sendo:

$G$  = distância interna entre pinos;

285 = comprimento da barra padrão (mm);

padronização do relógio = ajuste do relógio para possibilitar a medição da redução do comprimento dos cp's (retração do concreto)

$22,5+22,5$  = soma do comprimento dos dois pinos (mm)

A partir das leituras realizadas, calculavam-se os valores correspondentes à retração por secagem dos 3 cp's correspondentes a cada uma das situações propostas no programa experimental. Nesta pesquisa, os resultados de retração por secagem, apresentados no Apêndice A, foram expressos em *microstrain* ( $\mu\text{strain}$ <sup>95</sup>).

Com o objetivo de verificar a consistência dos valores da retração obtidos, propôs-se a aplicação da modelagem apresentada no CEB-FIP<sup>96</sup> *Model Code* 1990 (COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990, p. 68). Os parâmetros e o detalhamento adotados na aplicação da referida modelagem, bem como os resultados obtidos, estão descritos no Apêndice B.

#### **4.1.8 Ensaio de resistência à tração na flexão**

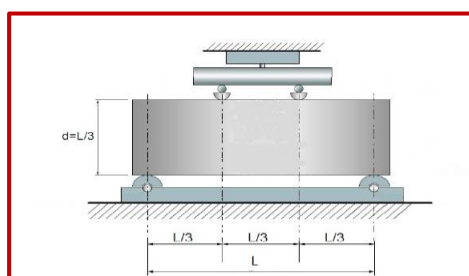
O ensaio de resistência à tração na flexão dos cp's prismáticos foi realizado de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 2010), intitulada “Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em cp's prismáticos”, para controle. Esse ensaio foi utilizado para a determinação da resistência à tração na flexão e para obtenção dos percentuais de pré-carregamento, conforme descrição apresentada no item 4.5. O ensaio consiste em submeter um prisma de concreto à flexão e determinar a tensão teórica máxima de tração atingida nas fibras inferiores. Para a realização do ensaio, utilizou-se uma prensa Shimadzu AG100KNG, mantendo-se constante o crescimento da carga a uma velocidade de 1,0 MPa/min (a NBR 12142-2010 estabelece o intervalo de 0,9 a 1,1 MPa/min). A transmissão da carga aos cp's foi realizada através de um dispositivo, conforme Figura 46 (a), até a ruptura por tração na flexão. Antes da realização dos ensaios, os cp's eram marcados com tinta, para determinação dos terços médios, conforme Figura 46 (b), indicando-se o seu correto posicionamento no aparato. Nessa figura, é possível observar a prensa onde foram realizados os ensaios, o aspecto do aparato utilizado e um cp, devidamente posicionado para a realização do ensaio.

---

<sup>95</sup>“É uma unidade de medida comumente utilizada para expressar tensões em engenharia. Um objeto sob tensão está, tipicamente, submetido a deformações (por expansão ou compressão), sendo que a tensão é medida pela quantidade desta deformação relativa ao mesmo objeto em um estado indeformado. Um *microstrain* corresponde à tensão que produz uma deformação de uma parte por milhão ( $10^{-6}$ ).” Fonte: <http://www.unc.edu/~rowlett/units/dictM.html>. Acesso em 15/7/14

<sup>96</sup> CEB: Comité Européen Du Béton; FIP: Fédération Internationale de la Précontrainte

Figura 46: Realização do ensaio de tração na flexão: NBR 12142 (ABNT, 2010).



(a) Aparato utilizado



(b) Aspecto da prensa

Após a aplicação da carga, era identificado o local da ruptura, no cp. Se ocorresse no terço médio da distância entre os elementos de apoio, a resistência à tração na flexão era calculada através da Equação 20.

$$f_{ct, fl} = p.L / b.d^2$$

Equação 21

Onde:

$f_{ct, fl}$  = resistência à tração na flexão, em MPa

$p$  = carga máxima aplicada, em N

$L$  = distância entre cutelos de suporte, em mm

$b$  = largura média do cp na seção de ruptura, em mm

$d$  = altura média do cp, na seção de ruptura, em mm

Caso a ruptura ocorresse fora do terço médio, a uma distância deste não superior a 5% de  $L$ , calculava-se a resistência à tração na flexão pela expressão:

$$f_{ct, fl} = 3 P.a / b.d^2$$

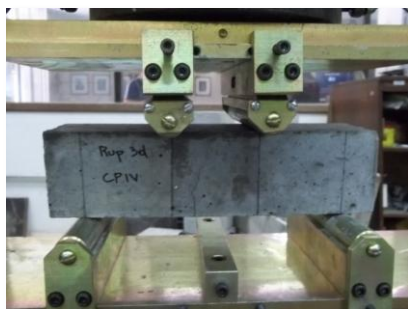
Equação 22

Onde:

$a$  = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, medida com paquímetro com aproximação de 0,1 mm, mediante a tomada de, pelo menos, três medidas ( $a > 0,283L$ ).

A Figura 47 apresenta o aspecto de um dos cp's ensaiados, após a ruptura.

Figura 47: Ruptura no terço médio de um dos cp's ensaiados



Sala da prensa do LAMTAC/ NORIE/UFRGS

Caso a ruptura ocorresse a uma distância além dos 5% citados, ou seja, se  $a < 0,283 L$ , descartava-se o cp, e o ensaio era repetido.

## 4.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO – ETAPA 2

O objetivo da segunda etapa consistiu em verificar se o pré-carregamento influenciou a microestrutura, a porosidade e a compacidade dos concretos pré-carregados, através da realização das seguintes análises complementares: porosimetria por intrusão de mercúrio, microtomografia de raios X e determinação da velocidade da onda ultrassônica (NBR 8802, ABNT/2013). Assim, foi proposto um programa experimental compacto para a confecção de cp's e extração das amostras a serem encaminhadas às análises de porosimetria por intrusão de mercúrio e microtomografia de raios X, além daqueles necessários à realização do ensaio para determinação da velocidade da onda ultrassônica.

### 4.2.1 Definição das variáveis

Devido a restrições orçamentárias e de tempo, não foi possível realizar as análises complementares para todas as combinações entre as variáveis *relação a/c*, *pré-carregamento* e *idade de pré-carregamento*. Portanto, para a produção dos concretos e obtenção das amostras necessárias às análises, foi adotada uma matriz experimental reduzida em relação à utilizada na ETAPA 1. Adotou-se o cimento CP V ARI e as seguintes variáveis independentes: *relação a/c*, *pré-carregamento*, *idade de pré-carregamento* e *idade de cura*. Devido às razões supramencionadas, as variáveis *relação a/c* e *idade de pré-carregamento* foram fixadas nos seus níveis intermediários (0,50 e 3 dias, respectivamente). Para avaliar o comportamento do concreto quando submetido à situação mais desfavorável, foram adotados

os níveis  $car=75\%$  e  $car=0\%$  para a variável *pré-carregamento*. Sabendo-se que a porosidade e a distribuição do tamanho dos poros são consideravelmente influenciadas pelo o método de cura (NARAYANAN e RAMAMURTHY, 2000, p.322), decidiu-se testar três níveis da variável *idade de cura*: 3, 7 e 28 dias. As análises de porosimetria e microtomografia foram realizadas adotando-se amostras de concretos com idades de cura 3 e 28 dias. Para o ensaio de determinação da velocidade da onda ultrassônica, foram utilizados concretos com idades de cura 7 e 28 dias.

A Tabela 10 apresenta os níveis das variáveis adotadas na ETAPA 2.

Tabela 10: Níveis das variáveis independentes – ETAPA 2

<i>Variáveis</i>	<i>Níveis</i>
Relação ( <i>a/c</i> )	0,50
Pré-carregamento ( <i>car</i> )	0%
	75%
Idade de pré-carregamento ( <i>id_car</i> )	3 dias
Idade de cura ( <i>id_cura</i> )	3 dias
	7 dias
	28 dias

#### 4.2.2 Definição da matriz experimental

A partir da identificação das variáveis de interesse, definiu-se a matriz experimental. Foram moldados 3 cp's prismáticos para cada percentual de pré-carregamento (0% e 75%), sendo 2 para extração das amostras a serem encaminhadas para realização dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio e microtomografia de raios X, e 1 para determinação da velocidade da onda ultrassônica. Portanto, foram utilizados 6 cp's por idade de cura, totalizando-se 18 para as 3 idades de cura adotadas. Foram, também, moldados 3 cp's para ruptura à tração aos 3 dias, e outros três, para ruptura à tração na flexão aos 28 dias (NBR 12142, ABNT, 2010).

#### 4.2.3 Seleção e caracterização dos materiais

Considerando-se que o programa experimental foi realizado em duas etapas distintas, buscou-se utilizar materiais com característica físico-químicas semelhantes, de acordo com as condições disponíveis.

## 4.2.3.1 Cimento CP V ARI

As caracterizações química, física e mecânica do cimento CP V ARI estão apresentadas nas Tabela 11, conforme informações obtidas com o fabricante.

Tabela 11: Caracterizações química, física e mecânica do cimento CP V ARI

<i>Ensaios químicos</i>		<i>Valores (%)</i>	<i>Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)</i>
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )		3,12	≤ 4,0
Óxido de magnésio (MgO)		4,99	≤ 6,5
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		*	--
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )		*	--
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		*	--
Óxido de cálcio (CaO)		*	--
Perda ao fogo		2,55	≤ 6,5
Resíduo insolúvel		0,68	
Óxido de cal livre (CaO livre)		*	--
Equivalente alcalino		*	--
<i>Ensaios físicos</i>		<i>Valores</i>	<i>Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)</i>
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4585,00	≥ 2600
Tempo de pega	Inicial (h:min)	3:26	≥ 01:00
	Final (h:min)	5:15	≤ 10:00
Resíduo na peneira # 200 (%)		0,28	≤ 6
Resíduo na peneira # 325 (%)		1,93	--
Consistência normal (%)		29,20	--
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,16	--
<i>Ensaios mecânicos</i>		<i>Valores</i>	<i>Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)</i>
Resistência à compressão axial (MPa)	1 dia	21,40	≥ 14
	3 dias	36,70	≥ 24
	7 dias	41,80	≥ 34
	28 dias	49,00	--

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante

\* dados não disponibilizados



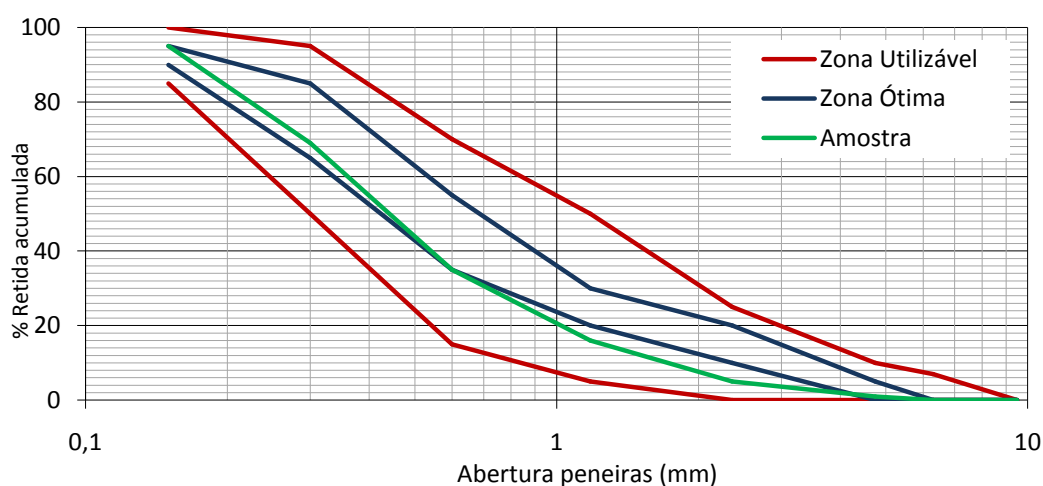
## 4.2.3.2 Agregados

Como agregado miúdo, utilizou-se uma areia de origem quartzosa, adquirida em Porto Alegre/RS, proveniente do Rio Jacuí, com caracterização física e composição granulométrica apresentadas, respectivamente, na Tabela 12 e Figura 48.

Tabela 12: Caracterização física do agregado miúdo

<i>Determinações</i>	<i>Método de ensaio</i>	<i>Resultados</i>		
		Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
Composição Granulométrica	NM 248 (ABNT, 2003)	4,75	1	1
		2,36	4	5
		1,18	11	16
		0,60	19	35
		0,30	34	69
		0,15	26	95
		< 0,15	5	100
		Total	100	--
Módulo de Finura – NM 248 (ABNT, 2003)		2,21		
Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> ) – NM 52 (ABNT, 2009)		1,57		
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> ) – NM 52 (ABNT, 2009)		2,62		
Dimensão Máxima Característica (mm) – NM 248 (ABNT, 2003)		2,36		

Figura 48: Distribuição granulométrica agregado miúdo (NBR NM 248, ABNT 2003)



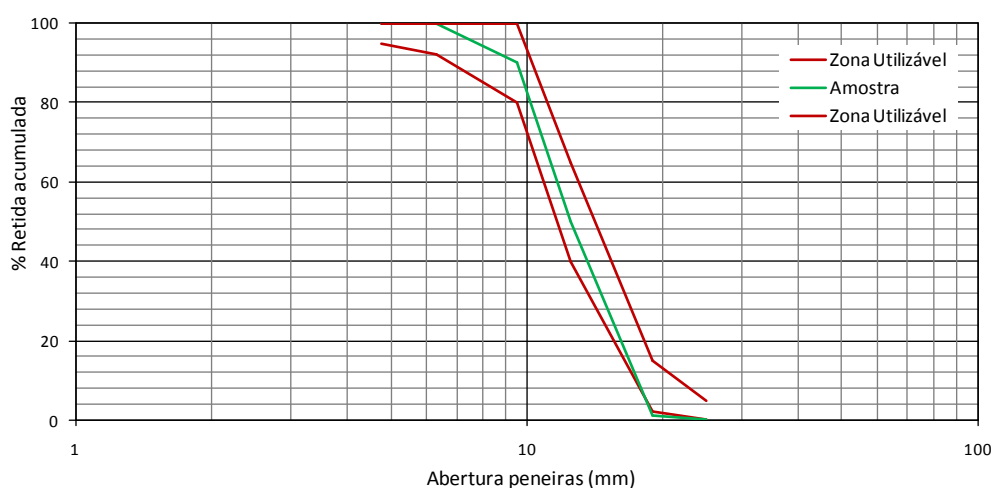
O agregado graúdo empregado foi uma brita de origem basáltica, adquirida também em Porto Alegre/RS, com dimensão máxima característica de 25 mm. A caracterização física e a

composição granulométrica do agregado graúdo estão apresentadas, respectivamente, na Tabela 13 e na Figura 49.

Tabela 13: Caracterização física do agregado graúdo

<i>Determinações</i>	<i>Método de ensaio</i>	<i>Resultados</i>		
		Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
Composição Granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	25	2,4	2
		19	12,6	15
		12,5	51,5	67
		9,5	25,5	92
		6,3	8,0	100
		4,75	0	100
		< 4,75	0	100
		Total	100	--
Módulo de Finura – NBR NM 248 (ABNT, 2003)		7,07		
Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> ) – NBR NM 52 (ABNT, 2009)		1,38		
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> ) – NBR NM 52 (ABNT, 2009)		2,98		
Dimensão Máxima Característica (mm) – NBR NM 248 (ABNT, 2003)		25		

Figura 49: Distribuição granulométrica do agregado graúdo (NBR NM 248, ABNT, 2003)



#### 4.2.4 Dosagem dos concretos

Assim como na ETAPA 1, a dosagem dos concretos também foi realizada de acordo com o método proposto pelo IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992, p.225-274). Com base nesse método, inicialmente definiu-se o traço intermediário (1:5), a partir de um teor de argamassa de 52%, considerado ideal para os materiais selecionados. Realizou-se a moldagem de cp's para a determinação da resistência à compressão axial, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007). O abatimento do concreto, medido conforme NBR NM 67 (ABNT, 2008), foi fixado em  $100 \pm 20$  mm. Com base na dosagem dos materiais, para a moldagem dos cp's necessários foram calculados os traços unitários em massa para o cimento utilizado, com relação a/c 0,50, e o consumo dos materiais, conforme a Tabela 14.

Tabela 14: Traços unitários e o consumo de materiais - ETAPA 2

Tipo de cimento	Traço unitário em massa	Consumo de materiais ( $\text{kg/m}^3$ )			
		Cimento	Ag.miúdo	Ag.graúdo	Água
CP V ARI	1:2,18:2,94	381	831	1120	190,50

#### 4.2.5 Moldagem, desmoldagem e cura dos concretos

Os cp's foram moldados utilizando-se os mesmos procedimentos indicados na ETAPA 1 (ver item 4.1.5). Salienta-se que não foi necessário inserir pinos metálicos nos cp's moldados na ETAPA 2, já que não se destinaram à realização do ensaio de retração por secagem. Após as moldagens, os cp's foram mantidos nas fôrmas por 24 horas, em câmara úmida ( $UR \geq 100\%$  e  $t = 23^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ ), com a face superior devidamente protegida. Depois de desmoldados, os cp's foram identificados e mantidos em cura submersa, em recipientes com água saturada com cal, em ambiente com temperatura controlada ( $t = 23^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ ), onde permaneceram até o término das respectivas idades de cura (3, 7 e 28 dias).

#### 4.2.6 Pré-carregamento e cura dos corpos de prova

Na idade de 3 dias, os cp's destinados ao pré-carregamento foram removidos dos recipientes com água saturada com cal e levados à prensa, utilizando-se os mesmos procedimentos descritos no item 4.1.6 (ETAPA 1). De acordo com o planejamento experimental, parte dos cp's prismáticos foi submetida ao pré-carregamento de 75% da carga média de ruptura à tração na flexão. Após o pré-carregamento, os cp's foram recolocados nos recipientes e mantidos em ambiente com temperatura controlada ( $t = 23^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ ). Quando atingiram as

respectivas idades de cura (3, 7 e 28 dias), os cp's (pré-carregados e de referência) foram removidos da cura por imersão em água, para a extração das amostras necessárias à realização das análises de porosimetria por intrusão de mercúrio e de microtomografia de raios X, bem como para a realização do ensaio para determinação da velocidade da onda ultrassônica.

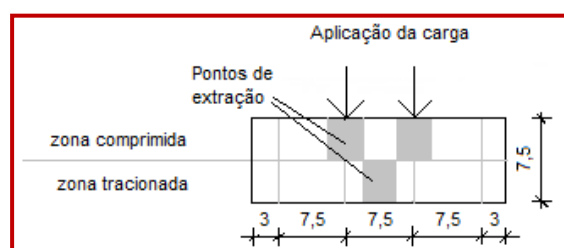
#### 4.2.7 Extração das amostras para as análises

Foram extraídas amostras dos cp's (pré-carregados e de referência), para realização do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio e análise de microscopia de raios X, utilizando-se uma serra circular, conforme idades de cura estabelecidas. As posições de onde as amostras foram extraídas nos cp's estão descritas na Tabela 15 e também são apresentadas na Figura 50 (a), através de uma representação esquemática. Na Figura 50 (b) pode-se observar o aspecto das amostras extraídas.

Tabela 15: Posição do cp de onde foram extraídas as amostras

Idade de cura	Pré-carregamento	Posição da retirada da amostra
3 dias	0%	Centro do cp
	75%	Superior: pontos de carga Inferior: meio do vão
28 dias	0%	Centro do cp
	75%	Superior: pontos de carga Inferior: meio do vão

Figura 50: Representação esquemática dos pontos de extração das amostras dos cp's pré-carregados (a); aspecto das amostras para o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio e para a análise de microtomografia de raios X (b).



(a) Pontos de extração



(b) Amostras

Após a extração, as amostras foram identificadas e mergulhadas em álcool isopropílico para interromper as reações de hidratação, durante um período de 24 horas. Posteriormente, foram colocadas em uma estufa, a 60°C, até constância de massa, quando foram embaladas e mantidas em um dessecador, até o encaminhamento para as análises.

#### **4.2.8 Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio**

Muitas pesquisas têm descrito a caracterização da estrutura de poros dos materiais cimentícios utilizando o método de porosimetria por intrusão de mercúrio, que está baseado no fato de que o mercúrio não molha um sólido poroso, podendo entrar nos seus poros sob pressão (TAYLOR, 1997, p. 262). Quando um material é envolvido por mercúrio, existe a formação de um envelope líquido ao redor do mesmo. Dependendo da pressão que será aplicada, o mercúrio irá se conformar mais ou menos às características superficiais do material. A uma determinada pressão, o mercúrio penetra e preenche, então, os poros, fissuras e vazios do material (WEBB, 2001, p. 10). Geralmente, a técnica limita-se a acessos de poro em torno de 375 a 0,003  $\mu\text{m}$  (GALLÉ, 2001, p.1468).

Para cada idade de cura (3 e 28 dias), foram encaminhadas duas amostras de referência (Amostras REF), duas amostras da parte superior dos cp's (Amostras SUP) e duas da parte inferior dos cp's (Amostras INF), conforme Figura 42 (b) (seção 4.2.7). O objetivo foi verificar a existência de diferenças na porosidade dos concretos, em função do tipo de tensão atuante (compressão, tração), já que o ensaio utilizado para o pré-carregamento foi o de resistência à tração na flexão (NBR 12142, ABNT/2010). Para a análise dos resultados, foi considerado o valor médio entre as duas amostras. O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizado no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. As análises foram efetuadas em um equipamento da marca *Micromeritics*, Modelo *AutoPore IV*, com leitura gradual para cada pressão aplicada (modo *stepwise*). A porosidade do material, a densidade aparente e a área superficial foram determinadas por intrusão de mercúrio nas amostras previamente secas em estufa a 60°, por 24 horas, sendo o procedimento de análise baseado na norma ISO 15901-1/2005. O diâmetro dos poros foi calculado pela equação de *Washburn* ( $d_p = -4.\gamma.\cos\theta / P$ ). Foram utilizados os parâmetros da Tabela 16.

Tabela 16: Parâmetros do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Dados do mercúrio			Penetrômetro 04-0776		Dados do ensaio	
Densidade	Tensão superficial	Ângulo de contato	Volume do bulbo	Volume da haste	Pressão de preenchimento	Tempo de equilíbrio
13,54g/cm <sup>3</sup>	0,485 N/m	130°	15 ml	1,057 ml	1,02 psi	10 s

Os resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio estão apresentados no Apêndice G.

#### 4.2.9 Análise de Microtomografia de raios X

A microtomografia de raios X é uma análise não-destrutiva que permite analisar, tridimensionalmente, a estrutura de objetos. Sua utilização como ferramenta complementar ao estudo das propriedades dos materiais cimentícios tem sido crescente, possibilitando a obtenção de informações importantes em amostras de concretos, tais como densidade, porosidade, permeabilidade, progressão do ataque de sulfatos, existência de danos internos, entre outras (PESSÔA et al., 2014, p. 21; PESSÔA et al., 2015, p. 30; LU et al., 2006, p. 611; RATTANASAK e KENDALL, 2005, p.637).

Para a obtenção das informações tridimensionais do objeto, primeiramente é necessária a coleção de um conjunto de imagens de projeção 2D dos raios X provenientes da absorção de raios X pela amostra. Cada imagem de projeção adquirida, também conhecida como imagem de sombra, é equivalente a uma imagem de raios X do objeto. A diferença entre uma imagem de projeção para a seguinte, refere-se a um deslocamento incremental que pode ser gerado por rotacionar o objeto, ou o feixe de raios X, dependendo do tipo de microtomógrafo utilizado. São obtidas imagens a partir de diferentes ângulos, para um passo de rotação constante, para uma variação angular total entre 0° e 360°, sendo possível utilizar rotações de 180°. A próxima etapa corresponde a fazer com que estas imagens de projeção convertam-se em seções tomográficas. Um computador é utilizado para controlar o processo de coleta das imagens e, através do *software* NRecon, disponibilizado pela *Bruker Skyscan*, as seções tomográficas são obtidas por reconstrução simultânea de todas as imagens de projeção. Uma vez obtidas as seções tomográficas, é possível obter os parâmetros quantitativos e qualitativos

de interesse para a análise, bem como a renderização 3D da amostra (RATTANASAK e KENDALL, 2005, p.638).

Para viabilizar a comparação dos valores da porosidade (%) dos concretos pré-carregados e de referência, a partir da análise de microtomografia de raios X e do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, as amostras foram extraídas dos mesmos cp's, conforme apresentado no item 4.2.7 (cimento CP V ARI, relação a/c=0,50, CAR=0% e 75%, idades de cura = 3 e 28 dias). Foram encaminhadas quatro amostras prismáticas ( $\cong$  15 mm x 15 mm x 30 mm), conforme Tabela 17.

Tabela 17: Amostras encaminhadas para análise de microtomografia de raios X

<i>Identificação das amostras para análise de microtomografia de raios X</i>		
<i>Pré-carregamento</i>	<i>Idade de cura</i>	
	<i>3 dias</i>	<i>28 dias</i>
0%	Amostra 22	Amostra 28
75%	Amostra 24	Amostra 30

Sendo:

Amostra 22: concreto de referência (car=0%), cura=3 dias;

Amostra 24: concreto pré-carregado (car=75%), cura=3 dias;

Amostra 28: concreto de referência (car=0%), cura=28 dias;

Amostra 30: concreto pré-carregado (car=75%), cura=28 dias;

As amostras 22 e 28 foram extraídas da região central dos cp's de referência, e as amostras 24 e 30 foram retiradas da região inferior (zona tracionada) dos cp's pré-carregados, conforme representação esquemática da Figura 52 (b) (seção 4.2.7).

As análises de microtomografia de raios X e determinação da porosidade (%) das amostras foram realizadas no LAMIR – Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da Universidade Federal do Paraná. O equipamento utilizado foi um microtomógrafo de raios X de alta resolução, da marca *Bruker SkyScan*, Modelo 1172. O potencial da fonte de raios X opera

dentro de um intervalo de 20-100 kV, a uma potência constante de 10 W<sup>97</sup>. A Figura 51 corresponde à fotografia do microtomógrafo utilizado.

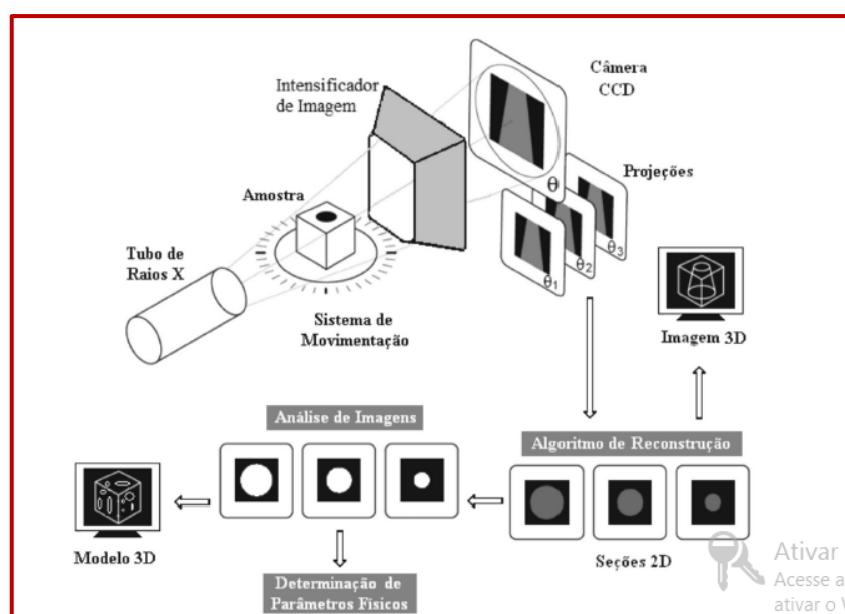
Figura 51: Microtomógrafo de Raios X com computador de gerenciamento.



Fonte: <http://www.lamir.ufpr.br/portal/179-2/>

A Figura 52 ilustra, através de uma representação esquemática, a sequência de estágios da análise de microtomografia de raios X para um sistema no qual o objeto rotaciona e o tubo de raios X permanece estático, incluindo aquisição, reconstrução e geração de modelos tridimensionais, de acordo com Fernandes e Appoloni (2009, p. 37).

Figura 52: Estágios de aquisição, reconstrução e geração de modelos tridimensionais da análise de microtomografia de raios X



Fonte: Fernandes e Appoloni (2009, p. 37)

<sup>97</sup><http://bruker-microct.com/products/1172.htm>



Uma das vantagens da técnica de microtomografia de raios X é que não requer uma preparação especial das amostras (FERNANDES *et al.*, 2016, p. 34; BERNARDES *et al.*, 2013<sup>98</sup>). Porém, a dimensão da amostra deve ser reduzida. No microtomógrafo 1172 da *SkyScan* o objeto deve possuir dimensões de até 25 mm, considerando uma aquisição simples e, de 50 mm, em uma aquisição acoplada. Com relação à obtenção das amostras a serem encaminhadas para a análise, tomou-se o cuidado para que a seção transversal não apresentasse dimensão superior ao limite de 25 mm. Buscou-se, também, obter amostras de geometria regular, na medida do possível, para facilitar a análise das projeções bidimensionais.

Para a aquisição das imagens de projeção, as amostras foram rotacionadas de 0° a 180°, com passos angulares de 0,4°, totalizando cerca de 450 projeções por amostra. Foi utilizado um filtro de Al+Cu para reduzir efeitos indesejáveis provenientes do feixe de raios X policromático sobre a amostra, conhecido como efeito de *beam hardening*<sup>99</sup>. O tamanho de pixel utilizado para a resolução das imagens foi de 8 µm e a câmera de detecção possuía resolução de 2000 x 1336 pixels. O potencial e a corrente da fonte corresponderam a 100 kV e 100 µA, respectivamente. O tempo de exposição para a aquisição de cada imagem de projeção foi de 1,3 segundos, e o tempo total de aquisição foi de aproximadamente 54 minutos, devido a efeitos de melhora da qualidade das imagens. Após a obtenção destas imagens de projeção, foram reconstruídas as seções tomográficas no *software* NRecon, gerando um total de mais de 1200 imagens de seção para serem avaliadas, por amostra. As análises foram realizadas através do *software* CT Analyser (CTAn)<sup>100</sup>, que é uma ferramenta computacional para a realização de medições quantitativas e construção de modelos visuais tridimensionais. Assim, esse aplicativo utiliza as imagens de seções tomográficas 2D armazenadas no banco de dados gerado pelo microtomógrafo *SkyScan*. No *software* CTAn foram definidas as regiões de interesse (ROI, de *Region of Interest*, em inglês) para a determinação da porosidade (%) de cada amostra. Um detalhe importante para a definição das áreas de interesse foi a exclusão das áreas correspondentes à brita. O processo pelo qual o *software* CTAn consegue distinguir diferentes fases materiais em uma única amostra, inclusive a presença ou não de poros, faz-se

---

<sup>98</sup>Rev. IBRACON Estrut. Mater.vol.6no.4São Paulo ago.2013, Versão *On-line* ISSN 1983-4195: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952013000400005>

<sup>99</sup>Efeito de endurecimento dos feixes de raios X, tem origem em fatores físicos tipicamente visualizados como espalhamentos de estrelas ou listras (SCARFE e FARMAN, 2008, *apud* PEGORARO, 2015, p.13)

<sup>100</sup>CTAn-Analyser CT Data Viewer, Versão 1.4.4 64-bit, *SkyScan*, WEB: [www.skyscan.be](http://www.skyscan.be)

por meio do processo de binarização. O *software* converte as imagens de seções tomográficas em imagens equivalentes, em escala de tons de cinza. Essa ferramenta computacional consegue distinguir 256 tons de cinza, sendo possível determinar intervalos de tons de cinza que dizem respeito aos poros, para a amostra real, e outros intervalos de tons de cinza, que correspondem à binarização, somente da amostra de concreto sem a brita.

Para a determinação da porosidade (%) de cada amostra, o sólido foi binarizado no intervalo de 36-255, na escala de cinza do aparelho. Assim, todo o sólido ficou branco, enquanto a região dos poros ficou preta, para todas as seções tomográficas. O volume da região sólida foi obtido e comparado com o volume total do sólido, considerando-se todo o volume da amostra. Desta maneira, foi possível obter o percentual do volume de poros e, assim, a porosidade da amostra. Os resultados da análise de microtomografia de raios X estão apresentados no Apêndice H.

#### **4.2.10 Ensaio para determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica**

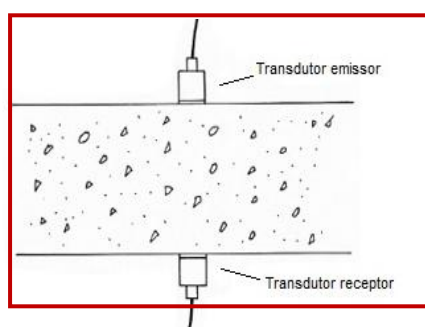
O ensaio para determinação da velocidade da onda ultrassônica é um ensaio não-destrutivo que tem como objetivos verificar a homogeneidade do concreto, detectar eventuais falhas internas, como falhas de concretagem, fissuras, entre outras imperfeições, e monitorar variações no concreto, ao longo do tempo, devido à agressividade do meio, segundo a NBR 8802 (ABNT, 2010). Considerando-se os métodos não-destrutivos disponíveis para a avaliação de estruturas, o ensaio ultrassônico é um dos mais promissores, pois o método possibilita verificar a homogeneidade do concreto. Sabe-se que, quanto mais homogêneo for o concreto, e quanto menor for sua relação  $a/c$ , maior será sua resistência (LORENZI *et al.*, 2003, p.1). Portanto, considerando-se que existe uma relação entre os danos existentes no interior do concreto e o decréscimo da velocidade da onda ultrassônica, realizou-se o ensaio para determinação da velocidade onda ultrassônica em cp's pré-carregados e de referência, conforme definições indicadas no item 4.2.1. Através da análise dos valores obtidos nas medições, buscou-se comparar a compacidade dos cp's pré-carregados e de referência.

O ensaio foi realizado no LAMTAC, utilizando-se um equipamento tipo PUNDIT LAB, 54 KHz. Buscando-se atender às determinações da NBR 8802 (ABNT, 2013), antes da realização das medições, tomou-se o cuidado de que as superfícies dos cp's prismáticos estivessem adequadamente planas, lisas e isentas de sujeira. Realizou-se, também, a devida aferição do equipamento, conforme item 3.6 da referida norma. Utilizou-se gel acoplante (vaselina) nas

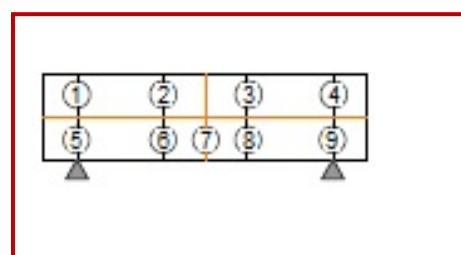
faces dos transdutores e do concreto, a fim de permitir o contato contínuo entre as superfícies, evitando-se erros de leitura.

O arranjo utilizado para a realização das medições foi o de transmissão direta, posicionando-se os transdutores nas faces opostas dos cp's, conforme Figura 53 (a). Buscou-se definir uma malha de pontos de leitura que permitisse verificar a homogeneidade de todo o cp. Para garantir o adequado alinhamento dos transdutores durante as medições, foram criados moldes de papelão com as mesmas dimensões das faces do cp, com 9 furos de mesmo diâmetro dos transdutores, conforme representação esquemática apresentada na Figura 53 (b). Para efetuar as medições, os moldes foram colocados junto às duas faces dos cp's, permitindo o correto posicionamento dos transdutores.

Figura 53: Representação esquemática da posição dos transdutores nos cp's e dos pontos de leitura



(a) Posição dos transdutores durante as medições (vista de cima)



(b) Pontos de leitura

Foram realizadas medições da espessura do cp nos alinhamentos das medições, correspondentes às distâncias (L) entre os pontos, para a determinação da velocidade (V), calculada através da Equação 23:

$$V = \frac{L}{t}$$

Equação 23

Onde:

V= velocidade de propagação, expressa em m/s;

L = distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores expressa em m;

t = tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção, expresso em s.

Sabendo-se que as condições de umidade da amostra, no momento de realização do ensaio, afetam os resultados, e considerando-se que a onda ultrassônica se desloca mais rapidamente em vazios preenchidos com água do que em vazios preenchidos com ar (MENDES, 2010, p. 18), as medições foram realizadas quando os cp's apresentavam as mesmas condições de umidade, para possibilitar a adequada comparação dos resultados.

## 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como descrito no *Capítulo 4*, os cp's prismáticos moldados com os cimentos CP V ARI e CP IV, submetidos a duas idades de cura (7 e 28 dias), foram ensaiados com base nos procedimentos propostos pela ASTM C 157 (ASTM, 2014). Os resultados das deformações devidas à retração por secagem ao longo do tempo estão apresentados em tabelas no *Apêndice B*. Cabe salientar que no ensaio preconizado pela ASTM C 157 (ASTM, 2014) os cp's devem permanecer em cura por um período de 28 dias e, a partir desse período, inicia-se a secagem dos mesmos em ambiente climatizado. Portanto, as deformações medidas correspondem à retração por secagem e, também, à retração autógena, que se manifesta com maior intensidade nas primeiras 24 horas, tendendo a diminuir ao longo do tempo (MOUNANGA *et al.*, 2004, p.255; MOUNANGA *et al.*, 2006, p. 110; BAROGHELBOUNY, 2006, p. 124). Durante esse período, os concretos permanecem em cura submersa. Assim, como forma de simplificação, nesta pesquisa adotou-se o termo retração por secagem, ainda que exista uma contribuição devida à retração autógena. A magnitude da retração autógena em concretos com maiores relações a/c pode ser considerada desprezível. Essa hipótese simplificadora foi mencionada em outras pesquisas (SILVA, 2007, p.162; RODRIGUES, 2010, p. 95) nas quais também foi adotada a mesma norma como referência para determinação da retração livre de cp's. Ressalta-se, assim, que nesta pesquisa não foram realizadas medições da retração autógena dos concretos.

Neste capítulo apresenta-se, inicialmente, uma comparação dos valores da retração final dos concretos de referência, correspondente ao tempo de secagem TS=64 semanas, com os resultados obtidos aplicando-se a modelagem proposta no CEB-FIP<sup>101</sup> *Model Code 1990* (COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990, p. 68). Os parâmetros e o detalhamento adotados na aplicação da modelagem proposta pelo CEB-FIP *Model Code 1990*, bem como os resultados obtidos, estão descritos no Apêndice C.

---

<sup>101</sup> CEB: Comité Européen Du Béton; FIP: Fédération Internationale de la Précontrainte

Posteriormente, apresenta-se a análise estatística dos resultados obtidos no ensaio de retração livre, durante a ETAPA 1 do programa experimental da tese, bem como o resultado das análises complementares, realizadas na ETAPA 2.

## 5.1 COMPARAÇÃO DA RETRAÇÃO DOS CONCRETOS DE REFERÊNCIA, NO TEMPO DE SECAGEM DE 64 SEMANAS, COM OS VALORES CALCULADOS A PARTIR DO MODELO DO CEB-FIP MODEL CODE 1990

Os procedimentos propostos pela ASTM C 157 (ASTM, 2014), embora amplamente utilizados em pesquisas que abordam a retração por secagem ou retração livre de concretos, podem conduzir à variabilidade dos resultados. Conforme descrito no capítulo anterior, mesmo adotando-se algumas medidas preventivas durante a realização dos ensaios, podem ocorrer discrepâncias entre os resultados obtidos em diferentes pesquisas, como mencionado por RODRIGUES (2010, p. 96). Tendo em vista a importância da verificação da consistência dos resultados obtidos, a primeira etapa da análise consistiu em comparar as retrações calculadas após o término dos ensaios (deformação residual), com os resultados obtidos através da modelagem proposta pelo CEB-FIP *Model Code* 1990 (COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990, p. 68). O modelo proposto permite prever o desenvolvimento da retração por secagem ao longo do tempo, obtendo-se o valor da deformação residual, considerando-se um coeficiente de variação de predição da retração de 32,9%, sendo o erro de predição da retração final de 19%, aproximadamente. O modelo foi formulado usando apenas funções matemáticas ao invés de tabelas e figuras, e foi desenvolvido com base em um banco de dados gerado a partir de testes de laboratório. Para a predição da deformação residual devida à retração, o CEB-FIP *Model Code* 1990 (COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990, p. 68) levou em consideração a resistência média à compressão, as dimensões do elemento estrutural, a duração da secagem, além da temperatura e umidade relativa do ambiente. O modelo é válido para concretos estruturais com densidade normal, tipicamente na faixa de 2240 e 2400 kg/m<sup>3</sup> (COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990, p. 67; KIVRAK *et al.*, 2006, p. 16), curados a uma temperatura compreendida na faixa de 5°C a 30°C e umidade relativa de 40% a 100%, por período não superior a 14 dias. Salienta-se, contudo, que nesta pesquisa o modelo do CEB-FIP *Model Code* 1990 foi aplicado às duas idades de cura (7 e 28 dias), como forma de

comparação dos resultados. As Figuras 54 e 55 permitem comparar as deformações devidas à retração por secagem, na idade de 448 dias/64 semanas, conforme resultados obtidos nesta pesquisa e as deformações calculadas a partir da aplicação do modelo proposto pelo CEB-FIP *Model Code* 1990 (COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, 1990, p. 68), relativas aos cp's de referência, isto é, não submetidos ao pré-carregamento.

Figura 54: Retração dos concretos de referência no tempo de secagem

TS=64 semanas: CP V ARI

a) Cura 28 dias; b) Cura 7 dias

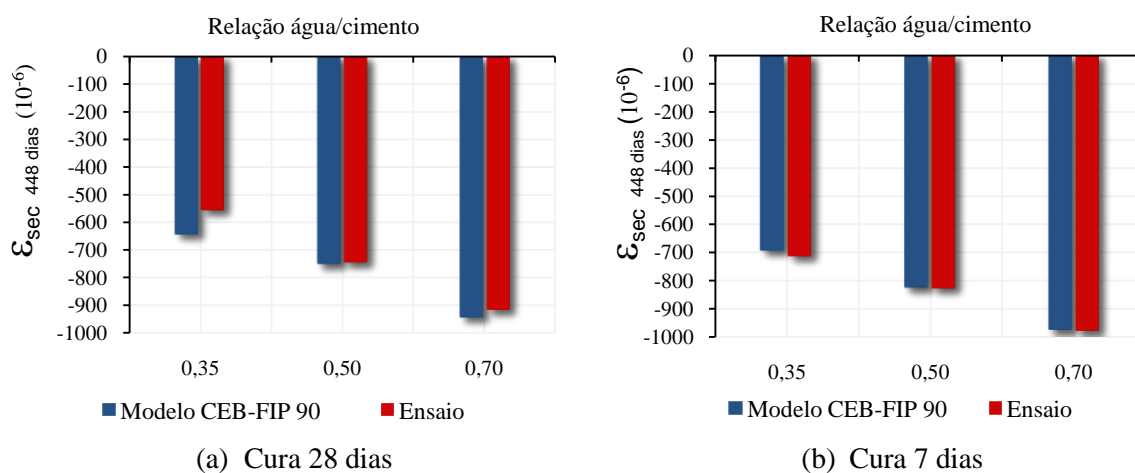
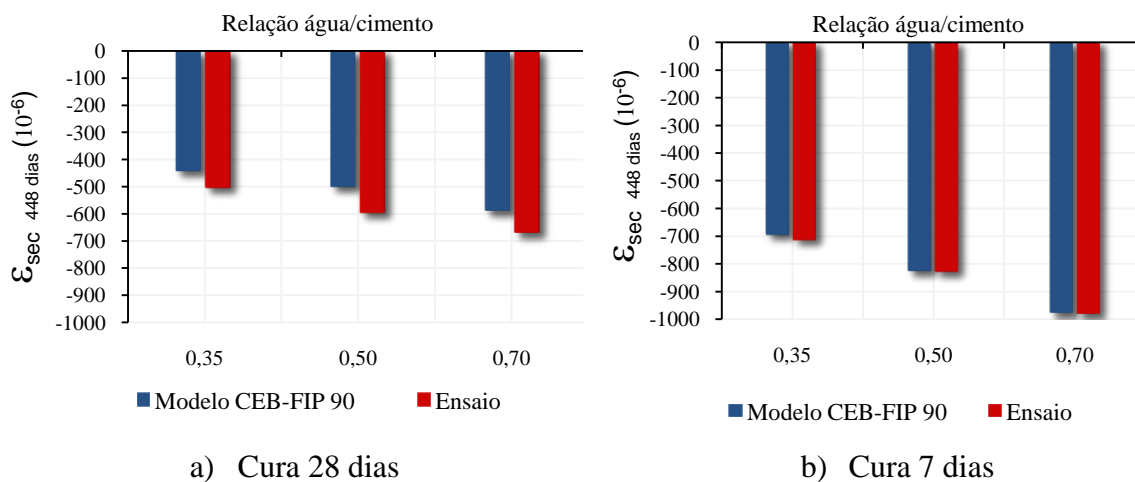


Figura 55: Retração dos concretos de referência no tempo de secagem

TS=64 semanas: CP IV

a) Cura 28 dias; b) Cura 7 dias



É possível observar que os valores da retração obtidos nos ensaios, no tempo de secagem TS=64 semanas, foram compatíveis com os valores modelados, considerando-se as variações devidas às idades de cura, relações a/c e tipos de cimento adotados. Com relação aos

concretos moldados com o cimento CP V ARI, a maior diferença foi verificada nos cp's com relação  $a/c=0,35$  e cura=28 dias, que apresentaram retração final 13,50% menor em relação ao valor correspondente, obtido aplicando-se o modelo adotado. As menores diferenças foram verificadas nos cp's com relação  $a/c=0,50$ , curas=7 e 28 dias, cujos valores de retração foram 0,50% menores em relação aos valores modelados correspondentes. Quanto aos concretos moldados com cimento CP IV, a maior diferença foi verificada nos cp's com relação  $a/c=0,50$  e cura=28 dias, que apresentaram valores de retração nos ensaios 19,17% maiores do que os valores modelados. Salienta-se que, neste caso, utilizou-se o Modelo CEB - FIP *Model Code* 1990 para uma idade de cura superior (28 dias) à idade limite estabelecida no modelo (14 dias). E, mesmo assim, a diferença obtida foi praticamente igual ao erro de predição do modelo. A menor diferença foi obtida para os concretos com relação  $a/c=0,70$  e cura=7 dias, cujos valores de retração nos ensaios foram 10,94% maiores em relação aos valores modelados.

## 5.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM

Para a realização da análise dos resultados obtidos nos ensaios, buscou-se escolher o método estatístico mais adequado ao tipo de projeto experimental. O cálculo da retração por secagem dos concretos foi realizado utilizando-se as medições do comprimento de cada cp de concreto moldado. Tais medições foram realizadas diversas vezes ao longo do tempo de duração do ensaio (64 semanas), para cada cp, constituindo-se, portanto, num projeto longitudinal. Estudos longitudinais caracterizam-se por avaliar o comportamento de uma variável de resposta ao longo de uma dimensão específica, como por exemplo, distância, profundidade ou tempo (RODRIGUES, 2009, p.3). No presente caso, o tempo foi utilizado como dimensão principal. Uma abordagem indicada para a análise de projetos longitudinais consiste em utilizar a *Análise de Variância* (ANOVA).

Assim, nesta pesquisa, os resultados foram analisados estatisticamente através da ANOVA. Os *Modelos de Regressão Linear* foram aplicados para a modelagem do comportamento da retração por secagem com diferentes idades de cura, a partir dos resultados obtidos nos ensaios, para o tempo de secagem  $TS=64$  semanas, idade final do ensaio. Realizou-se, também, a *Comparação Múltipla de Médias* relativa aos resultados obtidos para essa mesma idade (64 semanas). Para a realização da *Análise de Variância* (ANOVA) dos resultados



utilizou-se, como ferramenta computacional, o *software Statistica 7.0*<sup>102</sup>, e, para a obtenção dos *Modelos de Regressão Linear e Comparação Múltipla de Médias*, o *software Microsoft Office Excel 2007*.

### 5.2.1 Apresentação dos resultados da análise de variância (ANOVA)

Para verificar a influência das variáveis adotadas (*tempo de secagem, relação a/c, pré-carregamento, idade de pré-carregamento e idade de cura*) na variável de resposta (*retração por secagem*), a ANOVA foi aplicada aos resultados obtidos no ensaio de retração por secagem para ambos os cimentos. Analisando-se os valores obtidos para o Teste F, foram verificadas as correlações entre cada variável independente e a variável de resposta. Além disso, através dos valores obtidos para  $p$ , em cada variável, foi possível identificar se as variáveis exerceram influência significativa, ou não, na retração por secagem.

Através dos próximos itens, são apresentados gráficos comparativos do efeito isolado de cada variável independente na retração por secagem, para ambos os cimentos, bem como dos efeitos das interações entre essas variáveis, conforme a significância estatística. Foram admitidas apenas interações até a terceira ordem.

As Tabelas 18 e 19 apresentam os resultados da ANOVA para os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente, e os parâmetros dos modelos.

---

<sup>102</sup><http://www.statsoft.com>

Tabela 18: Avaliação estatística através da ANOVA: CP V ARI

## Parâmetros do Modelo

R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustado	SQ	GL	MQ	Testes F	p
0,95	0,90	0,88	109522998	219	500105	45	0,00

Parâmetros	SQ	GL	MQ	Teste F	p	SIG
A: tempo de secagem	66662273	5	13332455	1199,55	0,000000	SIM
B: idade de cura	13758570	1	13758570	1237,89	0,000000	SIM
C: relação água/cimento	1491247	2	745624	67,09	0,000000	SIM
D: pré-carregamento	2641042	3	880347	79,21	0,000000	SIM
E: idade de pré-carregamento	65506	2	32753	2,95	0,052930	NÃO
A x B	5818625	5	1163725	104,70	0,000000	SIM
B x C	192696	2	96348	8,67	0,000184	SIM
A x C	997973	10	99797	8,98	0,000000	SIM
B x D	257137	3	85712	7,71	0,000042	SIM
A x D	1768987	15	117932	10,61	0,000000	SIM
C x D	4222591	6	703765	63,32	0,000000	SIM
A x E	189378	10	18938	1,70	0,075076	NÃO
B x E	71574	2	35787	3,22	0,040347	SIM
C x E	2624593	4	656148	59,04	0,000000	SIM
D x E	769159	6	128193	11,53	0,000000	SIM
B x A x C	1447458	10	144746	13,02	0,000000	SIM
B x A x D	469494	15	31300	2,82	0,000251	SIM
B x C x D	349249	6	58208	5,24	0,000025	SIM
A x C x D	1601192	30	53373	4,80	0,000000	SIM
B x A x E	114757	10	11476	1,03	0,413408	NÃO
B x C x E	190857	4	47714	4,29	0,001888	SIM
A x C x E	604006	20	30200	2,72	0,000070	SIM
B x D x E	142540	6	23757	2,14	0,046795	SIM
A x C x B	283601	30	9453	0,85	0,698136	NÃO
C x D x E	2552062	12	212672	19,13	0,000000	SIM
ERRO	11959268	1076	11115			

Onde: SQ=Soma Quadrada; GL=Graus de Liberdade; MQ=Média Quadrada; P=Probabilidade; SIG=Significância

É possível observar que, para o cimento CP V ARI, a variável independente *idade de pré-carregamento* não exerceu influência significativa na retração por secagem. Da mesma forma, não foram significativas a interação de segunda ordem entre as variáveis: *tempo de secagem* e *idade de pré-carregamento*, e as interações de terceira ordem entre as variáveis:

- *idade de cura, tempo de secagem e idade de pré-carregamento;*
- *tempo de secagem, relação a/c e idade de cura.*

Tabela 19: Avaliação estatística através da ANOVA: CP IV

## Parâmetros do Modelo

R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Ajustado	SQ	GL	MQ	Testes F	p
0,95	0,90	0,88	123797759	219	565287	43,24	0,00

Parâmetros	SQ	GL	MQ	Teste F	P	SIG
A: tempo de secagem	85166593	5	17033319	1302,81	0,000000	SIM
B: idade de cura	11637319	1	11637319	890,09	0,000000	SIM
C: relação água/cimento	2599562	2	1299781	99,41	0,000000	SIM
D: pré-carregamento	1334766	3	444922	34,03	0,000000	SIM
E: idade de pré-carregamento	1363012	2	681506	52,13	0,000000	SIM
AxB	8107402	5	1621480	124,02	0,000000	SIM
AxC	1321936	10	132194	10,11	0,000000	SIM
BxC	325002	2	162501	12,43	0,000005	SIM
AxD	452178	15	30145	2,31	0,003145	SIM
BxD	609168	3	203056	15,53	0,000000	SIM
CxD	3130031	6	521672	39,90	0,000000	SIM
AxE	554673	10	55467	4,24	0,000008	SIM
BxE	10188	2	5094	0,39	0,677410	NÃO
CxE	364704	4	91176	6,97	0,000015	SIM
DxE	1290383	6	215064	16,45	0,000000	SIM
AxBxC	1592990	10	159299	12,18	0,000000	SIM
AxBxD	417519	15	27835	2,13	0,007162	SIM
AxCxD	894500	30	29817	2,28	0,000114	SIM
BxCxD	573051	6	95509	7,31	0,000000	SIM
AxBxE	45897	10	4590	0,35	0,966492	NÃO
AxCxE	294123	20	14706	1,12	0,316605	NÃO
BxCxE	298071	4	74518	5,70	0,000154	SIM
AxDxE	370563	30	12352	0,94	0,552515	NÃO
BxDxE	43076	6	7179	0,55	0,770910	NÃO
CxDxE	726755	12	60563	4,63	0,000000	SIM
ERRO	14067946	1076	13074			

Onde: SQ=Soma Quadrada; GL=Graus de Liberdade; MQ=Média Quadrada; P=Probabilidade; SIG=Significância

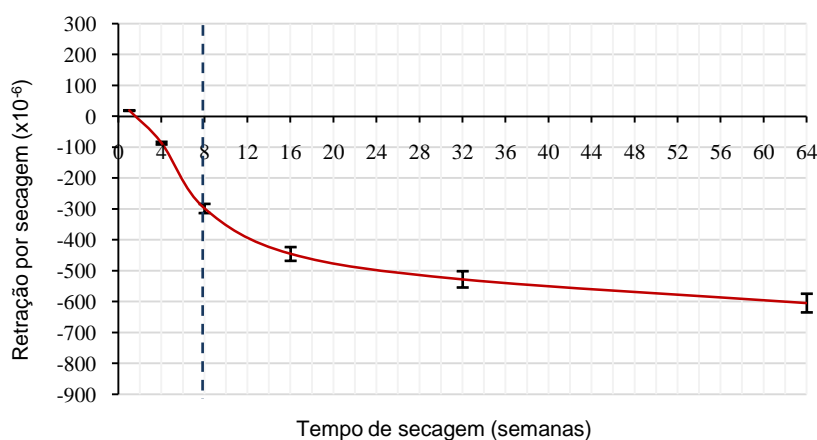
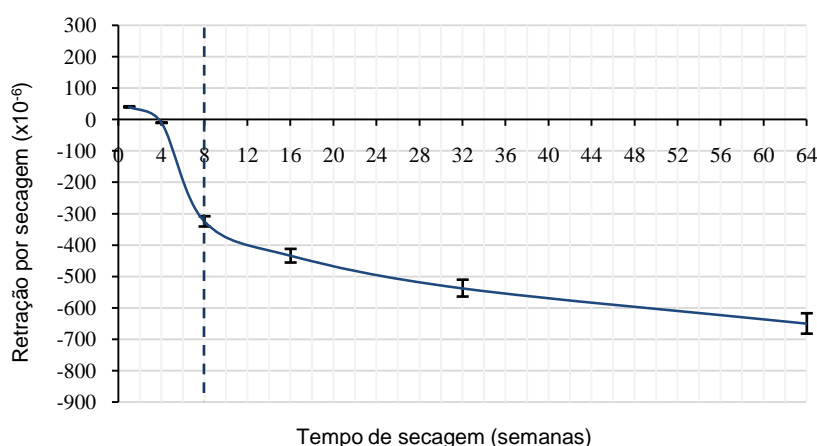
Para o cimento CP IV, todas as variáveis independentes exerceram influência significativa na retração por secagem. Não foram significativas a interação de segunda ordem entre as variáveis: *idade de cura* e *idade de pré-carregamento* e, também, as interações de terceira ordem entre as variáveis:

- *tempo de secagem, idade de cura e idade de pré-carregamento;*
- *tempo de secagem, relação a/c e idade de pré-carregamento;*
- *tempo de secagem, pré-carregamento e idade de pré-carregamento;*
- *idade de cura, relação a/c e idade de pré-carregamento.*

#### 5.2.1.1 Efeito isolado da variável *tempo de secagem*

Conforme Tabelas 18 e 19, a variável *tempo de secagem* exerceu influência na retração por secagem, pois é estatisticamente significativa para ambos os cimentos. Esse resultado já era esperado, uma vez que, assim como a resistência, o módulo de elasticidade e a fluência, a retração é uma propriedade do concreto dependente do tempo. A magnitude da retração por secagem varia ao longo do tempo em função das condições ambientais, além de outros fatores como maturidade, porosidade e resistência do concreto. Portanto, é de grande importância prática o conhecimento do teor e da distribuição da umidade interna, em diferentes momentos da vida útil da estrutura (XI *et al.*, 1994, p. 248; KIM e LEE, 1999, p.1921). Após o término da cura, o concreto está praticamente saturado de água. Como visto no item 3.2 do Capítulo 3, a secagem inicia quando o concreto está inserido em ambiente cuja umidade relativa situa-se em torno de 60%. O movimento da água em concretos expostos ao ambiente ocorre devido ao processo de difusão, havendo a distribuição de umidade através da seção transversal de concreto, de forma não-linear (WITTMANN e ROELFSTRA, 1980, p. 603; BAZANT e KIM, 1991, p. 323; KIM e LEE, 1999, p.1921).

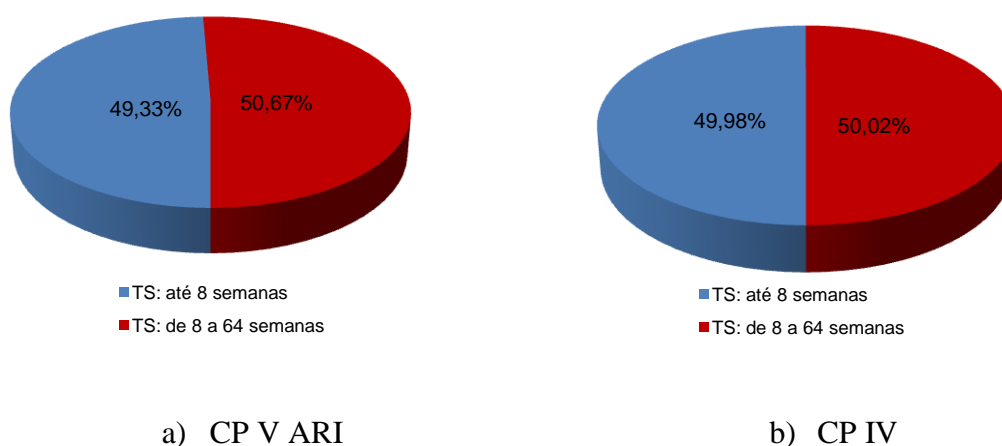
As Figuras 56 e 57 apresentam gráficos dos valores médios da retração no período entre o término da cura (7 e 28 dias) e o término do ensaio (448 dias/64 semanas) para os concretos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente. Conforme mostram as referidas figuras, nesta pesquisa observaram-se duas tendências de comportamento da retração, caracterizando a existência de dois períodos distintos ao longo do tempo.

Figura 56: Efeito isolado da variável *tempo de secagem*: CP V ARIFigura 57: Efeito isolado da variável *tempo de secagem*: CP IV

O primeiro período, que se inicia a partir do término da cura (início da secagem) e se estende até a 8ª semana, apresenta maior variação da retração por secagem. Já no segundo, que corresponde ao período entre a 8ª semana até o final do ensaio, a secagem é mais lenta e, portanto, a retração por secagem caracteriza-se por apresentar menor variação. Provavelmente, se o tempo de duração do ensaio fosse maior, o desenvolvimento das curvas da retração em função do tempo de secagem tenderia a valores assintóticos. A secagem das camadas superficiais do concreto tende a ser mais acentuada, por esta razão o equilíbrio entre a umidade do concreto e a UR% do ambiente também é atingido mais rapidamente (WITTMANN *et al.*, 2009, p. 15). Já o avanço da frente de secagem para as camadas mais internas ocorre de forma lenta e gradual, até que seja atingido o equilíbrio da umidade do concreto com a UR% circundante. Em algumas estruturas, gradientes de umidade podem existir por muito tempo, logo, o equilíbrio entre o núcleo mais interno do concreto e a UR%

do ambiente pode até levar anos para ser atingido, dependendo das dimensões do elemento. As Figuras 58 (a) e (b) apresentam gráficos que permitem visualizar os percentuais da retração média em função da retração final obtida no ensaio durante esses dois períodos, para os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Figura 58: Percentuais da retração média, em função da retração final



Onde: TS = tempo de secagem

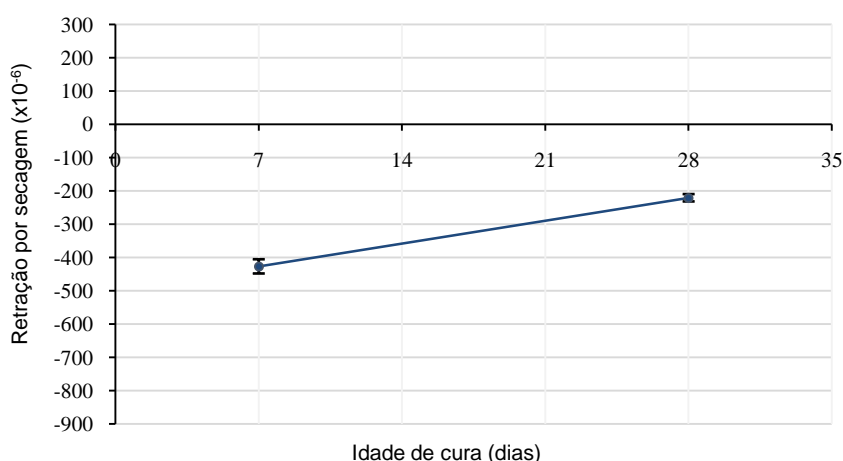
Observa-se que ambos os cimentos apresentam o mesmo comportamento frente à variável *tempo de secagem*, isto é, praticamente 50% da retração média ocorrem no primeiro período (8 semanas iniciais), que corresponde a apenas 12,50% da duração total do ensaio (64 semanas). Considerando-se que a secagem das camadas superficiais ocorre mais rapidamente, a taxa da retração é maior no período inicial de secagem e, portanto, as deformações por retração aumentam rapidamente durante o período inicial (SAKATA, 1982, p.219; ABBASNIA *et al.*, 2009, p.96). Bissonnette *et al.* (1999, p. 1659) estudaram o efeito de alguns fatores importantes na retração por secagem de materiais cimentícios, como UR (%) do ar, tamanho do cp, relação a/c e volume da pasta. Foram testados concretos, argamassas e pastas, submetidos a diferentes UR (%) do ar. Os resultados em pastas de cimento mostraram que a taxa de secagem foi extremamente rápida, visto que após um dia já havia sido atingido cerca de 60% da retração última. Para os cp's de argamassa e concreto, considerando-se as mesmas condições de exposição, as taxas de secagem foram menores em relação às obtidas para as pastas, devido à influência do tamanho dos cp's. Contudo as maiores taxas de secagem também ocorreram durante a primeira metade da duração dos ensaios. Os autores concluíram que o tamanho dos cp's influenciou a taxa da secagem, mas não afetou significativamente a

deformação última por retração medida (BISSONNETTE *et al.*, 1999, p.1661). Al-Saleh e Al-Zaid (2006, p.1991) estudaram o efeito do tamanho dos cp's e das condições de secagem nas deformações causadas por retração. Os resultados dos pesquisadores indicaram, também, que para as mesmas condições de exposição e de tamanho de cp, a taxa de secagem é mais pronunciada na primeira metade do tempo de duração do ensaio.

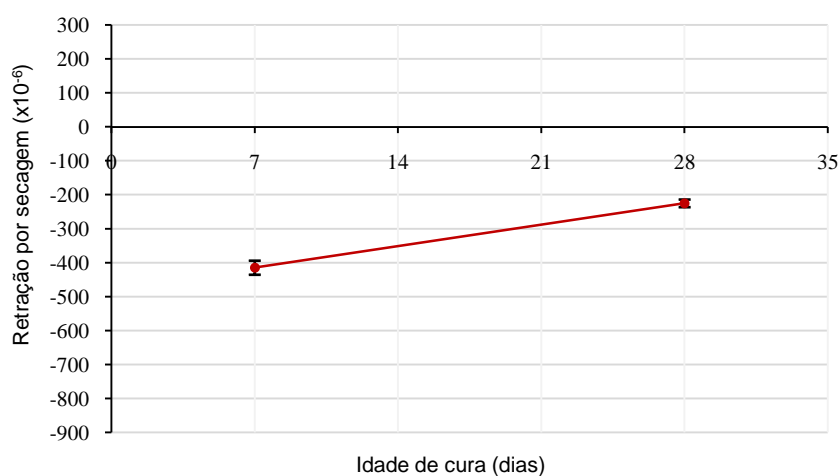
#### 5.2.1.2 Efeito isolado da variável *idade de cura*

A variável *idade de cura* exerceu influência significativa na retração por secagem para ambos os cimentos estudados, conforme Tabelas 18 e 19. Os valores obtidos para o Teste F indicaram que a correlação entre a variável *idade de cura* e variável dependente *retração por secagem* foi maior para os concretos produzidos com CP V ARI. As Figuras 59 e 60 apresentam o efeito isolado dessa variável para os concretos com ambos os cimentos.

Figura 59: Efeito isolado da variável *idade de cura*: CP V ARI



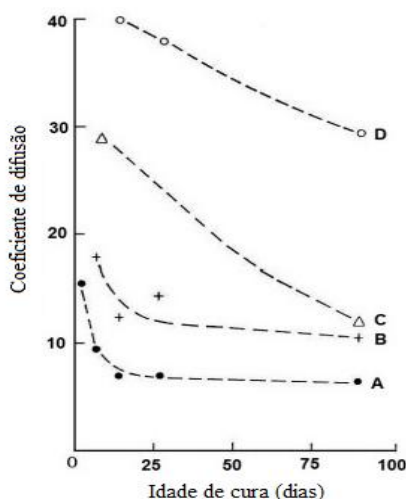
A cura prolongada favoreceu a redução das deformações devidas à retração por secagem para os concretos produzidos com ambos os cimentos. Para os concretos com CP V ARI, houve uma redução de 48% na retração média dos cp's curados por 28 dias em relação aos curados por 7 dias e, para os concretos moldados com CP IV, a redução foi de aproximadamente 46%.

Figura 60: Efeito isolado da variável *idade de cura*: CP IV

À medida que as reações de hidratação do cimento se desenvolvem, ocorrem alterações na umidade relativa interna dos poros. Em toda a seção do elemento de concreto, o conteúdo de água reduz devido ao seu consumo nas reações químicas ligadas à hidratação do cimento, de modo mais acentuado no seu núcleo (BAROGHEL-BOUNY, 2002, p.42). Em paralelo, ocorre a perda de água, por evaporação, se o ambiente circundante estiver mais seco do que os poros do concreto. De acordo com Coussy e Brisard (2009, p. 263), quando um material poroso está sujeito a uma umidade relativa externa mais baixa do que sua umidade relativa interna, o desequilíbrio termodinâmico do vapor força o material poroso a trocar vapor de água com o meio. Assim, paulatinamente, ocorre a saída da água líquida do concreto, causando a redução do seu grau de saturação para manter o equilíbrio de umidade com o ambiente. O movimento da água no concreto, desde as camadas mais internas até a superfície, é regido pela difusão de umidade, que é o principal processo de transporte de água ligado à secagem. Nas idades iniciais, no entanto, a variação da umidade do concreto ocorre também devido à autodessecação decorrente da hidratação do cimento, fenômeno que é mais intenso para baixas relações *a/c* (KIM e LEE, 1999, p. 1921; KANG *et al.*, 2011, p. 181). O coeficiente de difusão é influenciado pela formação da microestrutura e pelo grau de hidratação (KANG *et al.*, 2012, p. 184). À medida que o grau de hidratação aumenta, promovendo a formação e densificação da microestrutura, o coeficiente de difusão diminui. Sabendo-se que um dos efeitos benéficos da cura é possibilitar o aumento do grau de hidratação, pode-se dizer, também, que a cura reduz a difusão de água nos materiais cimentícios, contribuindo para a mitigação da retração, conforme Figura 61.



Figura 61: Coeficiente de difusão da água em materiais cimentícios, em função da idade de cura



Fonte: Likov<sup>103</sup>, 1954, *apud* Toplicic-Curcic *et al.*, 2012, p. 136

Sendo:

A: pasta de cimento Portland,

B: pasta de cimento de aluminato de cálcio

C: argamassa de cimento Portland com agregado calcário,

D: Concreto de cimento Portland

Outro fator de extrema importância a ser considerado é a influência da cura na capacidade resistente do concreto. Sabe-se que as reações de hidratação só podem ocorrer satisfatoriamente sob condições de saturação, sendo praticamente interrompidas quando a pressão de vapor da água, nos capilares, cai abaixo de 80% da umidade de saturação (MEHTA e MONTEIRO, 2006, p. 37). A cura prolongada diminui a difusão de umidade, como mencionado, impedindo que a redução da umidade interna afete o grau de hidratação (KANG *et al.*, 2012, p. 184). Assim, como a cura garante o aumento do grau de hidratação, o volume dos produtos sólidos da hidratação, entre os quais, os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que são os principais responsáveis pela resistência do concreto, também aumenta. Ao mesmo tempo, o volume dos vazios de ar presentes na mistura fica reduzido, promovendo a densificação da matriz e aumentando sua capacidade resistente. Segundo Neville (1995, p. 435), a pasta de cimento hidratada contém menos água e se torna mais resistente com a idade, tornando-se capaz de resistir a uma fração maior da retração, sem fissurar. Além disso, a

<sup>103</sup> Drying Theory, Didactical and Pedagogical Publishing House, Bucharest 1954

continuidade da hidratação, possibilitada através da cura prolongada, exerce um papel fundamental na selagem ou consolidação de microfissuras, reduzindo a permeabilidade do concreto e contribuindo para a recuperação, pelo menos parcial, de sua resistência, como apresentado no item 3.7.3.2 do Capítulo 3.

Diante do exposto, pode-se dizer que a cura prolongada, influenciando o grau de hidratação, exerce um duplo efeito benéfico: por um lado, diminui a velocidade da saída da água do concreto (taxa da retração), devido à redução da difusão de umidade e, por outro, aumenta a capacidade resistente do concreto, diminuindo o grau de deformação por secagem.

#### 5.2.1.3 Efeito isolado da variável *relação água/cimento*

A variável *relação a/c* exerceu influência significativa nas deformações causadas pela secagem, para ambos os cimentos estudados. As Figuras 62 e 63 mostram o efeito da variável *relação a/c* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Além de influenciar a cinética da hidratação, a relação a/c define a quantidade de sólidos por unidade de volume da pasta, afetando diretamente a densidade do material (RECENA, 2014, p. 46). Considerando-se o mesmo grau de hidratação, a porosidade aumenta para relações a/c maiores.

Figura 62: Efeito isolado da variável *relação a/c*: CP V ARI

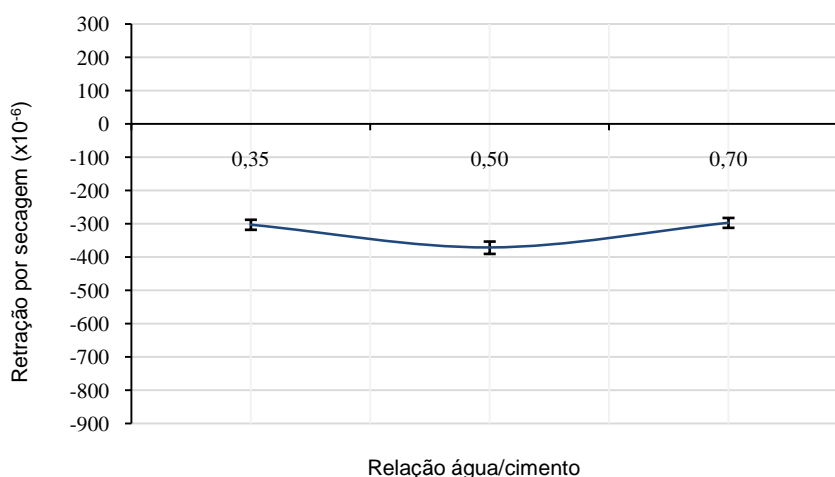
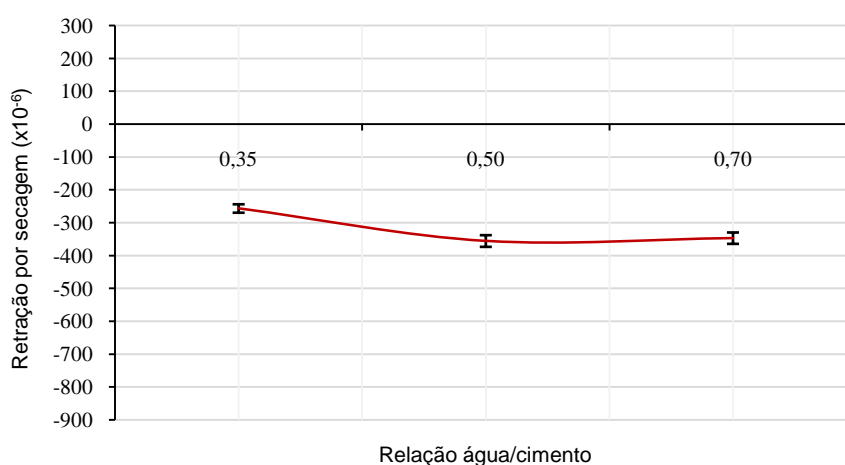
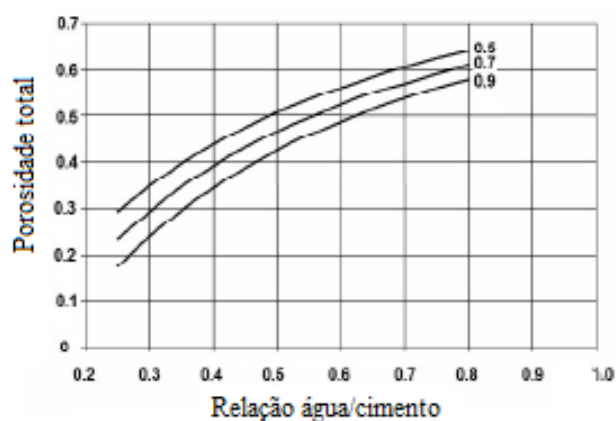


Figura 63: Efeito isolado da variável *relação a/c*: CP IV

A Figura 64 apresenta um gráfico da porosidade total da pasta de cimento Portland em função da relação *a/c*, para diferentes graus de hidratação (0,5; 0,7 e 0,9). Como pode ser observado através do gráfico, aumentando-se a relação *a/c* ocorre o aumento da porosidade total e, para uma determinada relação *a/c*, à medida que o grau de hidratação diminui, a porosidade aumenta.

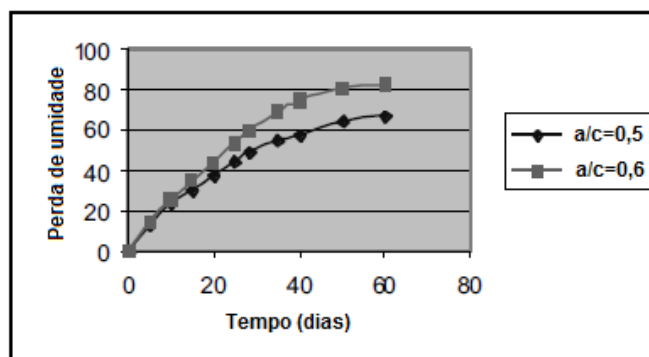
Figura 64: Efeito da porosidade total em função da relação *a/c*, para diferentes graus de hidratação (0,5; 0,7 e 0,9) em pastas de cimento Portland

Fonte: Powers<sup>104</sup>, 1958 *apud* Toplicic-Curcic *et al.*, 2012, p. 136

A Figura 65 ilustra o efeito da variação da relação *a/c* na quantidade de umidade perdida, ao longo do tempo.

<sup>104</sup>Powers, T.C. The physical structure and engineering properties of concrete, Portland Cement Assoc Res Dept 1958:90.

Figura 65: Efeito da relação  $a/c$  na perda de umidade durante a secagem



Fonte: Abbasnia et al., 2009, p. 96

Embora a taxa de perda de umidade seja aproximadamente constante, de acordo com o gráfico observa-se que a quantidade de umidade perdida aumenta para relações  $a/c$  maiores (BAŽANT<sup>105</sup>, *apud* ABBASNIA *et al.*, 2009, p. 96). Neville<sup>106</sup> (1995, *apud* MOKAREM, 2002, p.4) salienta que o volume de água perdida do concreto não é exatamente igual à variação de volume, considerando-se que inicialmente ocorre a perda de água livre, que provoca pouca ou nenhuma retração. À medida que a secagem prossegue, a água adsorvida é removida dos pequenos capilares (<50 nm), onde se mantém sob tensão hidrostática. Nestas condições, a perda de água pode levar à retração. O aumento da relação  $a/c$  provoca o aumento da difusão da umidade, para umidades baixas (BAŽANT, 1993, p. 174), influenciando indiretamente a retração, cuja magnitude tende a aumentar. Relações  $a/c$  maiores levam à redução da resistência e rigidez da pasta, aumentando a retração do concreto (MOKAREM, 2002, p.4).

Observando-se as variações da retração por secagem, em função dos níveis da variável *relação a/c*, apresentadas no Quadro 8, é possível dizer que os resultados obtidos nesta pesquisa foram diferentes do esperado.

<sup>105</sup> Daniele, F. e Bažant, Z.P. Stability of ancient masonry towers: Stress redistribution due to drying, carbonation and creep. *Cement and Concrete Research*. Julho 2006, p:1389-1398

<sup>106</sup> Neville, A.M. *Properties of Concrete*. 1995. Longman Group Limited. 844p.

Quadro 8: Variações da retração média em função dos níveis da variável *relação a/c*: CP V ARI e CP IV

Relação a/c	CP V ARI	CP IV
0,35→0,50	19%	31%
0,50→0,70	20%	2,50%
0,35 → 0,70	1%	26%

 →Aumento       →Redução

Conforme se observa, para ambos os cimentos não ocorreu aumento da retração média com o aumento da relação *a/c*, para todos os níveis desta variável. Este resultado está ligado, provavelmente, à influência do pré-carregamento. O efeito da interação das variáveis *relação a/c* e *pré-carregamento* será discutido no item 5.2.1.11, possibilitando maior entendimento. Verifica-se, através do Quadro 8, que para ambos os cimentos ocorreu aumento da retração média para os concretos com relação *a/c*=0,50, em relação aos concretos com relação *a/c*=0,35, como esperado, sendo que esse aumento foi mais acentuado para os concretos com CP IV. No entanto, principalmente para o cimento CP V ARI, a retração média dos concretos com relação *a/c*=0,70 foi menor (20%) em comparação à dos concretos com relação *a/c*=0,50. Para o cimento CP V ARI, praticamente não houve variação entre os valores médios da retração por secagem dos concretos com relações *a/c*=0,35 e *a/c*=0,70.

#### 5.2.1.4 Efeito da interação das variáveis: *tempo de secagem* e *idade de cura*

A interação de segunda ordem entre as variáveis *tempo de secagem* e *idade de cura* exerceu influência significativa na retração por secagem dos concretos investigados, sendo a interação mais forte, para ambos os cimentos. Os gráficos das Figuras 66 e 67 mostram o efeito dessa interação para os concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Para os concretos produzidos com ambos os cimentos, os benefícios da cura até 28 dias se refletiram em valores menores da retração média, ao longo do tempo. Conforme considerações apresentadas no item 5.2.1.2, a cura prolongada exerceu um efeito mitigador da retração por secagem. Consequentemente, as retrações residuais também apresentaram magnitudes menores. No tempo de secagem  $TS=8$  semanas, os concretos com o cimento CP V ARI, submetidos à cura de 28 dias, apresentaram uma redução de 56% da retração média, em comparação aos concretos curados até 7 dias.

Figura 66: Efeito da interação das variáveis *tempo de secagem* e *idade de cura*: CP V ARI

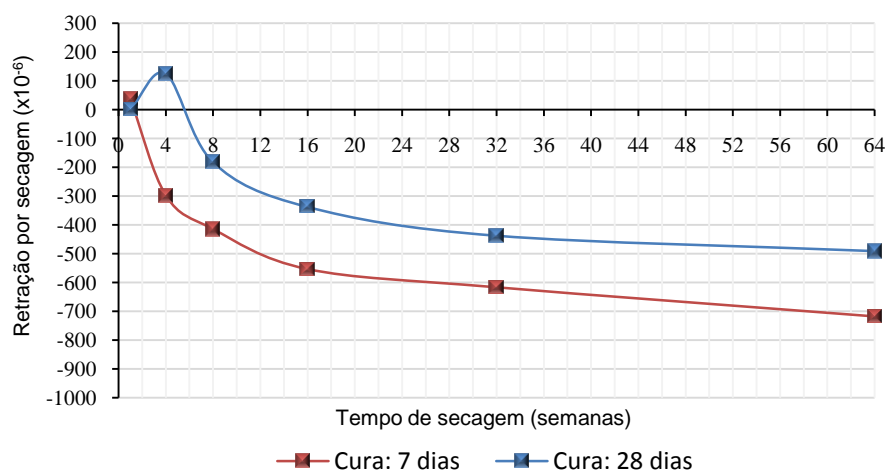
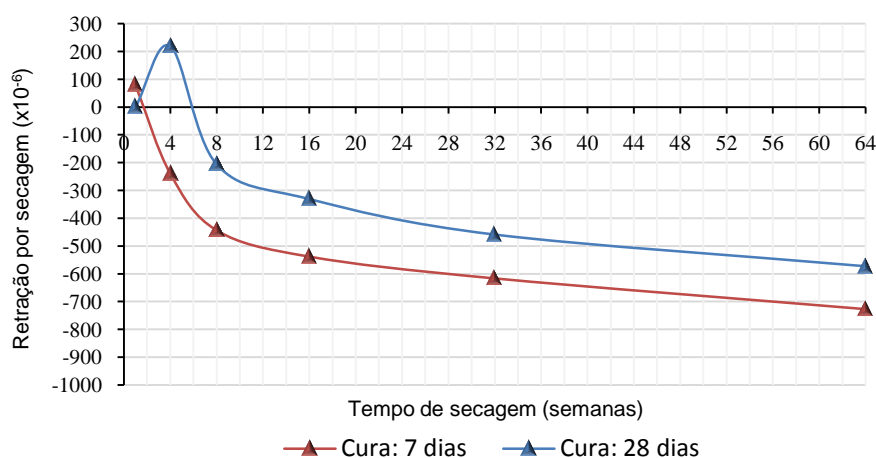


Figura 67: Efeito da interação das variáveis *tempo de secagem* e *idade de cura*: CP IV



No tempo de secagem TS=64 semanas, essa redução foi de 32%. Para os concretos com CP IV, a redução dos valores da retração média em função da cura prolongada também foi importante, correspondendo a 54% no tempo de secagem TS=8 semanas e, a 21%, no tempo de secagem TS=64 semanas. Para ambos os cimentos, os concretos curados por 28 dias apresentaram expansão inicial, sendo mais acentuada para os concretos com CP IV. Em função da cura contínua, as moléculas da água atuam contra as forças coesivas, havendo a tendência de manter as partículas de gel separadas, resultando em expansão, que pode variar de  $100 \times 10^{-6}$  a  $150 \times 10^{-6}$ , para concretos com teores de cimento em torno de  $300 \text{ kg/m}^3$  (NEVILLE, 1995, p.425).

### 5.2.1.5 Efeito da interação das variáveis: *tempo de secagem* e *relação água/cimento*

A interação de segunda ordem entre as variáveis *tempo de secagem* e *relação a/c* exerceu influência significativa na retração por secagem dos concretos. As Figuras 68 e 69 apresentam gráficos dessa interação para os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Figura 68: Efeito da interação das variáveis *tempo de secagem* e *relação a/c*: CP V ARI

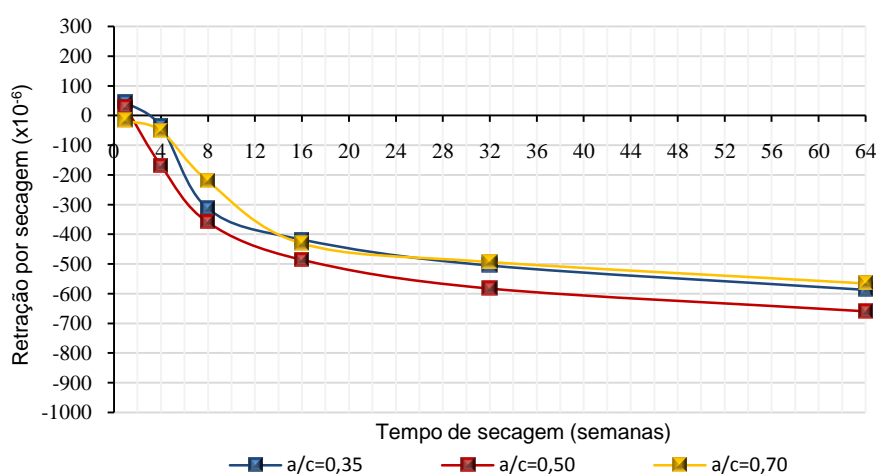
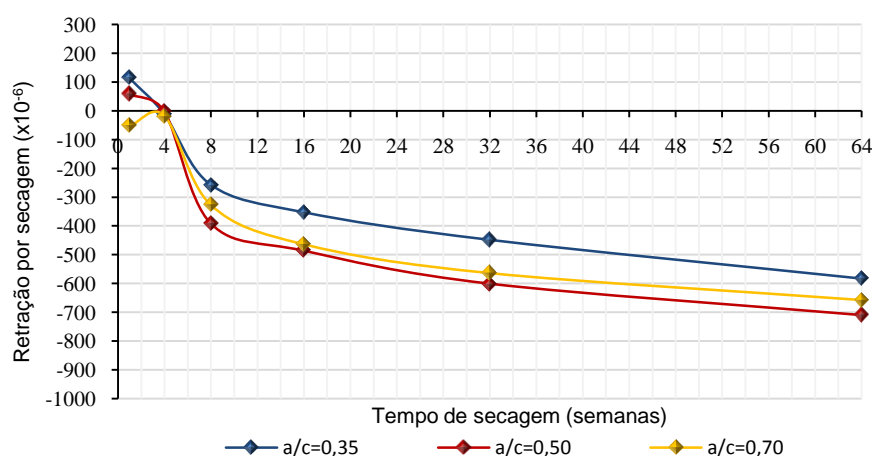


Figura 69: Efeito da interação das variáveis *tempo de secagem* e *relação a/c*: CP IV



O Quadro 9 mostra os valores das deformações médias (expansão/retração) dos concretos produzidos com ambos os cimentos, para os diferentes níveis da variável *relação a/c*, no tempo de secagem TS=1 semana.

Quadro 9: Valores das deformações médias (expansão/retração), para TS=1 semana

Expansão/Retração média ( $\times 10^{-6}$ ), para TS= 1 semana			
Relação a/c	CP V ARI	CP IV	Variação (%) entre tipos de cimentos
0,35	45,26	113,87	60
0,50	28,51	57,88	51
0,70	-17,25	-52,10	67

Sendo TS=tempo de secagem, em semanas

Observa-se que, inicialmente, houve expansão dos concretos com ambos os cimentos, para as relações a/c=0,35 e 0,50. A magnitude das deformações iniciais foi maior para o cimento CP IV, o que já era esperado, uma vez que a microestrutura dos concretos produzidos com esse cimento desenvolve-se mais lentamente em relação aos concretos com CP V ARI, sendo, portanto, mais porosa e menos resistente, nas primeiras idades. Através dos gráficos, é possível verificar que, para ambos os cimentos, os concretos com relação a/c 0,50 apresentaram os maiores valores de retração média, desde o tempo de secagem TS=8 semanas até o final do ensaio. Os concretos com cimento CP V ARI apresentaram valores de retração média para as relações a/c=0,35 e 0,70 bastante próximos, ao longo do tempo. O mesmo ocorreu para os concretos com cimento CP IV, nas relações a/c=0,50 e 0,70.

No item 5.2.1.3, que abordou o efeito isolado da variável relação a/c, mencionou-se que os resultados foram diferentes do esperado (proporcionalidade entre retração por secagem e relação a/c), devido ao efeito do pré-carregamento dos concretos nas primeiras idades. Os gráficos das Figuras 68 e 69 confirmam esse comportamento, ao longo do tempo.

#### 5.2.1.6 Efeito da interação das variáveis: *idade de cura* e *relação a/c*

As Figuras 70 e 71 apresentam o efeito da interação de segunda ordem entre as variáveis *idade de cura* e *relação a/c* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

O efeito da interação variáveis *idade de cura* e *relação a/c* foi significativo, podendo-se dizer que o tempo de cura influenciou de forma distinta os concretos com diferentes relações a/c.



Figura 70: Efeito da interação das variáveis *idade de cura* e *relação a/c*: CP V ARI

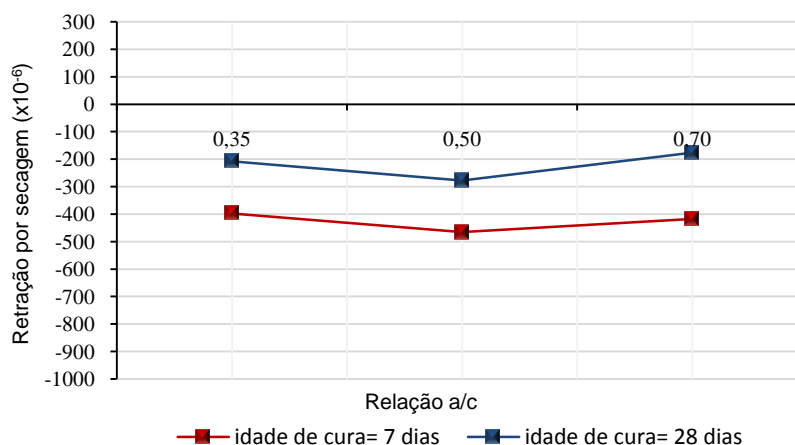
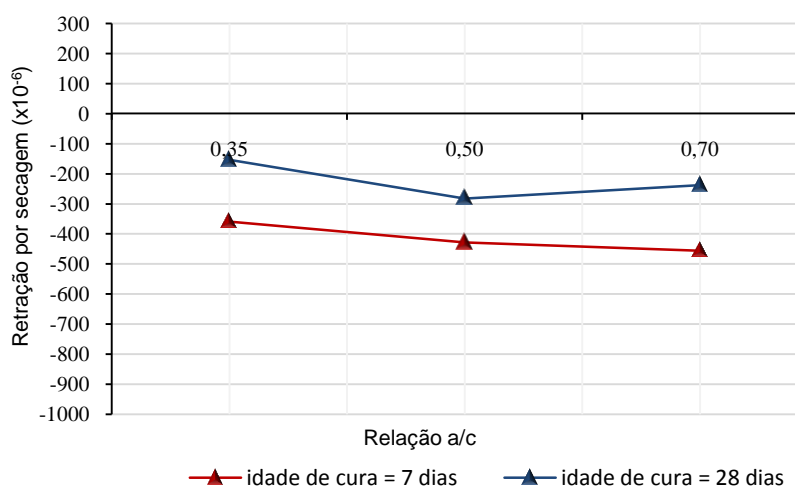


Figura 71: Efeito da interação das variáveis *idade de cura* e *relação a/c*: CP IV



Conforme Figura 70, os concretos com cimento CP V ARI e relação  $a/c=0,50$  apresentaram maior retração média, nas duas idades de cura adotadas. Para a relação  $a/c=0,70$ , a retração média dos concretos curados por 28 dias foi 58% menor em relação aos curados por 7 dias, provavelmente devido ao efeito do pré-carregamento, associado à cura prolongada, como será abordado no item 5.2.1.10. O melhor desempenho entre os concretos com o cimento CP IV, conforme Figura 71, foi obtido com a relação  $a/c=0,35$  e cura de 28 dias, quando ocorreu uma redução de 57% no valor da retração média em comparação aos concretos curados por 7 dias, para a mesma relação  $a/c$ . Provavelmente, para este cimento, a menor relação  $a/c$  e a cura prolongada tenham sido fatores primordiais na continuidade das reações de hidratação do

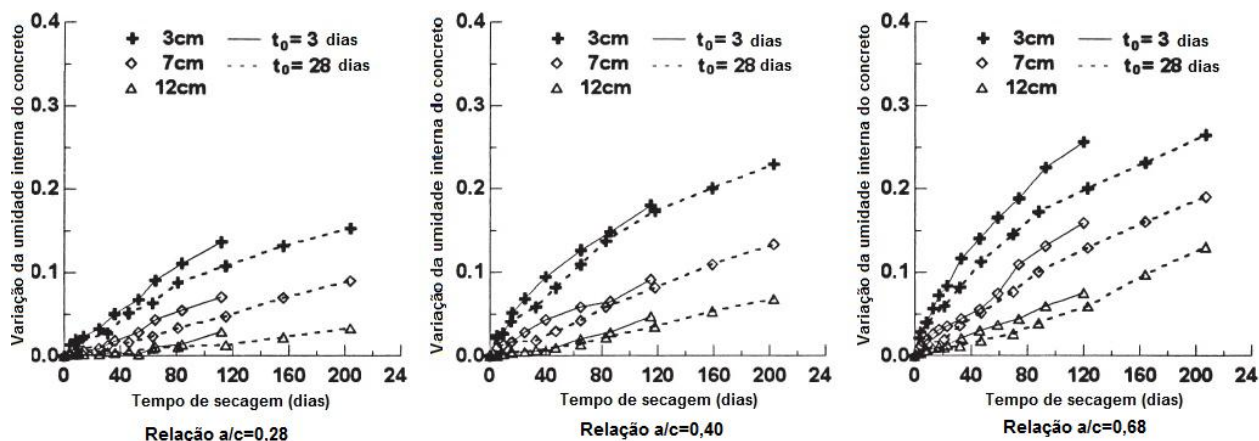
cimento e, também, na consolidação das microfissuras geradas pelo pré-carregamento imposto nas primeiras idades.

O período de cura e a relação a/c exercem influência na retração, uma vez que afetam a difusão de umidade e, portanto, a saída da água do concreto durante a secagem. Como se sabe, a perda de água do concreto aumenta com o aumento da relação a/c e do teor de água unitário. A distribuição da umidade relativa interna em concretos com relações a/c mais elevadas, durante a secagem nas primeiras idades, é um fator preponderante, não havendo grande influência da autodessecação (KIM e LEE, 1999, p. 1926). No entanto, para concretos com baixas relações a/c, a autodessecação exerce grande influência na difusão de umidade e, nesse caso, a distribuição de umidade ocasionada pela diferença entre a umidade interna do concreto e o meio externo não é o fator mais importante (KIM e LEE, 1999, p. 1926).

Existe uma forte influência do período de cura na perda de água do concreto. Kim e Lee (1999, p. 1926), estudando os fatores que influenciam a difusão de umidade em concretos nas primeiras idades, mediram a umidade interna de cp's em diferentes posições: 3, 7 e 12 cm (do interior para a superfície externa), em concretos com diferentes relações a/c: 0,28; 0,40 e 0,68. Utilizaram duas idades de cura: 3 e 28 dias. Verificaram que a variação da umidade interna, com a secagem, foi menor quando os concretos foram curados por 28 dias, em relação aos curados por apenas 3 dias. Isto se deve à influência que a cura exerce na microestrutura do concreto, afetando a difusão de umidade. Considerando-se que a cura úmida influencia a microestrutura do concreto, em função da redução de sua porosidade e densificação da matriz, a difusão também é afetada pela cura prolongada. Assim, a taxa de difusão de umidade em concretos curados por 3 dias é mais elevada, em comparação à dos concretos curados por 28 dias. Portanto, pode-se dizer que a redução da difusão de umidade obtida internamente no concreto, em função da cura prolongada, reduz a retração por secagem. A Figura 72 apresenta gráficos que ilustram a interação entre o tempo de cura e a relação a/c, conforme estudo experimental desenvolvido por Kim e Lee (1999, p. 1926).

Os concretos produzidos com os dois tipos de cimento utilizados nesta tese apresentaram tendência semelhante de comportamento, para ambas as idades de cura. Constata-se, assim, a coerência dos resultados obtidos nesta pesquisa, pois os concretos submetidos à cura de 28 dias apresentaram retrações médias menores em relação aos curados por 7 dias, para todas as relações a/c adotadas (ver Figuras 70 e 71).

Figura 72: Efeito do tempo de cura úmida (dias) na difusão de umidade de concretos com cimento Portland comum



Fonte: Kim e Lee (1999, p. 1926)

Sendo:

$t_0$ : idade de cura (3 e 28 dias)

#### 5.2.1.7 Efeito da interação das variáveis: *tempo de secagem, idade de cura e relação água/cimento*

A saída da umidade do concreto, para o ambiente circundante, está relacionada à difusão de umidade. Conforme discutido no item 5.2.1.6, em concretos com maiores relações a/c, a perda de água também tende a ser maior, embora nem toda a água livre perdida para o ambiente provoque retração. A cura prolongada diminui a difusão conforme item 5.2.1.2 e, assim, a retração por secagem, já que modifica a microestrutura do concreto, alterando sua porosidade através do refinamento da matriz e redução da interconectividade dos poros.

Além da redução da difusão, os concretos com menores relações a/c, e submetidos a um tempo de cura prolongado, apresentam maior capacidade resistente frente à retração por secagem, em comparação a concretos mais porosos.

As Figuras 73 e 74 apresentam o efeito da interação das variáveis *tempo de secagem, idade de cura e relação a/c* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Figura 73: Efeito da interação das variáveis *tempo de secagem*, *idade de cura* e *relação a/c* na retração por secagem: CP V ARI

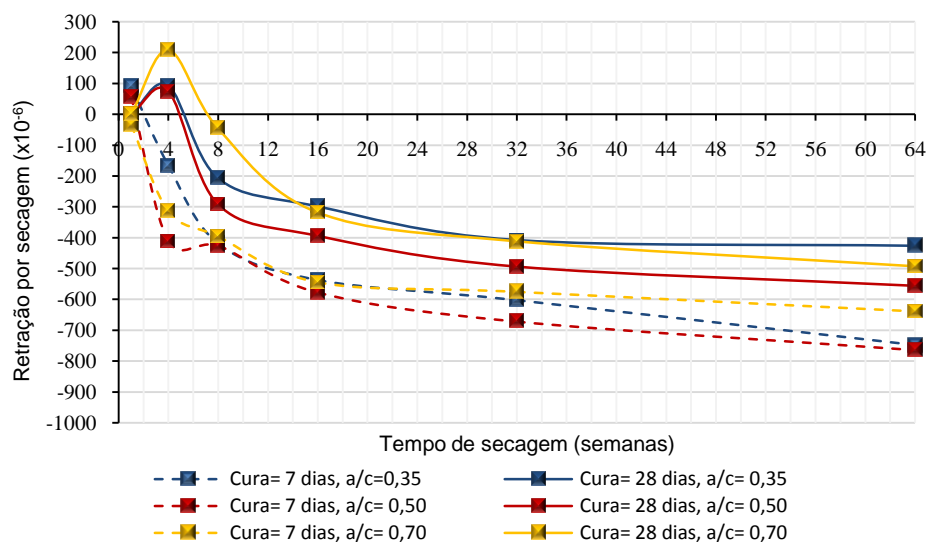
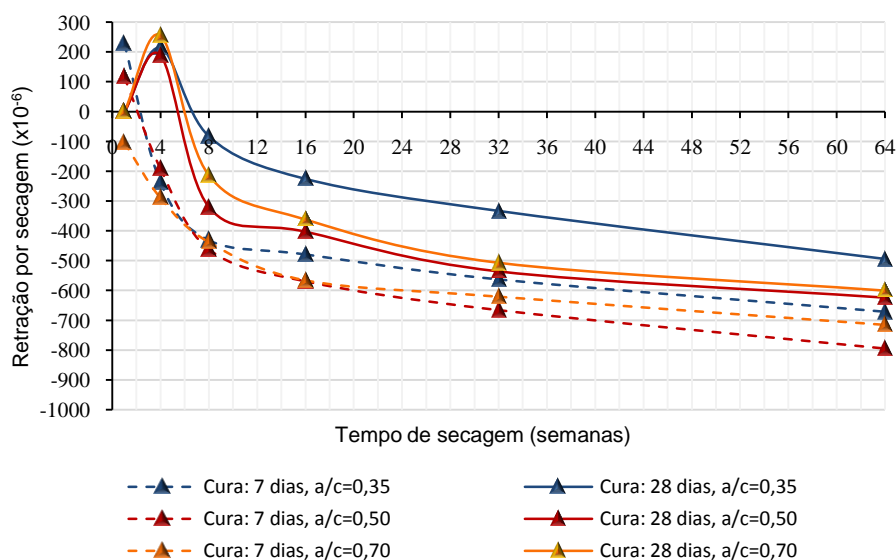
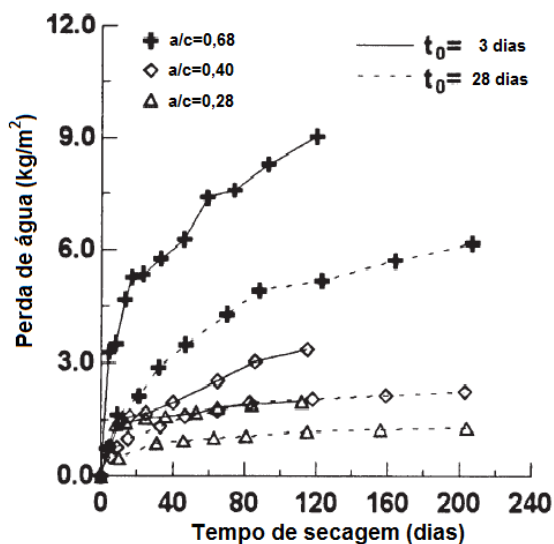


Figura 74: Efeito da interação das variáveis *tempo de secagem*, *idade de cura* e *relação a/c* na retração por secagem: CP IV



A Figura 75 mostra o resultado da pesquisa desenvolvida por Kim e Lee (1999, p. 1926), evidenciando a influência da cura prolongada na perda de água de concretos produzidos com cimento Portland comum, nas relações  $a/c=0,28$ ,  $0,40$  e  $0,68$ . Observa-se que nos concretos com menores relações  $a/c$  e curados por 28 dias, a perda de água é menor em comparação aos curados por 3 dias, devido às razões mencionadas anteriormente.

Figura 75: Efeito do tempo de cura úmida (dias) na difusão de umidade de concretos com cimento Portland comum



Fonte: Kim e Lee (1999, p. 1926)

Os gráficos do efeito combinado das variáveis *tempo de secagem*, *idade de cura* e *relação a/c* sobre a retração, conforme resultados desta tese, permitem observar nitidamente o efeito da cura prolongada para cada uma das relações a/c, ao longo do tempo. Fica evidente que as menores deformações por secagem ocorreram para os concretos curados por 28 dias, independentemente da relação a/c e tipo de cimento, como já discutido anteriormente (ver item 5.2.1.2).

Nos tempos de secagem TS=8 e 64 semanas, os concretos com CP V ARI e relação a/c=0,70 demonstraram desempenho satisfatório frente à retração, apresentando deformações muito próximas às apresentadas pelos concretos com relação a/c=0,35, para ambas as idades de cura adotadas. Com relação aos concretos curados por 7 dias, com relação a/c=0,70, constatou-se que apresentaram bom desempenho. Foi observado, portanto, que os concretos moldados com cimento CP V ARI com ambas idades de cura, o pior desempenho frente à retração por secagem ocorreu para a relação a/c=0,50, ao longo do tempo de realização do ensaio. Para os concretos com o cimento CP IV, a partir do tempo de secagem TS=8 semanas, os menores valores de retração foram apresentados pelos concretos com relação a/c=0,35, para ambas as idades de cura. Considerando-se a cura de 28 dias, os concretos com relações a/c=0,50 e 0,70, apresentaram desempenho menor em relação aos com relação a/c=0,35. Já para a cura de 7 dias, os concretos com relação a/c=0,50 apresentaram pior desempenho. Tais resultados

poderão ser melhor entendidos a partir da verificação do efeito do pré-carregamento, o qual influenciou o desempenho dos concretos com diferentes tipos de cimentos e relações a/c.

#### 5.2.1.8 Efeito isolado da variável *pré-carregamento*

A análise estatística demonstra que a variável *pré-carregamento* exerceu influência significativa na retração por secagem, para ambos os cimentos. No entanto, observa-se que para os concretos produzidos com CP V ARI houve maior correlação entre esta variável e a variável de resposta (ver quadros Tabelas 19 e 20). As Figuras 76 e 77 apresentam o efeito da variável *pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Entre os concretos produzidos com CP V ARI, os concretos de referência apresentaram maior retração média em comparação aos concretos pré-carregados. Os concretos pré-carregados com 25%, 50% e 75% da carga média de ruptura à flexão obtiveram valores de retração média 29%, 24% e 23% menores, em relação aos concretos de referência (CAR=0%), respectivamente. Já entre os concretos com CP IV, foi constatado que as retrações médias dos concretos pré-carregados com 25%, 50% e 75% aumentaram 13%, 25% e 17%, respectivamente, em relação aos concretos de referência.

Figura 76: Efeito isolado da variável *pré-carregamento* na retração por secagem: CP V ARI

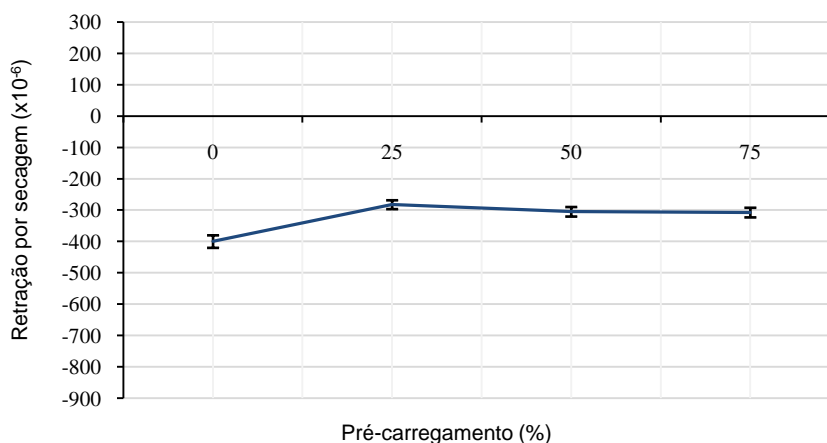
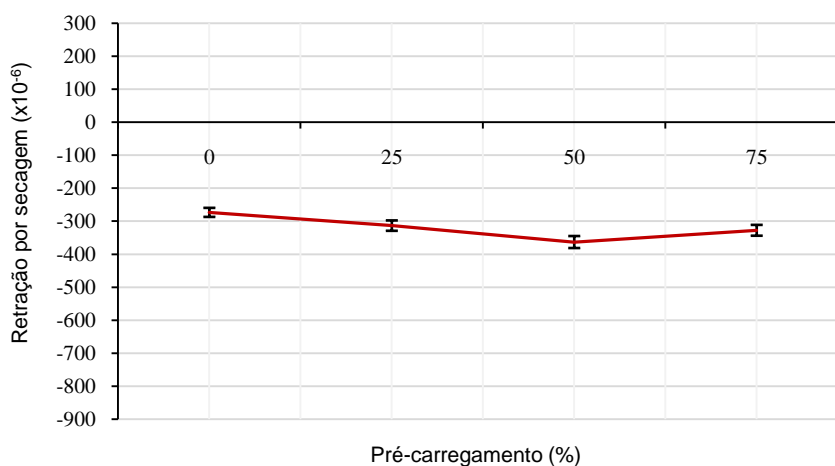


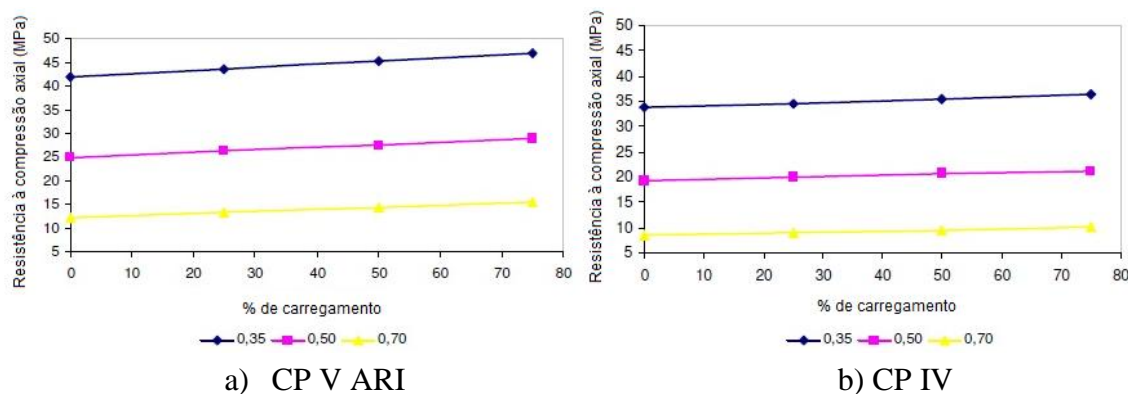
Figura 77: Efeito isolado da variável *pré-carregamento* na retração por secagem: CP IV



Os resultados desta análise são coerentes com outros estudos realizados com o objetivo de identificar o efeito da aplicação de carregamento nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto (ABDEL-JAWAD e HADDAD, 1992; SALVADOR, 2007; VIEIRA, 2008; HOSEINI et al., 2009).

Vieira (2008, p. 96) estudou a influência do carregamento precoce na capacidade resistente de concretos. Foram aplicados pré-carregamentos correspondentes a 25%, 50% e 75% da carga média de ruptura à compressão axial, em cp's cilíndricos, produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, utilizando relações  $a/c=0,35, 0,50$  e  $0,70$ . Os pré-carregamentos foram realizados nas idades de 1, 3 e 7 dias e, posteriormente, os cp's retornaram ao ambiente de cura úmida ( $UR \cong 100\%$ ), onde permaneceram por 28 dias. A Figura 78 apresenta os resultados obtidos por Vieira (2008, p. 99) para a resistência à compressão axial dos concretos, aos 28 dias.

Figura 78: Pré-carregamento (%) X resistência à compressão (MPa)



Fonte: Vieira (2008, p. 99)

Como se observa através da Figura 78, ocorreu aumento da resistência à compressão para os concretos com ambos os cimentos, à medida que o percentual de pré-carregamento aumentou. O maior ganho de resistência ocorreu para os concretos com CP V ARI e relação a/c=0,35 (VIEIRA, 2008, p. 101).

Outro trabalho experimental (ABREU et al., 2014<sup>107</sup>) avaliou a resistência à compressão axial de concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV. Na idade de 3 dias, para cada cimento, 6 cp's foram pré-carregados com 50% da carga média de ruptura à compressão axial, outros 6 cp's, com 75%, e 6 cp's não receberam pré-carregamento (referência). Após o pré-carregamento, a metade dos concretos moldados foi submetida à cura de 7 dias e, a outra metade, à cura de 28 dias. Ao término das respectivas idades de cura, foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão axial dos concretos pré-carregados e de referência.

O gráfico da Figura 79 apresenta os valores médios de resistência à compressão axial obtidos nos ensaios para os concretos estudados por Abreu et al. (2014)<sup>108</sup>. Observa-se que, para os concretos com CP IV e cura de 7 dias, praticamente não ocorreram diferenças entre os valores médios de resistência à compressão. Quando curados até 28 dias, os concretos com CP IV e pré-carregados com 75% da carga média de ruptura apresentaram resistência média à compressão 10% superior aos concretos de referência. Os concretos com CP V ARI curados até 7 dias, quando pré-carregados com 50% e 75% da carga média de ruptura, apresentaram resistências médias à compressão 16% e 11% superiores aos concretos de referência, respectivamente. Aos 28 dias, os concretos pré-carregados com 50% da carga média de ruptura apresentaram resistência média à compressão 5% superior aos concretos de referência, sendo que, entre os concretos pré-carregados com 75% da carga de ruptura e os de referência, não houve diferença nos valores da resistência média à compressão.

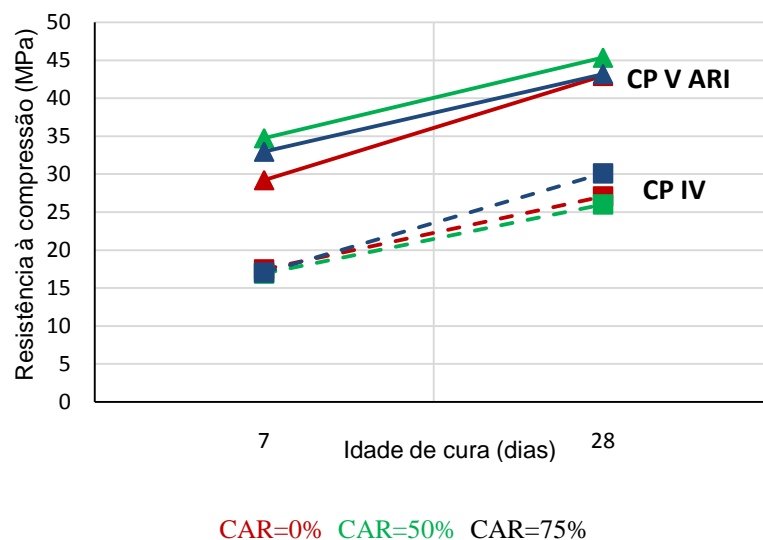
---

<sup>107</sup> ABREU, A.G. et al. Avaliação da resistência à compressão de concretos pré-carregados na idade de 3 dias. Relatório de Pesquisa, não publicado. NORIE/UFRGS. 2014

<sup>108</sup> ABREU, A.G. et al. Avaliação da resistência à compressão de concretos pré-carregados na idade de 3 dias. Relatório de Pesquisa, não publicado. NORIE/UFRGS. 2014



Figura 79: Resistência à compressão (MPa) para concretos com CP V ARI e CP IV, para três níveis de pré-carregamento (CAR): 0%, 50% e 75% e idades de cura: 7 e 28 dias



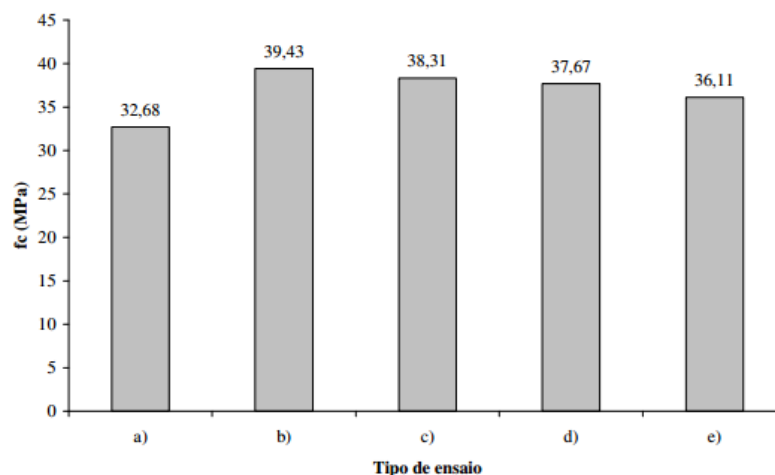
Fonte: Abreu et al. (2014)

Os resultados obtidos nesse trabalho experimental confirmam a tendência dos concretos submetidos ao pré-carregamento de recuperação da capacidade resistente, quando curados imersos em água.

Salvador (2007, p. 118) analisou a deformação de vigas de concreto produzidas com o cimento CP V ARI, submetidas a diferentes carregamentos nas idades iniciais. Assim, foram moldadas vigas idênticas para a avaliação do efeito de um pré-carregamento de curta duração, sob a forma de uma carga concentrada no centro do vão. Na idade de 3 dias, uma viga (V1) foi carregada até obter o esgotamento de sua capacidade resistente. Em outras três vigas (V2, V3 e V4) foram aplicados pré-carregamentos correspondendo a 32%, 64% e 96% da carga de ruptura da viga V1, respectivamente. Uma outra viga (V5) não recebeu carregamento (viga de controle ou viga testemunho). Foram calculadas as flechas imediatas e diferidas no tempo, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) para estas vigas V2, V3, V4 e V5. Posteriormente, para a avaliação das cargas de longa duração, foram moldadas três vigas idênticas, V4d, para simular ciclos de construção de 4 dias, V7d, para simular ciclos de construção de 7 dias e V28d, como viga testemunho. Após os ensaios, o referido pesquisador verificou que o pré-carregamento parece ter afetado favoravelmente as taxas de crescimento da deformação por fluência. O autor também comparou as resistências à compressão axial em cp's moldados e

em testemunhos extraídos das vigas, após a conclusão dos ensaios de fluência, conforme gráfico apresentado na Figura 80.

Figura 80: Comparação das resistências à compressão axial em cp's moldados e em testemunhos das vigas com cimento CP V ARI



Fonte: Salvador (2007, p. 118)

Sendo:

- a) Cp's sem pré-carregamento, com cura em condições normalizadas;
- b) Cp's com cura em condições semelhantes às vigas do ensaio de pré-carregamento de curta duração;
- c) Testemunhos extraídos das vigas submetidas ao pré-carregamento de curta duração;
- d) Cp's com cura em condições semelhantes às vigas do ensaio de pré-carregamento de longa duração;
- e) Testemunhos extraídos das vigas submetidas ao pré-carregamento de longa duração.

Como pode se observar através da Figura 80, o pré-carregamento parece não ter afetado a resistência à compressão do concreto das vigas pré-carregadas, visto que a resistência à compressão axial dos cp's que não foram submetidos ao pré-carregamento (a) foi inferior aos demais. Destaca-se que o maior valor de resistência à compressão foi obtido para os cp's em situação semelhante às vigas do ensaio de pré-carregamento de curta duração. No entanto, Salvador (2007, p.118) advertiu que o emprego de ciclos de execução mais intensos pressupõe a adoção de um projeto adequado, utilizando-se os fatores de carga decorrentes, de modo a evitar a incidência de deformações incompatíveis com a capacidade resistente da estrutura.

Outra investigação experimental sobre o efeito do pré-carregamento no desenvolvimento da resistência do concreto foi reportado por Abdel-Jawad e Haddad (1992, p. 931). Esses pesquisadores submetem concretos produzidos com cimento Portland pozolânico, nas relações  $a/c=0,50$  e  $0,70$ , ao pré-carregamento por compressão axial, nas idades de 8, 16, 24 e 72 horas. Foram utilizados os seguintes níveis de carregamento: 60%, 75%, 90% e 100% da carga de ruptura à compressão axial. Os cp's foram submetidos a curas úmida e seca, até as idades de 7, 28 e 90 dias. Após o término dos respectivos períodos de cura, os cp's foram testados (resistência à compressão) novamente. Os resultados demonstraram que os concretos submetidos à cura úmida, carregados em idades superiores a 8 horas e até 90% da carga de ruptura, não apresentaram efeito negativo no desenvolvimento da resistência. Nessas situações, foram obtidos quase os mesmos valores de resistência para os concretos carregados e de referência, para ambas as relações  $a/c$  testadas. Segundo os autores da pesquisa, os resultados favoráveis foram devidos à continuidade da hidratação, em função da cura úmida, possibilitando a selagem das fissuras formadas durante o pré-carregamento e a recuperação da resistência dos concretos pré-carregados. Contudo, houve perda de resistência de 5% a 12% para os concretos pré-carregados na idade de 8 horas. Neste caso, como justificaram os autores da pesquisa, o carregamento na idade de 8 horas, a qual corresponde aproximadamente ao término da pega do cimento, resultou em deformações excessivas. Provavelmente as aberturas das fissuras formadas foram maiores, de modo que os produtos de hidratação, gerados durante o período de cura úmida, não foram suficientes para o preenchimento total das fissuras. Os autores salientaram, ainda, que a selagem total das fissuras não significa recuperação integral da capacidade resistente dos concretos.

O efeito exercido pelo pré-carregamento na mitigação das deformações causadas pela retração está relacionado à compactação da matriz, promovendo alterações na microestrutura do concreto. A estrutura de poros desempenha um papel de grande importância na deformação associada à secagem (ALY e SANJAYAN, 2010, p. 525). O coeficiente de difusão é influenciado pela formação da microestrutura e, inversamente, a redução da umidade causada pela difusão também afeta o grau de hidratação (KANG et al., 2012, p. 184). Assim, o coeficiente de difusão não é constante ao longo do tempo, variando em função do grau de hidratação e, portanto, da porosidade do concreto, principalmente da distribuição do tamanho dos poros (XI et al., 1994, p. 258; KANG et al., 2012, p. 184). A porosidade e a interconectividade dos poros são controladas pelo grau de hidratação e, também, pelo grau de compactação (BANTHIA et al., 2005, p. 1651).

Tendo em vista que, nesta tese, o pré-carregamento foi realizado empregando-se o ensaio de tração na flexão, os cp's foram submetidos a esforços de compressão (fibras superiores) e de tração (fibras inferiores). Portanto, supõe-se que os concretos estudados foram expostos à compactação, mas também houve a incidência de microfissuração, considerando-se a distribuição das tensões provenientes do pré-carregamento nos cp's. Em termos microestruturais, provavelmente a compactação, promovida pelo pré-carregamento, ocasionou a quebra dos cristais de hidróxido de cálcio ( $\text{CaOH}_2$ ), pouco resistentes, com o preenchimento dos espaços vazios e, assim, densificação da matriz. A hidratação continuada, através da cura, possibilitou a hidratação de grãos anidros e, assim, a formação de novos silicatos hidratados de cálcio (C-S-H), estabelecendo-se uma segunda geração de produtos resistentes (VIEIRA, 2009, p. 96). A cura promoveu, em paralelo, a autocicatrização das microfissuras decorrentes do pré-carregamento, como será discutido em maior detalhe no item 5.8.

Diante do exposto, é possível dizer que a compactação devida ao pré-carregamento exerceu influência na retração, por afetar a saída da água do concreto através da redução da difusão de umidade. Além disso, a continuidade das reações de hidratação do cimento e a formação de novos compostos resistentes melhoraram o desempenho mecânico dos concretos estudados frente às tensões geradas na secagem. Nos concretos com cimento CP IV, caracterizados por um desenvolvimento mais lento da capacidade resistente, em relação aos concretos com cimento CP V ARI, provavelmente ocorreu um efeito de microfissuração, conforme discussão apresentada no item 5.2.1.11.

#### 5.2.1.9 Efeito da interação das variáveis: *tempo de secagem e pré-carregamento*

As Figuras 81 e 82 apresentam o efeito da interação das variáveis *tempo de secagem e pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

O Quadro 10 mostra os valores das expansões médias dos concretos com CP V ARI, para o nível da variável *tempo de secagem* TS=1 semana e das retrações médias ocorridas no período compreendido entre TS= 4 a 64 semanas, considerando-se a interação entre as variáveis *pré-carregamento e tempo de secagem*.

Verifica-se que, para o nível da variável *tempo de secagem* TS=1 semana, a maior expansão ocorreu nos concretos de referência e, entre os concretos pré-carregados, a expansão foi inversamente proporcional ao nível de pré-carregamento. Este resultado está relacionado à

compactação imposta pelo pré-carregamento, alterando a porosidade dos concretos, como discutido no item 5.3.1.8.

Figura 81: Interação das variáveis *tempo de secagem* e *pré-carregamento* na retração por secagem: CP V ARI

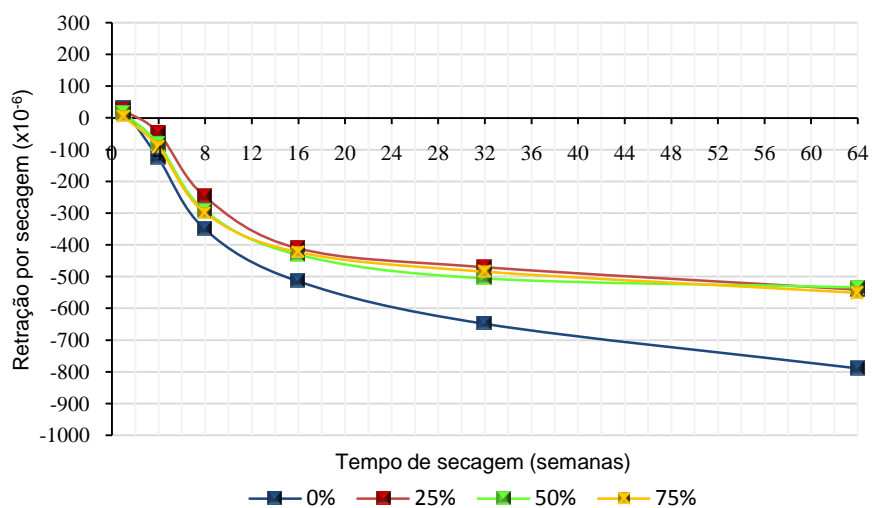
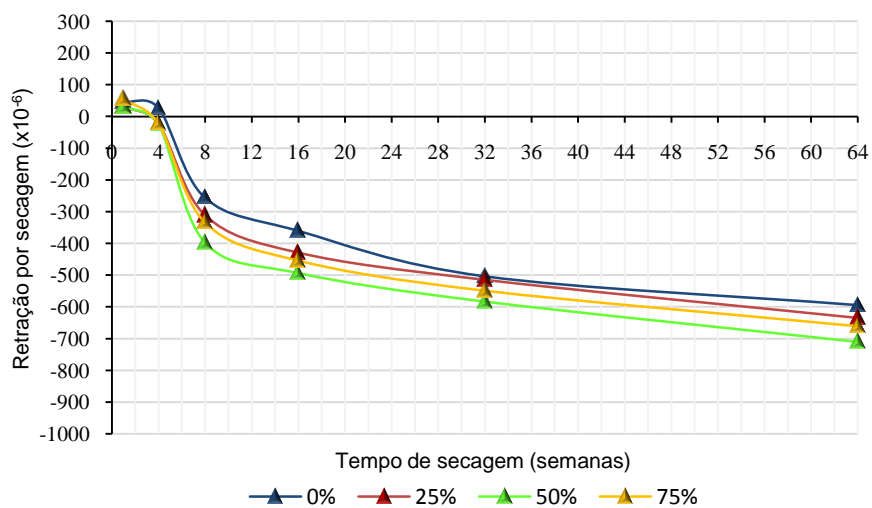


Figura 82: Interação das variáveis *tempo de secagem* e *pré-carregamento* na retração por secagem: CP IV



Quadro 10: Retrações médias dos concretos ( $\times 10^{-6}$ ) com CPV ARI:  
interação das variáveis *tempo de secagem* e *pré-carregamento*

CAR (%)	TS (semanas)					
	1	4	8	16	32	64
0	30,447	-126,156	-351,533	-514,862	-648,701	-789,578
25	23,732	-46,461	-248,600	-411,251	-470,460	-541,191
50	16,564	-82,066	-292,716	-431,427	-506,092	-534,341
75	4,610	-91,665	-299,349	-423,231	-484,184	-551,432

Sendo TS=tempo de secagem e CAR=pré-carregamento

Nesta pesquisa, as retrações médias dos concretos com cimento CP V ARI foram menores para os maiores níveis de pré-carregamento. Observa-se, também, que a retração média dos concretos submetidos a 75% da carga média de ruptura foi menor do que a dos concretos de referência, para todos os níveis da variável *tempo de secagem*. Para esse nível de pré-carregamento (75%), houve uma redução de cerca de 30% do valor da retração média obtida ao final do ensaio (TS=64 semanas), em relação ao concreto de referência.

O Quadro 11 apresenta os valores das expansões médias dos concretos com CP IV, ocorridas no TS=1 semana e das retrações médias ocorridas entre TS= 4 a 64 semanas, considerando-se a interação entre as variáveis *pré-carregamento* e *tempo de secagem*.

Quadro 11: Retrações médias dos concretos ( $\times 10^{-6}$ ) com CP IV:  
interação das variáveis *tempo de secagem* e *pré-carregamento*

CAR (%)	TS (semanas)					
	1	4	8	16	32	64
0	45,868	26,458	-256,395	-256,395	-503,763	-594,054
25	29,798	-22,345	-311,092	-311,092	-514,715	-634,755
50	29,908	-24,536	-398,041	-398,041	-583,522	-710,982
75	53,956	-22,405	-334,711	-334,711	-548,882	-661,596

Sendo TS=tempo de secagem e CAR=pré-carregamento

Em relação aos concretos com CP IV, para o nível da variável *tempo de secagem* TS=1 semana, as maiores expansões ocorreram nos concretos pré-carregados com 75% da carga média de ruptura, seguidos pelos concretos de referência (CAR=0%). Observa-se que os concretos pré-carregados com CAR=25% e CAR=50% apresentaram expansões menores do que os concretos de referência, indicando que a compactação produzida pela aplicação desses dois níveis de pré-carregamento pode ter reduzido os valores das deformações iniciais por expansão. Considerando-se a retração média ao final do ensaio (TS=64 semanas), houve uma

variação (aumento) de 6 a 16% entre o valor da retração média dos concretos pré-carregados em relação aos de referência. Salienta-se que, para os concretos com cimento CP IV, a retração média dos concretos de referência foi menor do que a dos concretos pré-carregados, para todos os níveis da variável *tempo de secagem*. Portanto, para os concretos produzidos com esse cimento, o efeito benéfico do pré-carregamento não foi tão nítido como ocorreu com os concretos com CP V ARI. No entanto, observando-se o gráfico da Figura 82, verifica-se que as curvas relativas aos níveis CAR=25% e CAR=75% da variável pré-carregamento estão bem próximas à curva dos concretos de referência, principalmente a partir do tempo de secagem TS=32 semanas.

A diferença de comportamento entre os concretos produzidos com os dois cimentos utilizados se deve, provavelmente, às características de cada cimento quanto ao ganho de resistência, ao longo do tempo. Em sua pesquisa, Vieira (2008, p. 99) também constatou que para os concretos pré-carregados produzidos com cimentos Portland de alta resistência inicial (CP V ARI e CP V ARI-RS) houve maior ganho de resistência à compressão axial em relação aos concretos produzidos com cimento Portland pozolânico (CP IV), quando comparados aos concretos de referência. A pesquisadora atribuiu tal desempenho à maior rapidez com que a hidratação ocorre nos cimentos de alta resistência inicial, havendo maior desenvolvimento das propriedades mecânicas dos concretos nas primeiras idades. Os cimentos de alta resistência inicial apresentam maior taxa de ganho de resistência, devido ao seu rápido endurecimento em função de possuírem elevado teor de  $C_3S$ . Além disso, a elevada finura característica desse tipo de cimento promove aumento da resistência nas primeiras 10 a 20 horas e esse aumento persiste até cerca de 28 dias. Contudo, sob condições de cura úmida, após 2 a 3 meses, a resistência de cimentos com menor finura pode ultrapassar a dos cimentos de elevada finura (NEVILLE, 1995, p.71).

#### 5.2.1.10 Efeito da interação das variáveis *idade de cura* e *pré-carregamento*

As Figuras 83 e 84 mostram o efeito da interação das variáveis *idade de cura* e *pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Figura 83: Interação das variáveis *idade de cura* e *pré-carregamento* na retração por secagem: CP V ARI

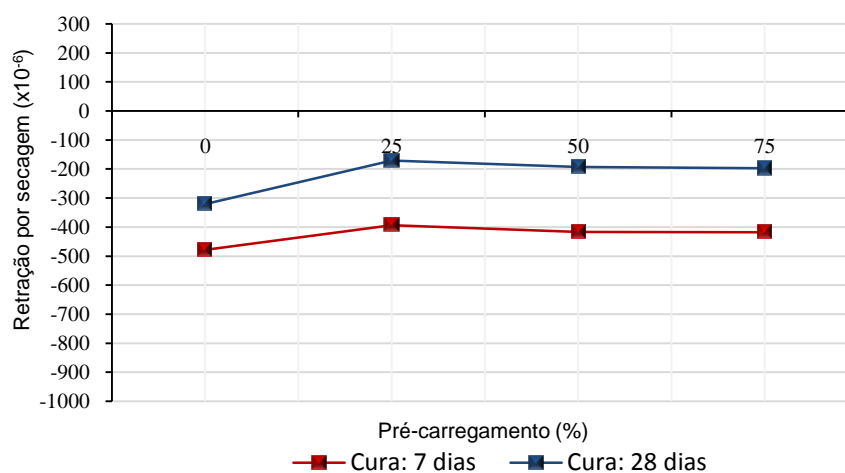
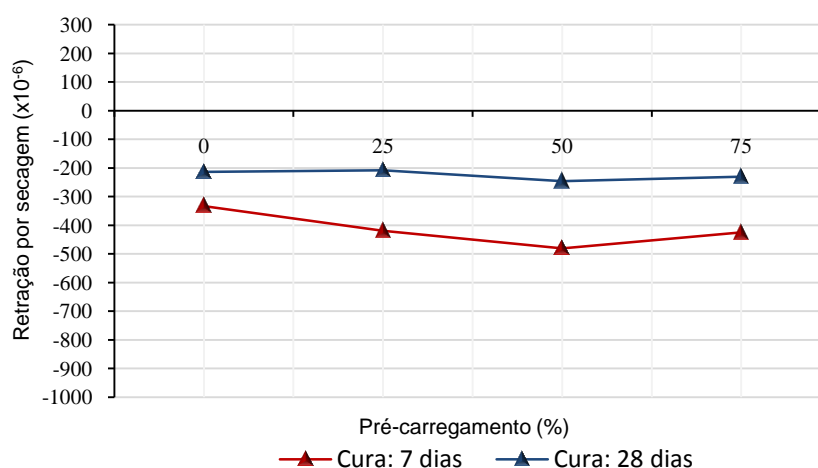


Figura 84: Interação das variáveis *idade de cura* e *pré-carregamento* na retração por secagem: CP IV




Através dessas figuras, pode-se constatar que a cura prolongada exerceu um efeito benéfico na mitigação da retração por secagem dos concretos produzidos com ambos os cimentos, para todos os níveis da variável *pré-carregamento* (0%, 25%, 50% e 75%).

O Quadro 12 apresenta as variações entre os concretos de referência e os pré-carregados, para os níveis da variável *idade de cura*, considerando os dois cimentos avaliados.



Quadro 12: Variações entre os níveis da variável *idade de cura* para cada nível da variável *pré-carregamento*: CP V ARI e CP IV

Idade de cura (dias)	CAR (%)	Variação (%)	
		CP V ARI	CP IV
De 7 para 28	0	33	36
	25	57	50
	50	54	49
	75	53	46

 Aumento       Redução  
 →

É interessante ressaltar que o efeito da cura prolongada parece ter sido potencializado nos concretos pré-carregados, conforme evidencia o Quadro 12, visto que, para ambos os cimentos, as maiores variações (redução da retração) ocorreram nos concretos pré-carregados. O Quadro 12 também mostra que, para as condições adotadas nesta pesquisa, o pré-carregamento de 75% da carga média de ruptura à flexão, nos concretos com CP V ARI, provocou maior redução (53%) da deformação por retração, em relação à redução (33%) obtida nos concretos de referência, quando o nível da variável *idade de cura* passou de 7 para 28 dias. Para os concretos com CP IV, as retrações médias dos concretos pré-carregados, em geral, foram maiores do que as dos concretos de referência. Contudo, a cura prolongada parece ter contribuído para melhorar o desempenho dos concretos com esse cimento, visto que as retrações médias dos concretos pré-carregados diminuíram, reduzindo a diferença com relação aos concretos de referência, de uma forma geral.

Para o CP V ARI, considera-se que a associação do pré-carregamento à cura prolongada foi o efeito mais relevante na mitigação das deformações provenientes da secagem, evidenciada através dos resultados obtidos nos ensaios. O pré-carregamento proporcionou a compactação e quebra dos cristais maiores, favorecendo a hidratação dos grãos anidros. Com isso, ocorreu o efeito físico de preenchimento dos vazios, refletindo-se em redução da migração de umidade e, ao mesmo tempo, contribuindo para o aumento da capacidade resistente dos concretos.

Outro fator que pode estar relacionado com a cura prolongada é a colmatação das microfissuras originadas a partir do pré-carregamento. Como mencionado anteriormente, a cura prolongada possibilita a continuidade da hidratação do cimento, favorecendo o

preenchimento dos vazios capilares com os produtos das reações. Sob determinadas condições, os hidratos formados também podem preencher as microfissuras, selando-as total ou parcialmente. Sabe-se que a microfissuração pode acelerar a taxa da retração e, nesse sentido, a colmatação pode ter contribuído para a redução da velocidade da saída da água do interior do concreto para o ambiente circundante. Além disso, a selagem das microfissuras pode ser benéfica, por contribuir para a recuperação, pelo menos parcial, da capacidade resistente do concreto frente às tensões geradas durante a secagem.

#### 5.2.1.11 Efeito da interação das variáveis *relação água/cimento* e *pré-carregamento*

As Figuras 85 e 86 referem-se ao efeito da interação das variáveis *relação a/c* e *pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Figura 85: Interação das variáveis *relação a/c* e *pré-carregamento*:  
CP V ARI

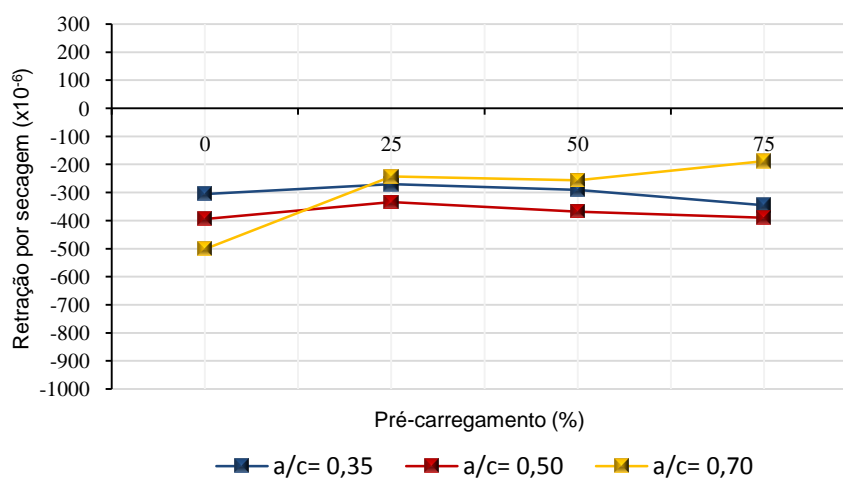
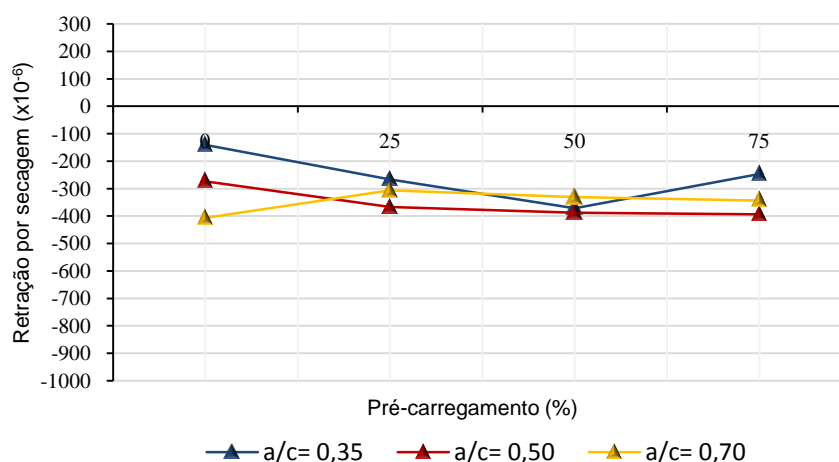


Figura 86: Interação das variáveis *relação a/c* e *pré-carregamento*: CP IV



O Quadro 13 apresenta uma comparação entre os valores de retração média dos concretos com CP V ARI, considerando-se a interação das variáveis: *relação a/c* e *pré-carregamento*.

Quadro 13: Comparação entre os valores de retração média dos concretos com CP V ARI: *relação a/c* X *pré-carregamento*

CAR (%)	Relação a/c		
	MENOR ←Ret <sub>méd</sub> → MAIOR		
0	0,35	0,50	0,70
25	0,35	0,70	0,50
50	0,70	0,35	0,50
75	0,70	0,35	0,50

O Quadro 14 apresenta as variações entre os valores da retração média, comparando-se concretos de referência com os concretos pré-carregados.

Quadro 14: Variação dos valores de retração média, comparando-se os concretos de referência com os concretos pré-carregados, para cada nível da variável *relação a/c* - CP V ARI

Relação a/c	Variação (%)		
	0%-25%	0%-50%	0%-75%
0,35	11	5	12
0,50	15	6	1
0,70	52	49	63



Aumento



Redução

O Quadro 15 mostra uma comparação entre os valores de retração média dos concretos com CP IV, considerando-se a interação das variáveis: *relação a/c* e *pré-carregamento*.

Quadro 15: Comparação entre os valores de retração média de acordo com a interação das variáveis: *relação a/c* e *pré-carregamento* para os concretos com – CP IV

CAR (%)	Relação a/c		
	MENOR ←Ret <sub>méd</sub> → MAIOR		
0	0,35	0,50	0,70
25	0,35	0,70	0,50
50	0,70	0,35	0,50
75	0,35	0,70	0,50

O Quadro 16 apresenta as variações entre os valores da retração média, comparando-se os concretos de referência com os concretos pré-carregados.

Quadro 16: Variação dos valores de retração média, comparando-se os concretos de referência com os concretos pré-carregados, para cada nível da variável *relação a/c* - CP IV

Relação a/c	Variação (%)		
	0% → 25%	0% → 50%	0% → 75%
0,35	47	62	43
0,50	25	29	30
0,70	25	25	16

 Aumento       Redução

Através dos gráficos da interação entre as duas variáveis, e dos quadros apresentados, pode-se observar que os concretos de referência, produzidos com ambos os cimentos, apresentaram valores de retração diretamente proporcionais às relações a/c, como esperado.

Como apresentado no item 2.2 do *Capítulo 2*, a pasta de cimento endurecida é constituída de: *fase sólida*, *fase porosa*, e *grãos anidros de cimento*. À medida que a hidratação do cimento progride, forma-se o gel de cimento, que é uma substância com características de gel coloidal. O gel de cimento é denso, embora também tenha uma certa porosidade em sua constituição (poros de gel). Dependendo da relação a/c, a quantidade de gel de cimento, formado a partir da hidratação, não é suficiente para preencher todo o espaço originalmente ocupado pela água, gerando a porosidade capilar (HANSEN, 1986, p.423).

Powers<sup>109</sup> (ver item 2.2.5) apresentou uma série de conceitos capazes de explicar, de forma coerente, as propriedades físicas da pasta de cimento endurecida, sendo utilizados até hoje (HANSEN, 1986, p.424). A fim de possibilitar o maior entendimento sobre o efeito da interação entre as variáveis *pré-carregamento* e *relação a/c*, buscou-se demonstrar as variações da porosidade capilar nos concretos estudados, em função da relação a/c e do grau de hidratação, com base no trabalho de Powers (1958, apud MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 38).

O Quadro 17 apresenta o detalhamento dos volumes considerados, nesta tese, para o concreto endurecido, tendo em vista suas fases constituintes.

Quadro 17: Volumes dos constituintes do concreto, considerando-se as *fases resistente e não resistente*

Volume do concreto endurecido		
Fase resistente	Volume de cimento anidro	
	Volume dos produtos de hidratação	Gel de cimento
		Poros de gel
	Volume da areia	
Volume da brita		
Fase não resistente	Volume de ar aprisionado	
	Volume de vazios devido à retração química	
	Volume da porosidade capilar	

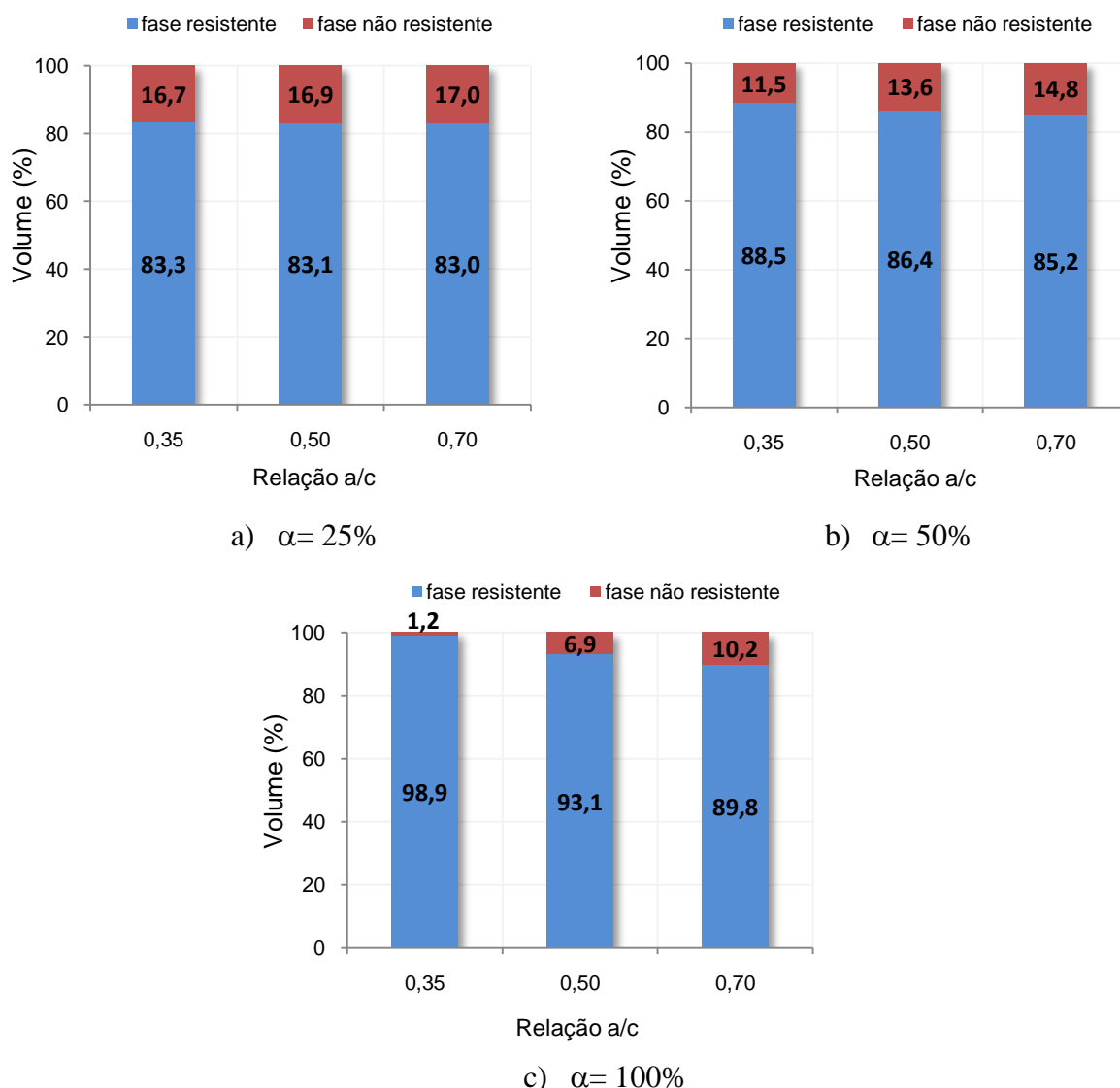
Observa-se que o volume da *fase resistente* totaliza o volume dos produtos de hidratação (gel de cimento), mais o volume do cimento anidro. No caso do concreto, o volume dos agregados graúdo e miúdo integram o volume da *fase resistente*. O volume da *fase não resistente* corresponde à soma do volume dos vazios capilares, mais o volume de ar aprisionado, mais o volume de vazios devido à retração química. No Apêndice F, apresentam-se quadros com os volumes calculados, segundo Powers, para os concretos de referência, além dos parâmetros considerados.

A Figura 87 (a), (b) e (c) apresenta os gráficos elaborados a partir do cálculo dos volumes das fases resistente e não resistente dos concretos com cimento CP V ARI, nas relações a/c utilizadas, considerando-se três diferentes graus de hidratação (25%, 50% e 100%). Sabe-se que o volume de vazios capilares na pasta hidratada depende da quantidade de água

<sup>109</sup>Powers, T.C. *The physical structure and engineering properties of concrete*, Portland Cement Assoc Res Dept 1958:90.

adicionada ao cimento, no momento da mistura, e do grau de hidratação do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 38). Conforme quadro apresentado no item 2.3.3.3, um concreto produzido com o cimento CP V ARI já desenvolveu, aos 3 dias, 66,30% da resistência aos 28 dias (100%).

Figura 87: Volume (%) das fases constituintes dos concretos com CP V ARI, nas relações a/c 0,35, 0,50 e 0,70, para diferentes graus de hidratação: (a) 25%; (b) 50% e (c) 100%



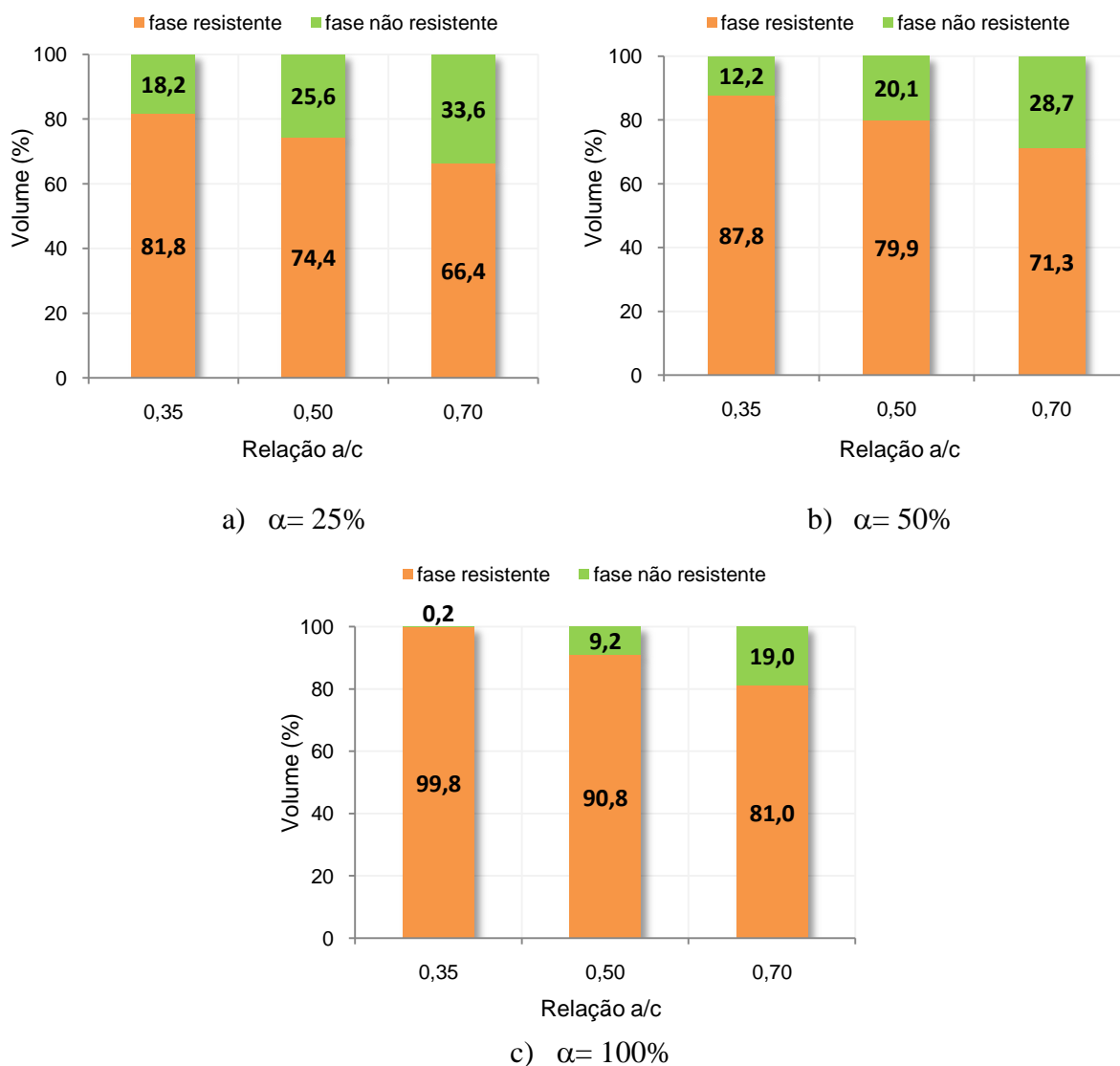
Os gráficos permitem observar que, à medida que o grau de hidratação aumenta, o volume (%) da *fase resistente* dos concretos também aumenta, enquanto que o volume da *fase não resistente* diminui, para todas as relações a/c, como esperado. Pode-se verificar, também, que

para os concretos com relação a/c 0,70, o volume da fase *não resistente* foi maior, em relação às demais relações a/c, independentemente do grau de hidratação.

No entanto, constata-se que os concretos com relação a/c 0,70, quando submetidos ao pré-carregamento, apresentaram desempenho superior aos demais concretos, inclusive aos de referência. Sabendo-se que existe uma relação inversa entre resistência e porosidade, conforme Mehta e Monteiro (2014, p.38), é possível dizer que o melhor desempenho dos concretos com relação a/c 0,70 está relacionado ao efeito de compactação, decorrente do carregamento. Tendo em vista que o volume da porosidade capilar é maior nos concretos com maiores relações a/c, pode-se considerar que o efeito de compactação, nesses concretos, foi preponderante. Como já discutido no item 5.2.1.8, quando foi abordado o efeito isolado da variável *pré-carregamento*, a quebra dos cristais maiores e mais frágeis promoveu a redução da porosidade, havendo o preenchimento dos vazios capilares com produtos resistentes. Assim, a capacidade resistente dos concretos com relação a/c 0,70, frente aos esforços decorrentes da secagem, foi melhorada a partir do pré-carregamento. Provavelmente, além da redução da porosidade total, a porosidade efetiva também deve ter sido reduzida devido ao efeito de compactação, diminuindo o volume de poros interconectados. Assim, a taxa de difusão diminuiu e, portanto, a retração por secagem também.

A Figura 88 (a), (b) e (c) apresenta os gráficos elaborados a partir do cálculo dos volumes das *fases resistente e não resistente* dos concretos com cimento CP IV, com as relações a/c utilizadas, considerando-se três diferentes graus de hidratação (25%, 50% e 100%). De acordo com o quadro apresentado no item 2.3.3.3, um concreto produzido com o cimento CP IV, aos 3 dias, desenvolveu 45,8% da resistência aos 28 dias (100%).

Figura 88: Volume (%) das fases constituintes dos concretos com CP IV, nas relações a/c 0,35, 0,50 e 0,70, para diferentes graus de hidratação: (a) 25%; (b) 50% e (c) 100%



Para os concretos com cimento CP IV, assim como ocorreu com os concretos com cimento CP V ARI, à medida que o grau de hidratação aumentou, o volume (%) da *fase resistente* dos concretos também aumentou. Ao mesmo tempo, o volume da *fase não resistente* diminuiu, para todas as relações a/c, conforme esperado. Nos concretos com relação a/c 0,70, o volume da *fase não resistente* foi maior, em relação às demais relações a/c, independentemente do grau de hidratação, assim como ocorreu com os concretos com CP V ARI. Observa-se, contudo, que nos concretos com cimento CP IV os volumes correspondentes às fases não resistentes foram maiores, para os menores graus de hidratação, provavelmente devido às



reações mais lentas características dos cimentos pozolânicos. Entre os concretos com CP IV, somente os de relação a/c 0,70 apresentaram menores deformações por secagem, devido às razões já mencionadas para os concretos com CP V ARI.

A análise da interação das variáveis *pré-carregamento* e *relação a/c*, para os concretos com os cimentos CP V ARI e CP IV evidenciam, portanto, a ocorrência de uma competição entre dois efeitos principais, um de compactação e outro de microfissuração. Provavelmente, nos concretos com relação a/c 0,70, mais porosos, o efeito de compactação e, conseqüente, de redução da porosidade, foi preponderante. Nos concretos com relação a/c 0,35, com menor porosidade, supõe-se que o efeito preponderante tenha sido o de microfissuração. Principalmente para os concretos com CP IV, cujo desenvolvimento das reações de hidratação e da capacidade resistente ocorrem mais lentamente em relação aos concretos com CP V ARI, o efeito de microfissuração causado pelo carregamento nas primeiras idades pode ter sido mais importante.

#### 5.2.1.12 Efeito da interação das variáveis: *tempo de secagem, idade de cura e pré-carregamento*

As Figuras 89 e 90 apresentam o efeito da interação das variáveis *tempo de secagem, idade de cura e pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Observa-se que as curvas dos concretos com cimento CP V ARI, curados por 28 dias e pré-carregados (CAR=25%, CAR=50% e CAR=75%), apresentaram desenvolvimento bastante semelhante, ao longo do tempo. As deformações dos concretos pré-carregados foram menores em relação às apresentadas pelo concreto de referência, principalmente a partir do tempo de secagem TS=8 semanas. As deformações por retração dos concretos curados até 7 dias foram, em geral, maiores do que as dos concretos com cura de 28 dias.

Figura 89: Interação das variáveis tempo de secagem, idade de cura e pré-carregamento: CP V ARI

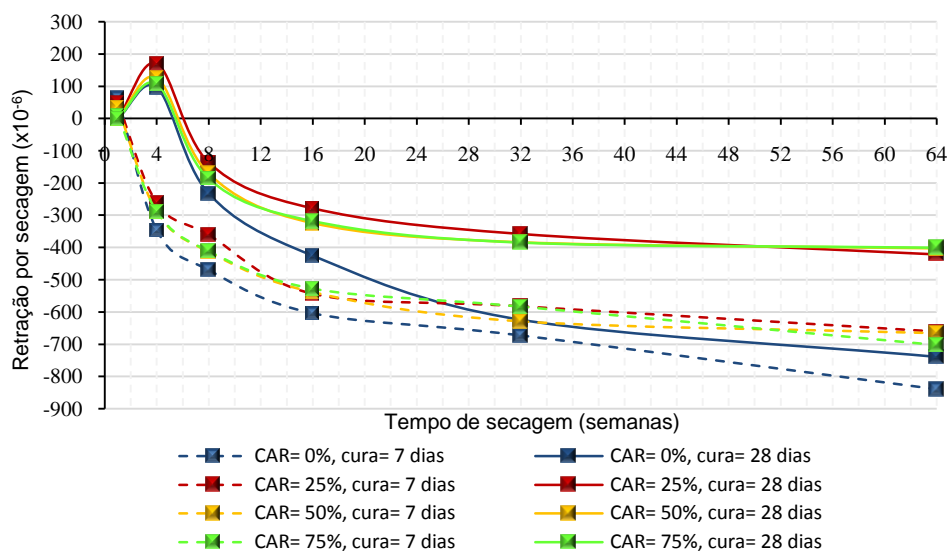
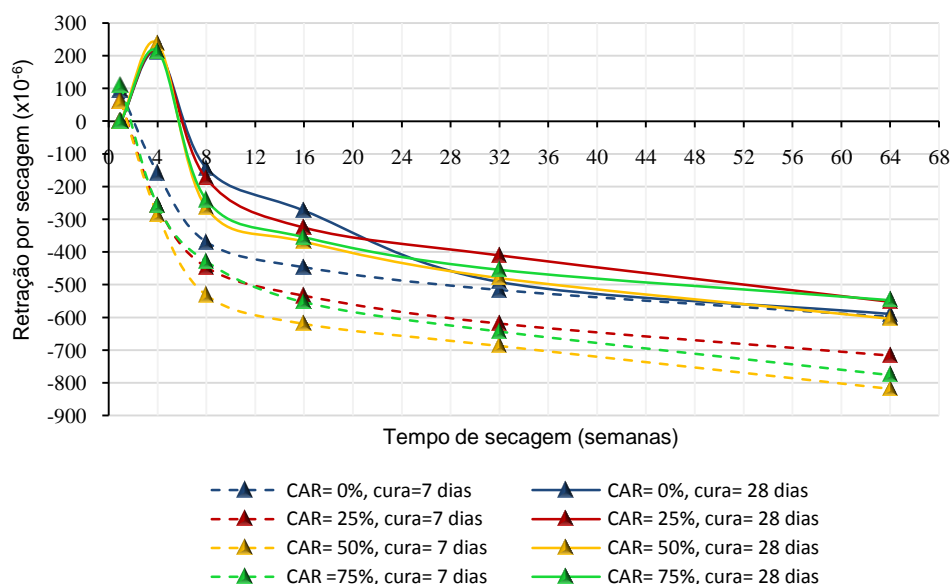


Figura 90: Interação das variáveis tempo de secagem, idade de cura e pré-carregamento: CP IV



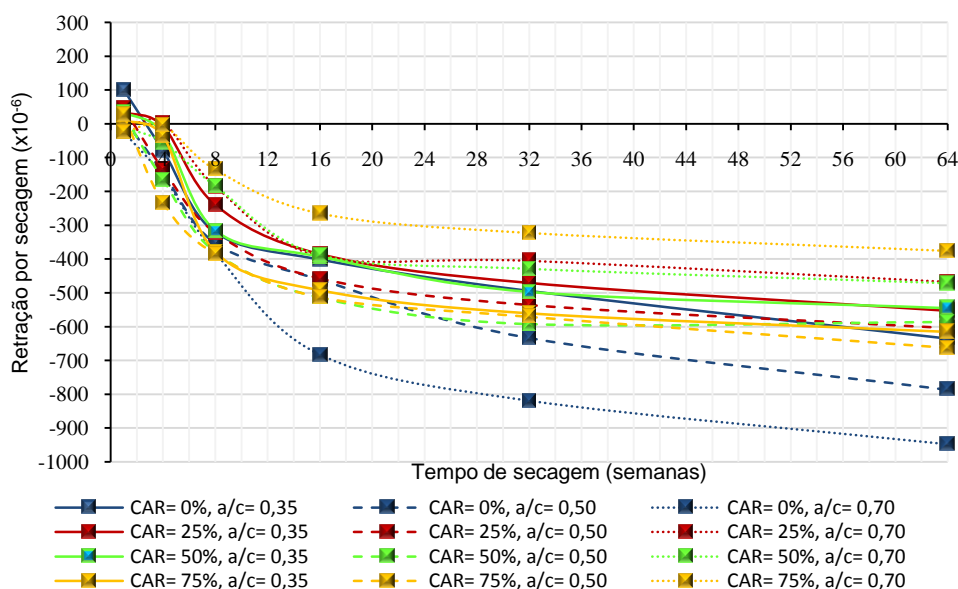
Comparando-se o desenvolvimento das curvas relativas aos concretos com CP IV, curados por 28 dias, verifica-se que apresentaram menores deformações por secagem em relação aos concretos curados por 7 dias, de um modo geral. Destaca-se que os concretos de referência, curados por 7 dias, apresentaram valores de retração média bem próximos aos concretos pré-carregados (CAR=50% e CAR=75%) curados por 28 dias, a partir do TS=32 semanas. Os

concretos pré-carregados com CAR=50% apresentaram o pior desempenho frente às tensões originadas durante a secagem. A maior variação entre as deformações por retração dos concretos pré-carregados, em relação aos de referência, foi correspondente a 8% para os cp's com CAR=75%.

#### 5.2.1.13 Efeito da interação das variáveis: *tempo de secagem, relação a/c e pré-carregamento*

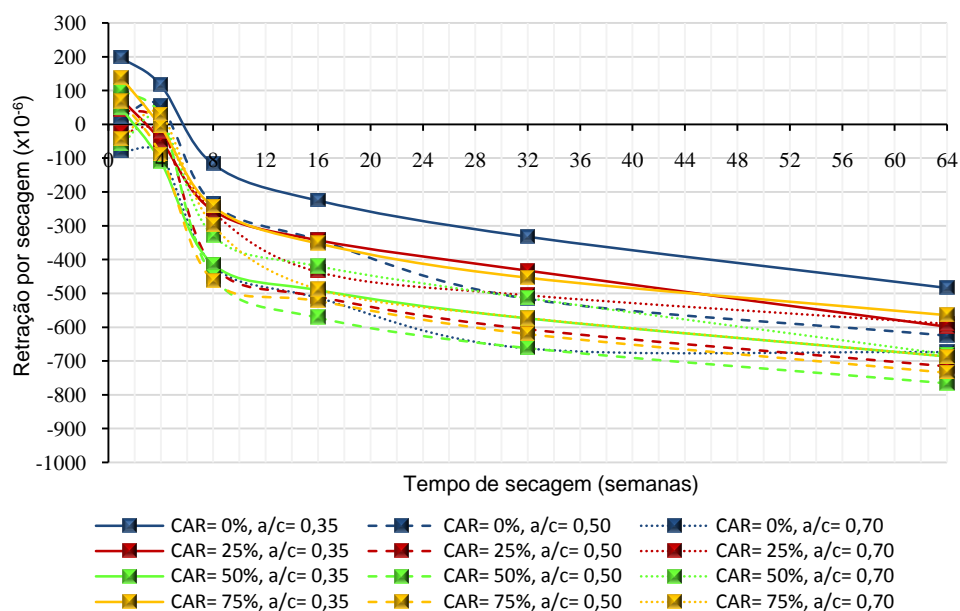
As Figuras 91 e 92 apresentam o efeito da interação das variáveis *tempo de secagem, relação a/c e pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Figura 91: Interação das variáveis *tempo de secagem, relação a/c e pré-carregamento*: CP V ARI



Comparando-se as curvas das deformações por secagem dos concretos com CP V ARI, considerando todos os níveis das variáveis *relação a/c e pré-carregamento*, verifica-se que o melhor desempenho frente à retração por secagem foi do concreto com relação a/c=0,70 e CAR=75% e, o pior, foi obtido pelo concreto de referência, com a mesma relação a/c. Para o nível de pré-carregamento CAR=75%, as maiores variações entre as retrações médias nos tempos de secagem TS=8 e 64 semanas foram apresentadas pelos concretos com relação a/c=0,70.

Figura 92: Interação das variáveis *tempo de secagem*, *relação a/c* e *pré-carregamento*: CP IV



Para os concretos com cimento CP IV, o melhor desempenho frente à retração por secagem foi obtido pelo concreto de referência, com relação  $a/c=0,35$ . Em geral, as maiores deformações médias foram obtidas pelos concretos com relação  $a/c=0,50$ , submetidos ao pré-carregamento.

#### 5.2.1.14 Efeito da interação das variáveis: *idade de cura*, *relação água/cimento* e *pré-carregamento*

As Figuras 93 e 94 apresentam o efeito da interação das variáveis *idade de cura*, *relação a/c* e *pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Os gráficos permitem observar o efeito diferenciado da idade de cura para as diferentes relações utilizadas, considerando os diferentes níveis de pré-carregamento. Nos concretos com CP V ARI, o efeito favorável do pré-carregamento para a relação  $a/c=0,70$  também ficou bastante evidente através do gráfico da Figura 93. Os concretos pré-carregados apresentaram deformações menores em relação aos concretos de referência, para ambas as idades de cura. As reduções obtidas nos concretos com relação  $a/c=0,70$  e  $CAR=75\%$  foram de 79% e 90% para períodos de cura de 7 e 28 dias, respectivamente.

Figura 93: Interação das variáveis *idade de cura*, *relação a/c* e *pré-carregamento*: CP V ARI

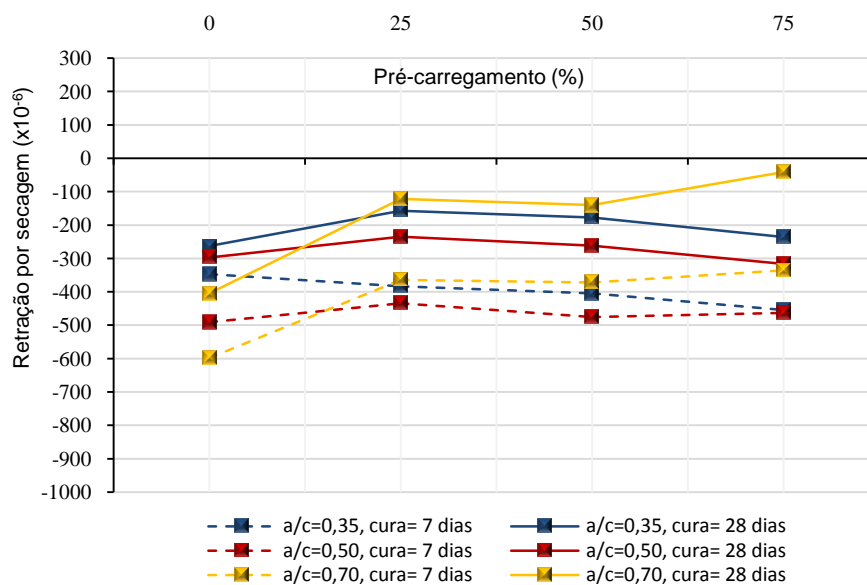
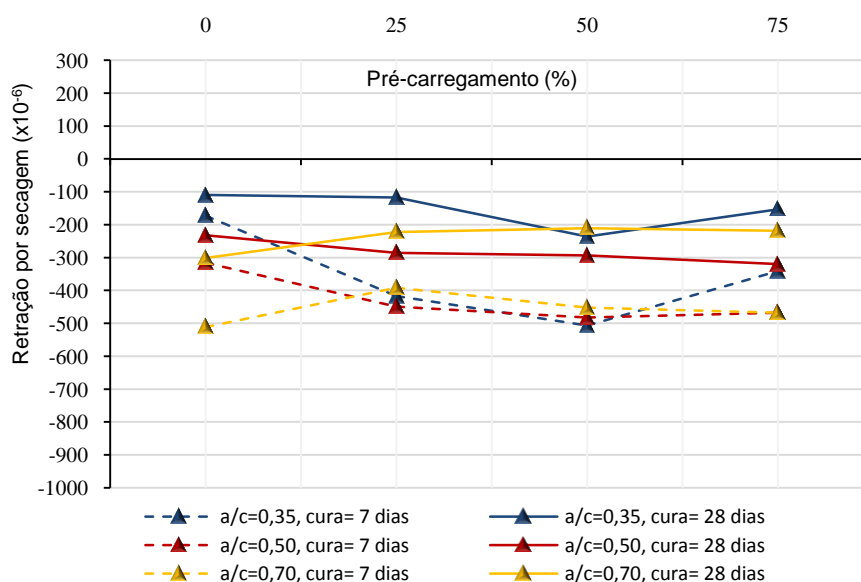


Figura 94: Interação das variáveis *idade de cura*, *relação a/c* e *pré-carregamento*: CP IV



Entre os concretos produzidos com CP IV, pode-se dizer que o efeito favorável do pré-carregamento também pôde ser observado nos concretos com relação  $a/c=0,70$ , nas duas idades de cura adotadas, como se vê no gráfico da Figura 94. Em geral, o melhor desempenho frente à retração por secagem dos concretos com cimento CP IV foi obtido com a relação  $a/c=0,35$ , com cura de 28 dias.

É possível visualizar, através dos gráficos que as tendências das curvas dos concretos com a mesma relação a/c são bastante semelhantes, para ambas as idades de cura. Considerando-se que os concretos curados por 7 dias e os curados por 28 dias foram todos moldados e ensaiados em períodos de tempo diferentes, a semelhança entre as tendências de comportamento reflete a confiabilidade do trabalho experimental, propiciando maior embasamento para a discussão dos resultados. Para os concretos produzidos com ambos os cimentos e para todas as relações a/c, novamente ficou evidenciada a tendência benéfica da cura prolongada na mitigação retração por secagem, principalmente para os concretos com relação a/c 0,70.

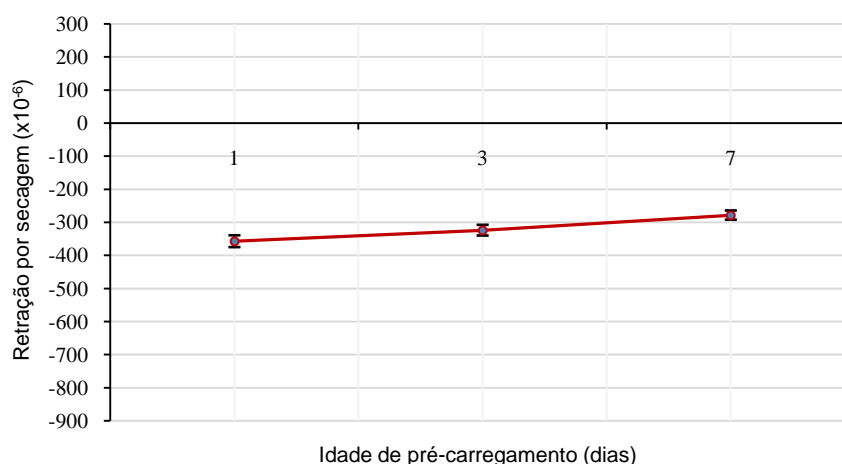
Conforme discutido anteriormente, as variáveis *idade de cura*, *relação a/c* e *pré-carregamento*, bem como suas interações de segunda ordem, influenciaram significativamente a retração por secagem dos concretos estudados. Sabe-se que a relação a/c, o tipo de cimento e a idade de cura afetam a formação da microestrutura, exercendo efeitos importantes na difusão (XI et al., 1994, p.258). Portanto, as alterações microestruturais provocadas pelo carregamento, devido ao efeito de compactação, afetaram a difusão e, portanto, influenciaram a retração por secagem.

#### 5.2.1.15 Efeito isolado da variável *idade de pré-carregamento*

Nesta pesquisa, a variável *idade de pré-carregamento* não se mostrou significativa para os concretos moldados com o cimento CP V ARI. Este resultado pode ter relação com as características físico-químicas do cimento CP V ARI, que propiciaram o rápido desenvolvimento da capacidade resistente dos concretos, desde a idade de 1 dia. Para os concretos produzidos com o cimento CP IV, a variável *idade de pré-carregamento* exerceu efeito significativo na retração por secagem.

A Figura 95 apresenta o efeito da variável *idade de pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com o cimento CP IV.

Figura 95: Efeito isolado da variável *idade de pré-carregamento* na retração por secagem: CP IV



Para os concretos com CP IV, os valores de retração média obtidos foram menores para as maiores idades de pré-carregamento. Houve um aumento de 22% da retração média dos concretos pré-carregados na idade de 1 dia, em relação aos pré-carregados aos 7 dias. Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa, supõe-se que, nos concretos produzidos com CP IV, cujo desenvolvimento da microestrutura é mais lento em relação aos concretos com cimento CP V ARI, a incidência de microfissuras na zona de transição e na matriz, em decorrência do pré-carregamento aplicado nas idades de 1 e 3 dias, possa ter prejudicado a sua capacidade resistente, justificando os piores desempenhos nestas idades.

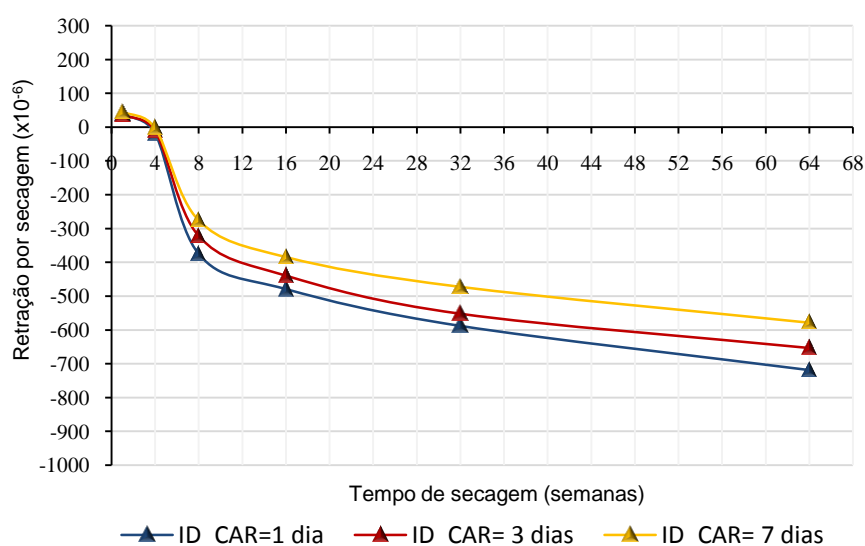
Vieira (2008, p. 114) constatou que os concretos produzidos com o cimento CP IV apresentaram aumento da resistência à tração por compressão diametral, quando foram pré-carregados na idade de 7 dias, em relação ao pré-carregamento realizado nas idades de 1 e 3 dias. De acordo com a pesquisadora, esse aumento pode ser explicado devido ao fato de que, na idade de 7 dias, as reações pozolânicas já ocorreram, densificando a estrutura e aumentando a resistência. Além disso, a aplicação do pré-carregamento reduz a exsudação provocada pela expulsão da água nos poros, contribuindo para a melhoria da zona de transição (MEHTA e MONTEIRO<sup>110</sup>, *apud* VIEIRA, 2008, p.114).

<sup>110</sup> MEHTA, P.K. e MONTEIRO, P.J.M. Concreto-Microestrutura, Propriedades e Materiais. IBRACON, 2014. 751 p.

### 5.2.1.16 Efeito da interação das variáveis: *tempo de secagem* e *idade de pré-carregamento*

A interação das variáveis *tempo de secagem* e *idade de pré-carregamento* foi significativa para os concretos produzidos com o cimento CP IV, mas não exerceu influência significativa para o CP V ARI. A Figura 96 apresenta o efeito da interação dessas variáveis na retração por secagem dos concretos produzidos com o cimento CP IV.

Figura 96: Efeito da interação das variáveis *tempo de secagem* e *idade de pré-carregamento* na retração por secagem: CP IV



Para os concretos como cimento CP IV, observa-se o efeito diferenciado das idades de pré-carregamento, ao longo do tempo de secagem. As menores deformações ocorreram para as maiores idades de pré-carregamento, principalmente a partir do tempo de secagem TS=8 semanas, até o término do ensaio.

### 5.2.1.17 Efeito da interação das variáveis: *idade de cura* e *idade de pré-carregamento*

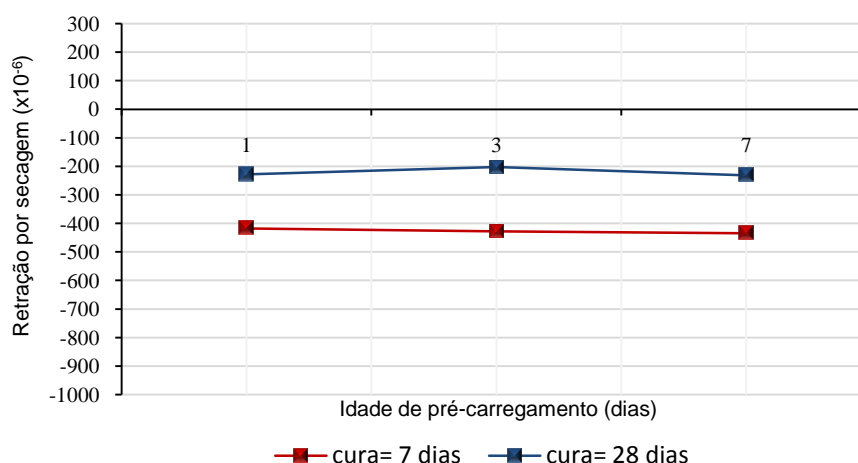
A interação das variáveis *idade de cura* e *idade de pré-carregamento* foi significativa para o cimento CP V ARI, mas não exerceu influência significativa para o CP IV. A Figura 97 apresenta o efeito da interação dessas variáveis na retração por secagem, para os concretos produzidos com os cimentos CP V ARI.

Para os concretos como cimento CP V ARI, observa-se o efeito diferenciado das idades de pré-carregamento, em função da idade de cura. As maiores deformações por secagem ocorreram para a maior idade de pré-carregamento (id\_cura=7 dias), com as duas idades de cura adotadas. Como se observa através do gráfico, é notório o efeito benéfico da cura



prolongada, visto que, para qualquer nível adotado da variável *idade de pré-carregamento*, as deformações devidas à retração por secagem foram menores quando a *idade de cura* foi maior (id\_cura=28 dias).

Figura 97: Interação das variáveis *idade de cura* e *idade de pré-carregamento*: CP V ARI



#### 5.2.1.18 Efeito da interação das variáveis: *relação água/cimento* e *idade de pré-carregamento*

As Figuras 98 e 99 mostram o efeito da interação das variáveis *relação a/c* e *idade de pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Conforme Figura 98, na idade de carregamento de 1 dia, o pior desempenho foi obtido nos concretos produzidos com cimento CP V ARI e relação  $a/c=0,35$ . Já os concretos com relação  $a/c=0,70$  apresentaram retrações médias menores em relação aos concretos com as demais relações  $a/c$ , obtendo-se reduções percentuais de 23%, em comparação aos concretos com relação  $a/c=0,50$  e, de 27%, aos concretos com relação  $a/c=0,35$ . Pode-se dizer que, para os concretos com este cimento, a compactação decorrente do pré-carregamento na idade de 1 dia promoveu maiores benefícios para a maior relação  $a/c$ , devido à maior porosidade. Pode-se dizer que o carregamento precoce possibilitou, nestes concretos, o rearranjo da microestrutura devido à quebra dos cristais maiores e mais fracos, promovendo tanto a redução da migração de umidade, quanto o aumento da capacidade resistente dos concretos.

Figura 98: Interação das variáveis *relação a/c* e *idade de pré-carregamento*: CP V ARI

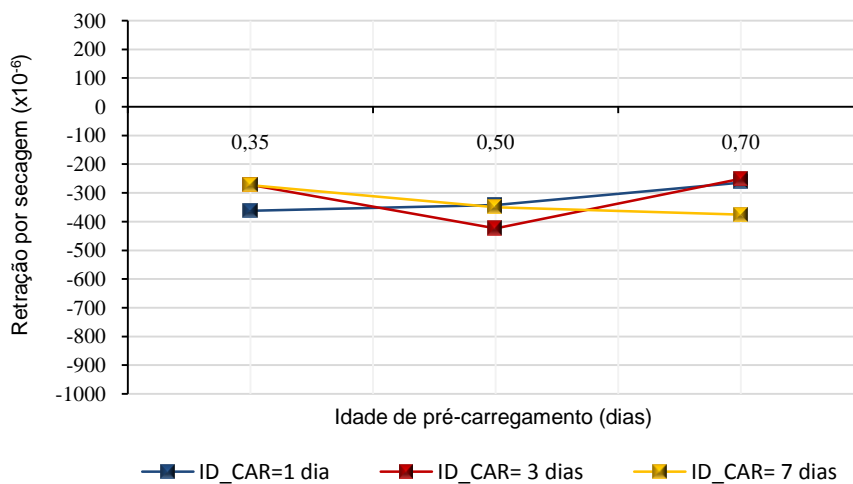
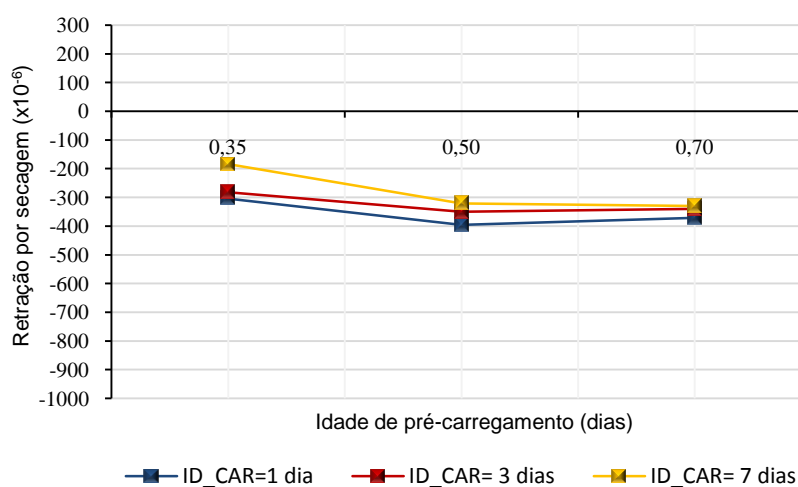


Figura 99: Interação das variáveis *relação a/c* e *idade de pré-carregamento*: CP IV



Observa-se um comportamento inverso para os concretos pré-carregados na idade de 7 dias, corroborando os resultados obtidos por outros pesquisadores (HEIDE e SCHLANGEN, 2007, p. 11). Considerando-se que curvas apresentadas representam o comportamento médio dos concretos, os resultados incluem a retração por secagem dos concretos submetidos aos dois períodos de cura (7 e 28 dias). Portanto, é correto afirmar que os concretos pré-carregados na idade de 7 dias, e curados até essa idade, não tiveram as mesmas condições dos concretos submetidos à cura prolongada, em relação à disponibilidade de água para a continuidade das reações de hidratação dos grãos anidros. Além disso, a disponibilidade da

água é indispensável para a autocicatrização das microfissuras geradas pelo pré-carregamento. Portanto, o pré-carregamento nas menores idades (1 e 3 dias) foi mais favorável do que aos 7 dias, possibilitando a continuidade das reações de hidratação, e promovendo a densificação dos concretos, bem como a selagem das microfissuras (autocicatrização).

Conforme já abordado no item 5.3.1.15, os concretos com o cimento CP IV, devido às suas características físico-químicas, desenvolvem mais lentamente sua microestrutura, em relação aos concretos com o cimento CP V ARI. Assim, os resultados obtidos através da interação das variáveis em questão podem estar relacionados à menor capacidade resistente dos concretos com cimento CP IV, nas primeiras idades, e à maior fragilidade da matriz dos concretos com este cimento e relação  $a/c=0,70$ .

#### 5.2.1.19 Efeito da interação das variáveis: *pré-carregamento* e *idade de pré-carregamento*

As Figuras 100 e 101 apresentam o efeito da interação das variáveis *pré-carregamento* e *idade de pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos

CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Figura 100: Interação das variáveis *pré-carregamento* e *idade de pré-carregamento*: CP V ARI

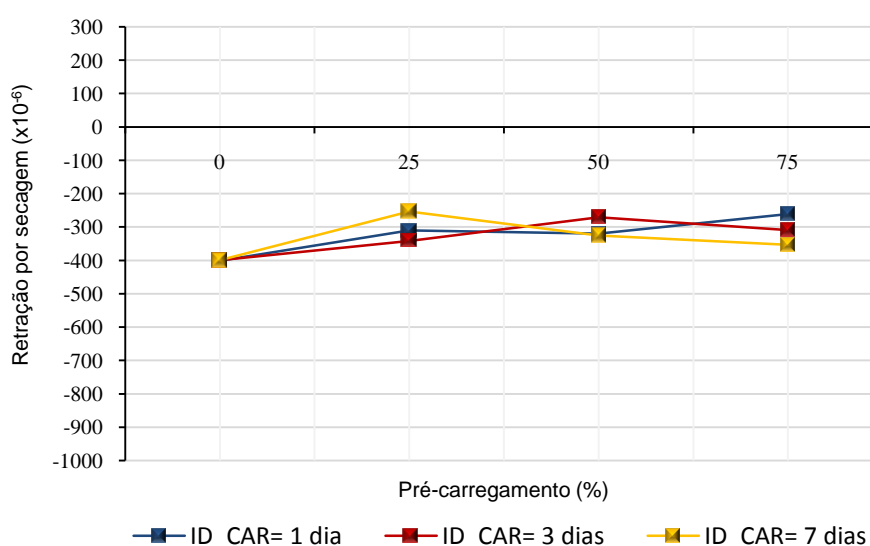
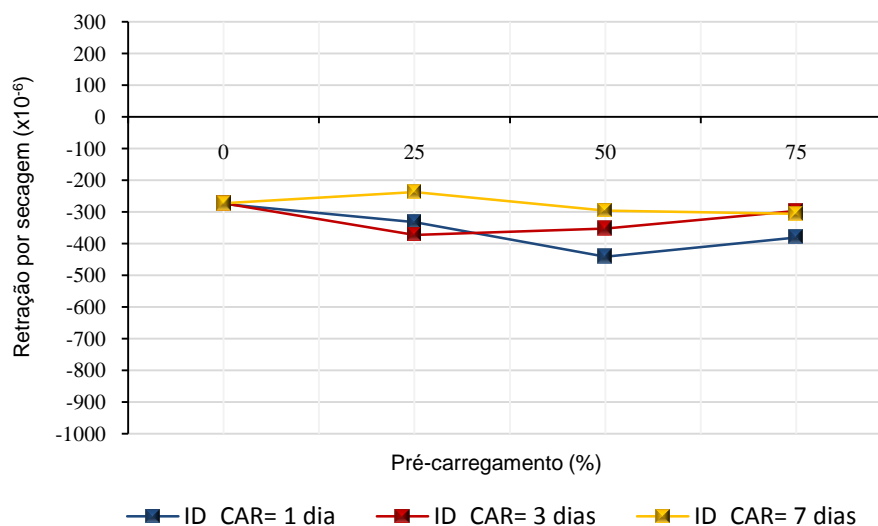


Figura 101: Interação das variáveis *pré-carregamento* e *idade de pré-carregamento*: CP IV



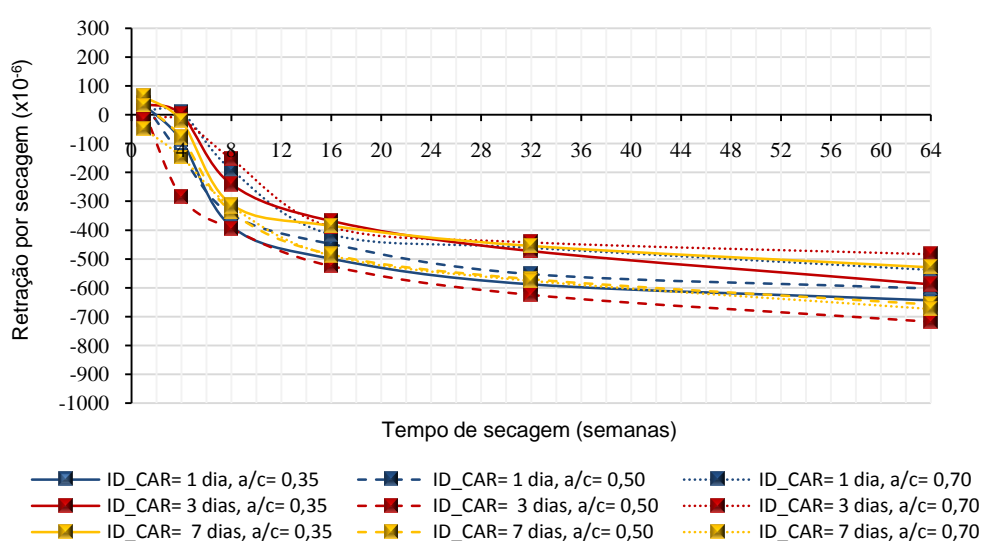
É possível constatar que, para os concretos com CP V ARI, os concretos pré-carregados apresentam menores valores de retração em comparação à retração média dos concretos de referência, para qualquer idade de pré-carregamento. Observa-se que para a ID\_CAR=7 dias houve uma tendência de aumento da retração média, à medida que o percentual de pré-carregamento aumentou. Assim, para a ID\_CAR=7 dias, os maiores percentuais de carregamento levaram a situações mais desfavoráveis. Por outro lado, de um modo geral, houve redução da retração média dos concretos pré-carregados na ID\_CAR=1 dia, para os maiores níveis de pré-carregamento, ou seja, quando CAR=50% e 75%.

Nos concretos com CP IV, houve aumento da retração por secagem dos concretos pré-carregados em relação aos de referência, independentemente da idade de pré-carregamento, exceto para quando ID\_CAR=7 dias e CAR=25% quando ocorreu uma redução de 13% da retração dos concretos pré-carregados em relação aos de referência. Os maiores aumentos da retração média por secagem, em comparação aos concretos de referência, foram obtidos para os concretos pré-carregados com 50% e 75% da carga média de ruptura, na idade de 1 dia, sendo de 38% e 28%, respectivamente.

### 5.2.1.20 Efeito da interação das variáveis: *tempo de secagem, relação água/cimento e idade de pré-carregamento*

A Figura 102 apresenta o efeito da interação das variáveis *tempo de secagem, relação a/c e idade de pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com o cimento CP V ARI. A interação destas variáveis não foi significativa para o cimento CP IV.

Figura 102: Interação das variáveis *tempo de secagem, relação a/c e idade de pré-carregamento*: CP V ARI



Para os concretos com cimento CP V ARI, os menores valores de retração média, ao longo do tempo, foram obtidos pelos concretos com relação  $a/c=0,35$ , pré-carregados nas idades 3 e 7 dias e pelos concretos com relação  $a/c=0,70$ , pré-carregados nas idades de 1 e 3 dias. A situação mais desfavorável foi obtida pelos concretos com relação  $a/c=0,50$ , pré-carregados, na idade de 3 dias.

### 5.2.1.21 Efeito da interação das variáveis: *idade de cura, relação água/cimento e idade de pré-carregamento*

As Figuras 103 e 104 apresentam o efeito da interação das variáveis *idade de cura, relação a/c e idade de pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Através do gráfico da Figura 103, observa-se que as curvas não apresentaram a mesma tendência de comportamento, para todas as relações  $a/c$ , em função dos diferentes níveis da variável *idade de pré-carregamento*. No entanto, as curvas apresentam a mesma tendência de comportamento, para ambas as idades de cura. Para este cimento, caracterizado pelo rápido

desenvolvimento da microestrutura e, conseqüentemente, de suas propriedades mecânicas, o pré-carregamento na idade de 1 dia foi mais favorável para os concretos com a relação a/c 0,70, provavelmente devido à redução do volume de poros capilares.

Figura 103: Interação das variáveis *idade de cura*, *relação a/c*, e *idade de pré-carregamento*: CP V ARI

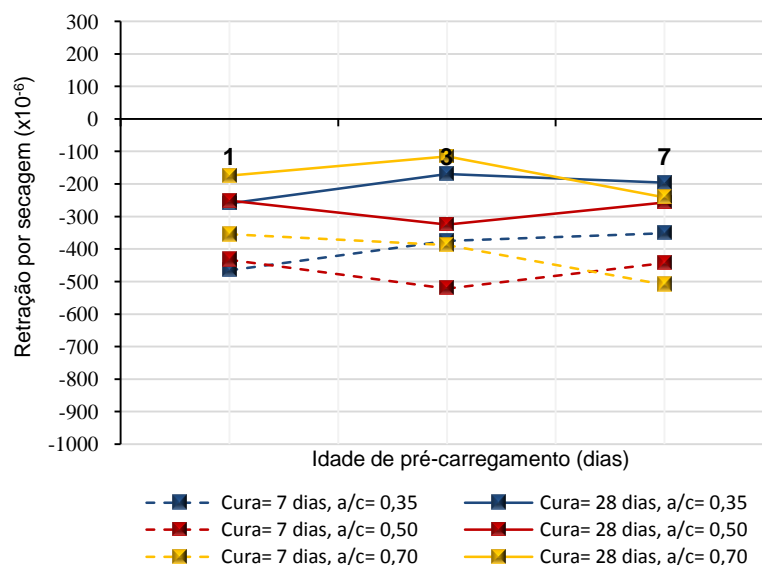
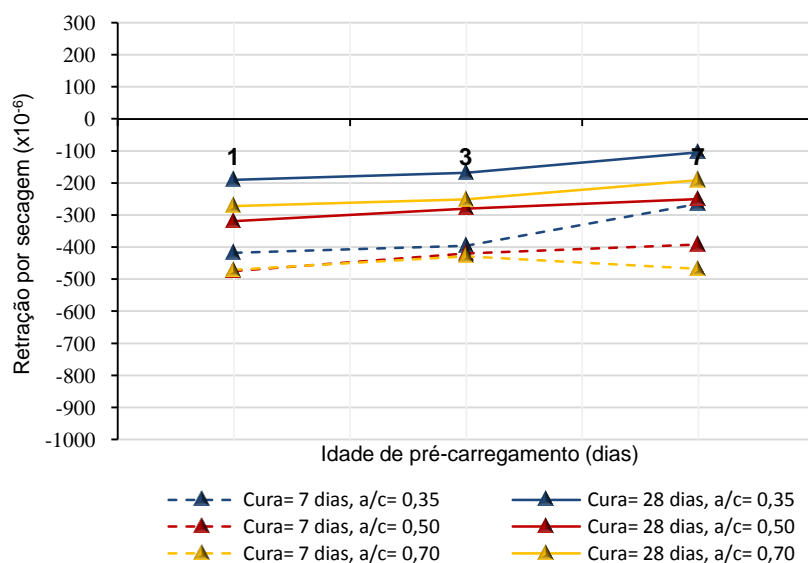


Figura 104: Interação das variáveis *idade de cura*, *relação a/c*, e *idade de pré-carregamento*: CP IV



Para os concretos com cimento CP IV, percebe-se uma tendência geral de comportamento: independente da relação a/c, as maiores deformações por retração foram obtidas para as menores idades de pré-carregamento.

Para os concretos produzidos com ambos os cimentos, para todas as relações a/c, independentemente da idade de pré-carregamento, ficou evidenciada novamente a tendência benéfica da cura prolongada na mitigação das tensões resultantes da secagem. A cura prolongada possibilitou a continuidade da hidratação dos grãos anidros de cimento, expostos em função da quebra dos cristais maiores, em decorrência do pré-carregamento. Assim, na presença de água, foi possível a criação de novos produtos resistentes, os quais preencheram os espaços vazios da microestrutura. Além disso, a cura prolongada possibilitou a autocicatrização das microfissuras geradas pelo pré-carregamento, em zonas nas quais as tensões de tração excederam a capacidade resistente dos concretos.

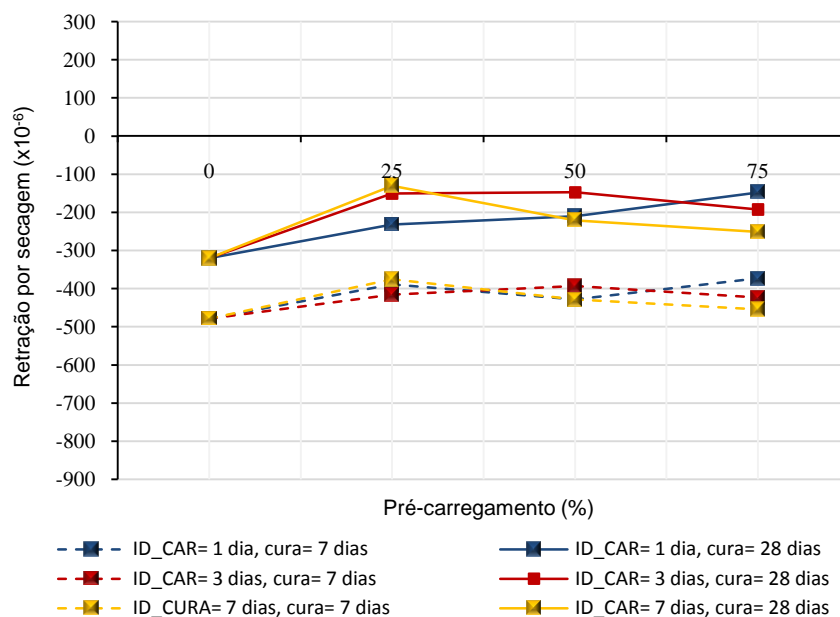
#### 5.2.1.22 Efeito da interação das variáveis: *idade de cura, pré-carregamento e idade de pré-carregamento*

A Figura 105 mostra o efeito da interação das variáveis *idade de cura, pré-carregamento e idade de pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI. A interação destas variáveis não foi significativa para o cimento CP IV.

Através da interação entre as variáveis, é possível observar que, quando a idade de cura foi de 28 dias, para os concretos pré-carregados na idade de 1 dia, o desempenho dos concretos foi melhor, à medida que aumentou o percentual de pré-carregamento. Com as idades de 3 e 7 dias, as situações mais favoráveis ocorreram quando o pré-carregamento foi de 25%. Mesmo assim, para todas as combinações entre as variáveis, o pré-carregamento, associado à cura prolongada, foi benéfico, melhorando o desempenho dos concretos frente à retração por secagem. Quando a idade de cura foi de 7 dias, os melhores desempenhos foram obtidos para as combinações entre o pré-carregamento de 25% e a idade de pré-carregamento de 7 dias, bem como para o pré-carregamento de 75% e a idade de 1 dia.

Novamente, destaca-se a semelhança nas tendências de comportamento dos concretos, considerando-se as mesmas idades de pré-carregamento, para ambas as idades de cura.

Figura 105: Efeito da interação das variáveis *idade de cura*, *pré-carregamento* e *idade de pré-carregamento*: CP V ARI



### 5.2.1.23 Efeito da interação das variáveis: *relação água/cimento*, *pré-carregamento* e *idade de pré-carregamento*

As Figuras 106 e 107 apresentam o efeito da interação das variáveis *relação a/c*, *pré-carregamento* e *idade de pré-carregamento* na retração por secagem dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Figura 106: Interação das variáveis *relação a/c*, *pré-carregamento* e *idade de pré-carregamento*: CP V ARI

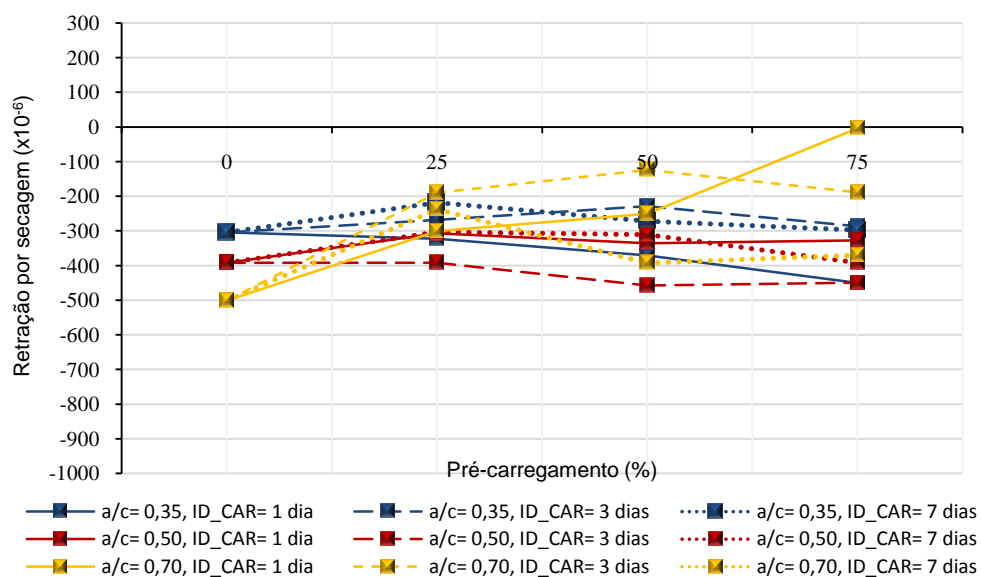
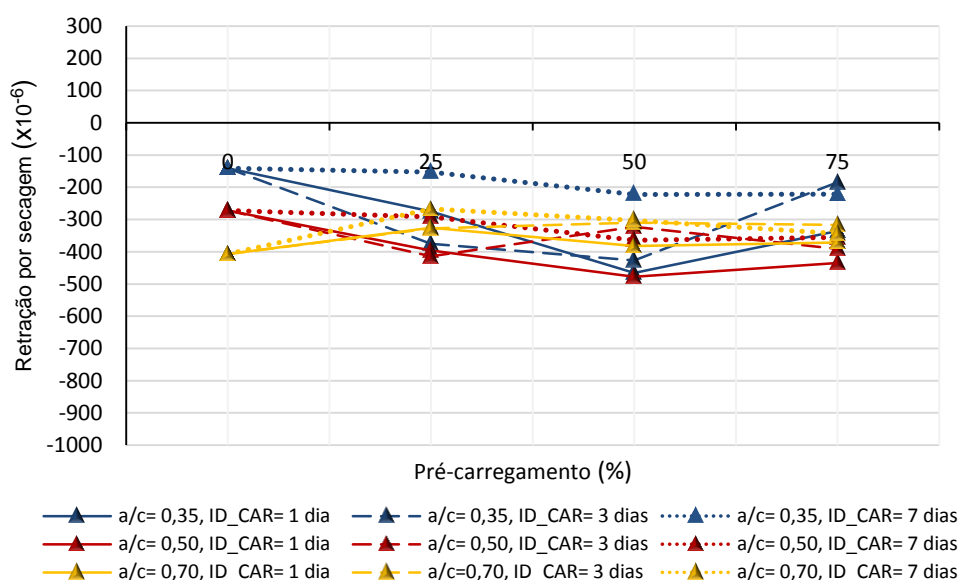




Figura 107: Interação das variáveis *relação a/c*, *pré-carregamento* e *idade de pré-carregamento*: CP IV



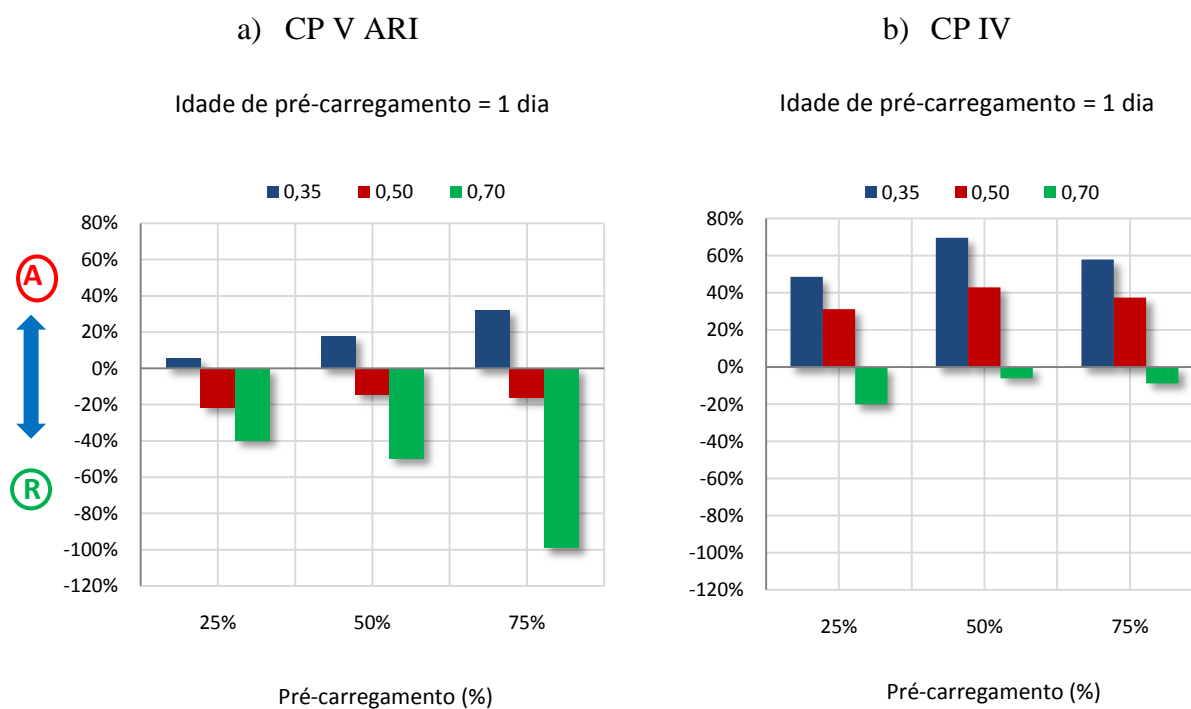
Conforme Figura 106, de uma forma geral, os concretos pré-carregados apresentaram melhor desempenho frente à retração por secagem, quando comparados aos concretos de referência. Para o nível de pré-carregamento de 25%, a menor retração média foi obtida pelos concretos com relação  $a/c=0,70$  e idade de pré-carregamento de 3 dias. A maior retração média para este nível de carregamento foi a dos concretos com relação  $a/c=0,50$ , também na idade de pré-carregamento de 3 dias. Para o nível de pré-carregamento de 50%, a menor retração média foi obtida pelos concretos com relação  $a/c=0,70$  e idade de pré-carregamento de 3 dias. A maior retração média para este nível de carregamento foi a dos concretos com relação  $a/c=0,50$  e idade de pré-carregamento de 3 dias. Para o nível de pré-carregamento de 75%, a menor retração média foi obtida pelos concretos com relação  $a/c=0,70$  e idade de pré-carregamento de 1 dia. A maior retração média para este nível de carregamento também foi a dos concretos com relação  $a/c=0,50$  e idade de pré-carregamento de 3 dias.

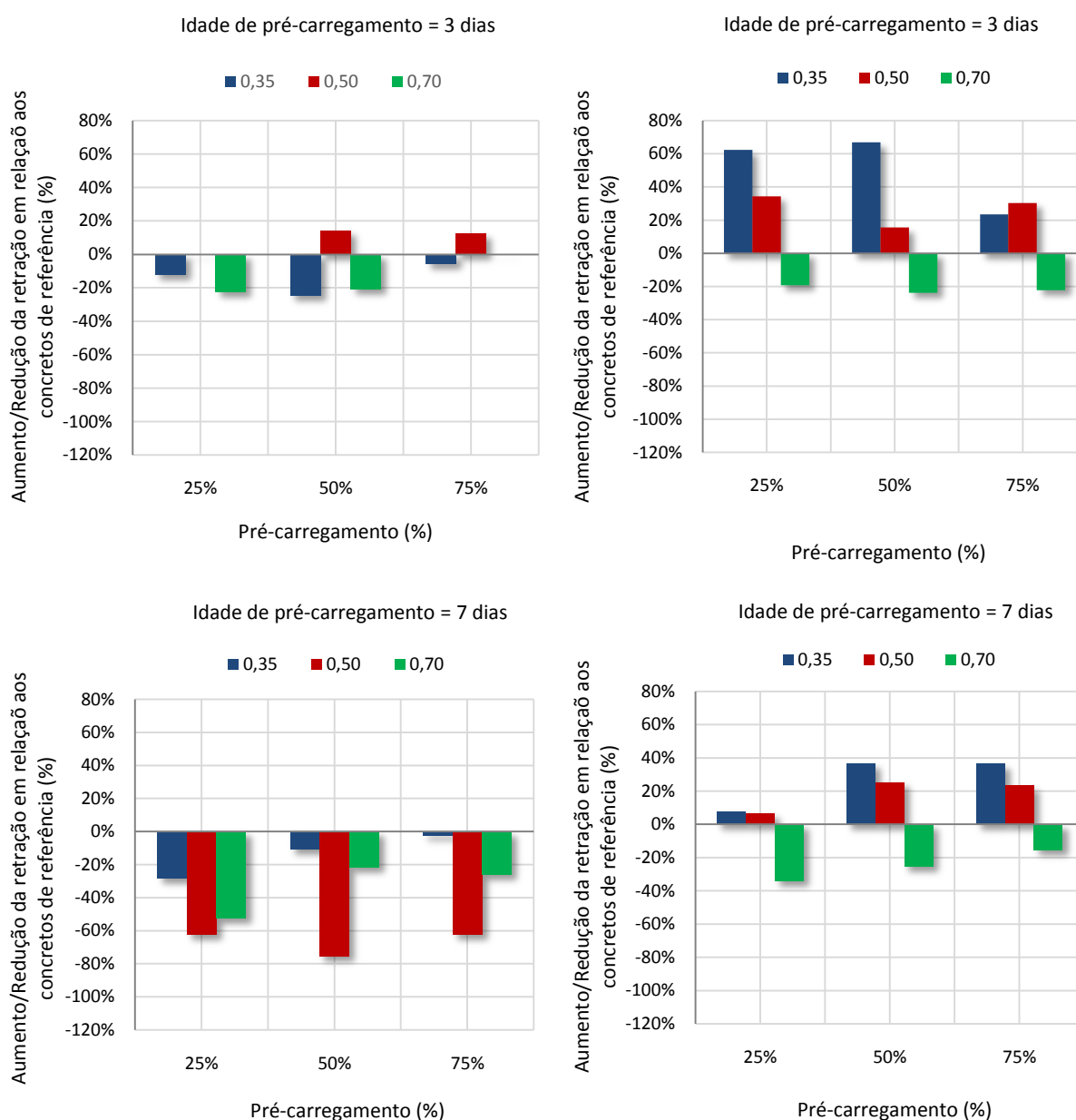
De acordo com o gráfico da Figura 107, de uma forma geral, os concretos com CP IV pré-carregados apresentaram pior desempenho frente à retração por secagem, quando comparados aos concretos de referência. Para o nível de pré-carregamento de 25%, a menor retração média foi obtida pelos concretos com relação  $a/c=0,35$  e idade de pré-carregamento de 7 dias. A maior retração média para este nível de carregamento foi a dos concretos com relação  $a/c=0,50$  e idade de pré-carregamento de 3 dias. Para o nível de pré-carregamento de 50%, a menor retração média foi obtida pelos concretos com relação  $a/c=0,35$  e idade de pré-

carregamento de 7 dias. A maior retração média para este nível de carregamento foi a dos concretos com relação  $a/c=0,50$  e idade de pré-carregamento de 1 dia. Para o nível de pré-carregamento de 75%, a menor retração média foi obtida pelos concretos com relação  $a/c=0,35$  e idade de pré-carregamento de 3 dias. A maior retração média para este nível de carregamento também foi a dos concretos com relação  $a/c=0,50$  e idade de pré-carregamento de 1 dia.

Na Figura 108 (a) e (b) apresentam-se gráficos que mostram os aumentos/reduções percentuais das *retrações médias X pré-carregamento* (%), para cada *relação a/c*, obtidos para os concretos com os cimentos CP V ARI e CP IV, respectivamente.

Figura 108: Aumento/redução percentual da retração por secagem dos concretos pré-carregados em relação aos de referência, em função dos níveis de pré-carregamento (25%, 50% e 75%)





### 5.3 MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR PARA RETRAÇÃO FINAL

Considerou-se oportuno o desenvolvimento de *Modelos de Regressão Linear* para possibilitar a realização de simulações, de modo a favorecer o maior entendimento da influência do pré-carregamento na retração do concreto. Devido às razões mencionadas no item 5.2, os modelos de regressão possibilitam uma análise adequada do fenômeno estudado se forem utilizados os resultados correspondentes a uma única idade.

Neste caso, foram gerados modelos de regressão a partir dos resultados de retração por secagem obtidos ao término do ensaio, isto é, na idade final (64 semanas), para os cimentos CP V ARI e CP IV. Salienta-se, portanto, que ao contrário da análise de variância apresentada

no item 5.2.1, quando foi analisado o comportamento médio dos concretos estudados (pré-carregados e de referência), nesta etapa da análise foram utilizados apenas os resultados finais da retração por secagem, obtidos através dos ensaios. Por essa razão, podem ser observadas algumas diferenças em relação aos resultados do comportamento médio dos concretos, evidenciados através da análise de variância.

Para o desenvolvimento dos modelos de regressão, utilizou-se o *software Microsoft Office Excel 2007* como ferramenta computacional. As simulações foram focadas nos efeitos de *diferentes idades de cura e diferentes níveis de pré-carregamento*.

A Tabela 22 apresenta os modelos desenvolvidos para verificar a influência das variáveis independentes na retração final (TS= 64 semanas), para os cimentos CP V ARI e CP IV.

Tabela 20: Modelos de regressão desenvolvidos para os cimentos CP V ARI e CP IV, considerando-se os valores da retração final (TS=64 semanas)

Cim	Modelos de regressão	R <sup>2</sup>
CPV ARI	$Ret_{64} = -1823 + 2970,5 \times a/c - 3,96 \times id_{car} + 11,4 \times car + 47 \times \left(\frac{id_{cura}}{3}\right) - 2655,5 \times a/c^2 - 0,11 \times car^2$	0,87
CP IV	$Ret_{64} = -1798 + 3535,5 \times a/c + 25,9 \times id_{car} - 3 \times car + 53,6 \times \left(\frac{id_{cura}}{3}\right) - 3396 \times a/c^2 + 0,03 \times car^2$	0,81

Sendo:

$Ret_{64}$  = retração no tempo de secagem TS=64 semanas

a/c = relação a/c;

id\_cura = idade de cura (dias)

car = pré-carregamento (%)

id\_car = idade de pré-carregamento (dias)

Os modelos desenvolvidos explicam 87% da variabilidade dos resultados, para o cimento CP V ARI, e 81% da variabilidade dos resultados, para o cimento CP IV, dentro de uma distribuição de probabilidade estatística. Para simular o efeito de cada variável, os modelos foram aplicados utilizando-se a média das demais, conforme Quadro 18.

Quadro 18: Valor médio das variáveis

<i>Valor médio das variáveis</i>	
<i>Relação a/c</i>	0,52
<i>Pré-carregamento (%)</i>	37,5
<i>Idade de pré-carregamento (dias)</i>	3,67
<i>Idade de cura (dias)</i>	17,5

As Figuras 109 e 110 apresentam o efeito de diferentes idades de cura na retração final (TS=64 semanas) dos concretos com cimento CP V ARI e CP IV. Os respectivos modelos foram aplicados utilizando-se 4 diferentes idades de cura, no intervalo entre 7 e 28 dias, para todas as relações a/c testadas, fixando-se no seu ponto médio as variáveis *pré-carregamento* (37,5%) e *idade de pré-carregamento* (3,67 dias), conforme Quadro 18.

Figura 109: Retração final (TS=64 semanas) dos concretos com CP V ARI, nas relações a/c 0,35; 0,50 e 0,70, considerando-se as idades de cura no intervalo entre 7 e 28 dias.

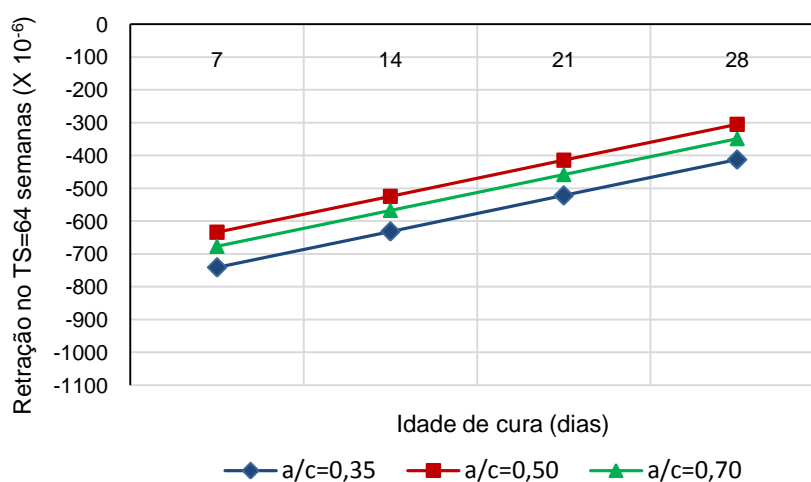
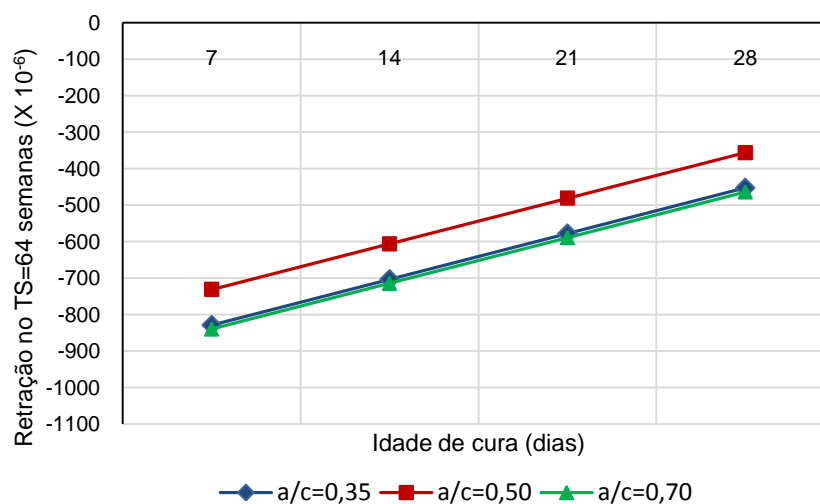


Figura 110: Retração final (TS=64 semanas) dos concretos com CP IV, nas relações a/c 0,35; 0,50 e 0,70, considerando-se as idades de cura no intervalo entre 7 e 28 dias.

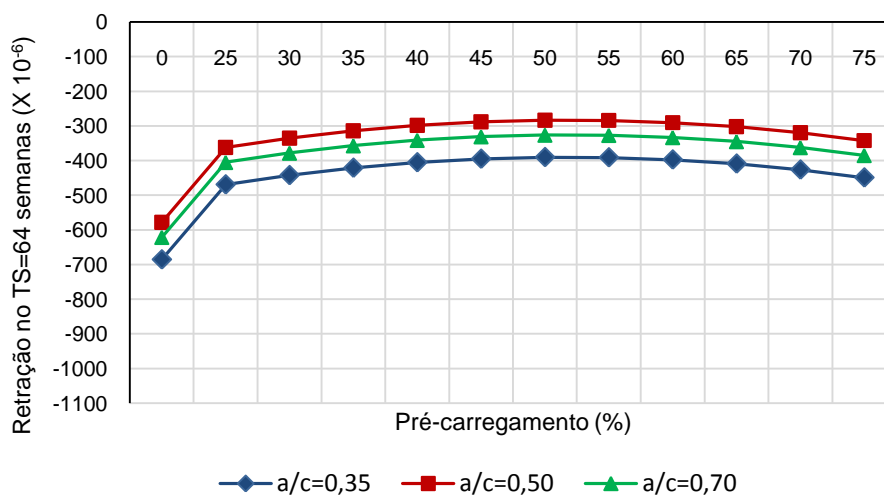


Os gráficos permitem observar que, para um nível de carregamento médio de 37,5%, e para ambos os cimentos, os concretos com relação a/c=0,50 apresentaram uma retração final (TS=64 semanas) menor em comparação aos concretos com as outras relações a/c utilizadas. Observa-se, também, que o valor da retração final reduz, à medida que o período de cura aumenta. Essa simulação evidencia a importância de prolongar a cura, pelo maior tempo possível, a fim de se garantir a adequada recuperação da capacidade resistente do concreto exposto à fissuração devido ao carregamento precoce.

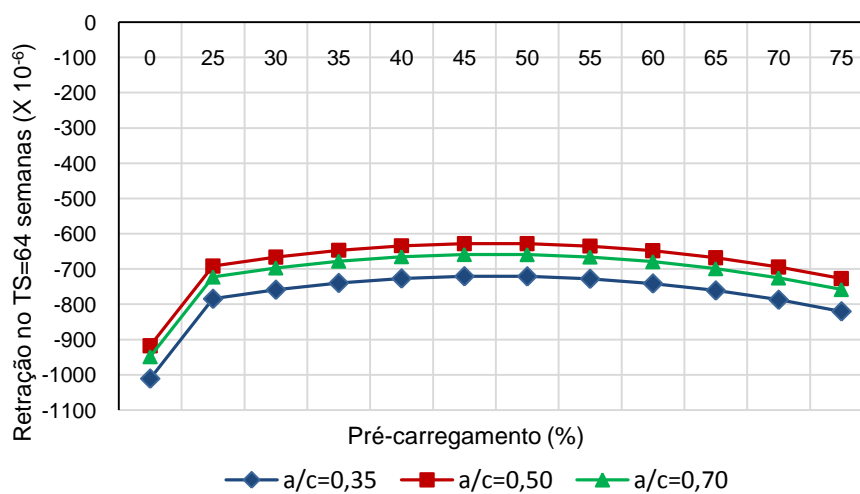
Os gráficos da Figura 111 apresentam o efeito de diferentes percentuais de pré-carregamento na retração final (TS=64 semanas) dos concretos com cimento CP V ARI e os gráficos (a) e (b) da Figura 112 mostram esse efeito para os concretos com cimento CP IV. Os gráficos (a) correspondem à idade de cura de 28 dias e (b), à cura de 7 dias.

Os respectivos modelos foram aplicados utilizando-se 12 diferentes percentuais de pré-carregamento, no intervalo entre 0% e 75%, com incrementos de carregamento de 5%, para as relações a/c testadas, fixando-se a variável *idade de pré-carregamento* no seu ponto médio (3,67), conforme Quadro 18.

Figura 111: Variação da retração por secagem no TS=64 semanas para incrementos de carregamento de 5%, considerando-se as relações a/c 0,35; 0,50 e 0,70, para as idades de cura (a) 28 dias e (b) 7 dias



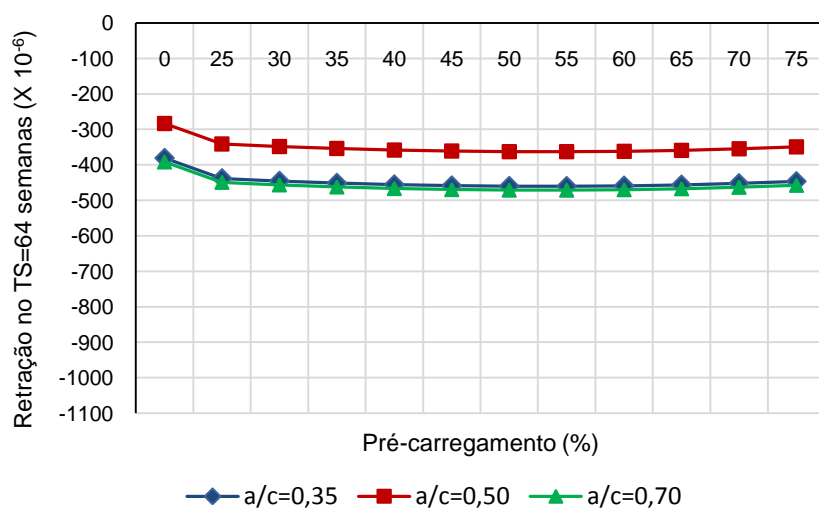
a) Idade de cura = 28 dias



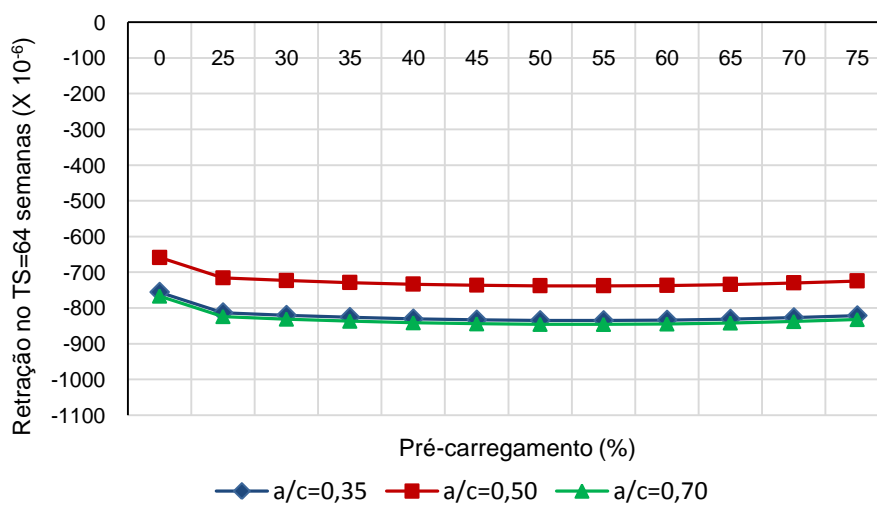
b) Idade de cura = 7 dias

Através dos gráficos (a) e (b) é possível constatar que, para todos os níveis de pré-carregamento testados (25% a 75%), a retração por secagem ao final do ensaio (TS=64 semanas) foi maior para os concretos de referência. Observa-se que, entre os concretos pré-carregados, existe uma tendência inicial de redução da retração com o incremento do carregamento, até um determinado limite, em torno de 50%, a partir do qual a retração começa a aumentar, para ambas as idades de cura.

Figura 112: Variação da retração por secagem no TS=64 semanas para incrementos de carregamento de 5%, considerando-se as relações a/c 0,35; 0,50 e 0,70, para as idades de cura (a) 28 dias e (b) 7 dias



a) Idade de cura = 28 dias



b) Idade de cura = 7 dias

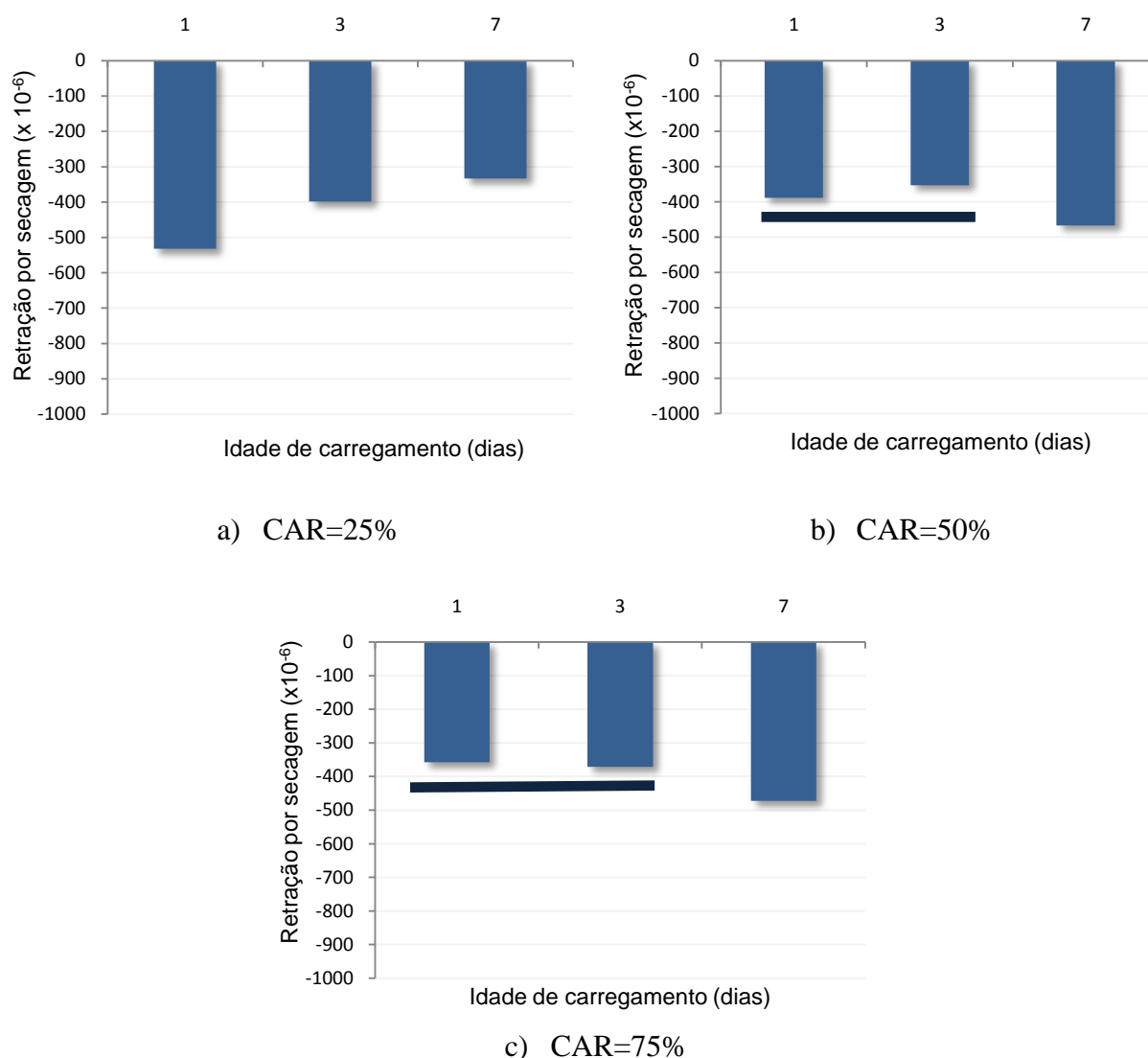
Os gráficos (a) e (b) demonstram que, para todos os níveis de pré-carregamento testados (25% a 75%), a retração por secagem ao final do ensaio (TS=64 semanas) foi menor para os concretos de referência. Observa-se que os concretos com relação a/c=0,50 apresentaram menor retração final (TS=64 semanas), para todos os níveis de pré-carregamento testados.



### 5.3.1 Comparação múltipla de médias

A partir dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ) referentes ao tempo de secagem TS=64 semanas, realizou-se a comparação múltipla de médias para os concretos com CP V ARI, com cura de 28 dias. A Figura 113 mostra os gráficos em função da variável *idade de pré-carregamento*, para os níveis da variável *pré-carregamento*, sendo (a) CAR 25%; (b) CAR 50%; e (c) CAR 75%, respectivamente.

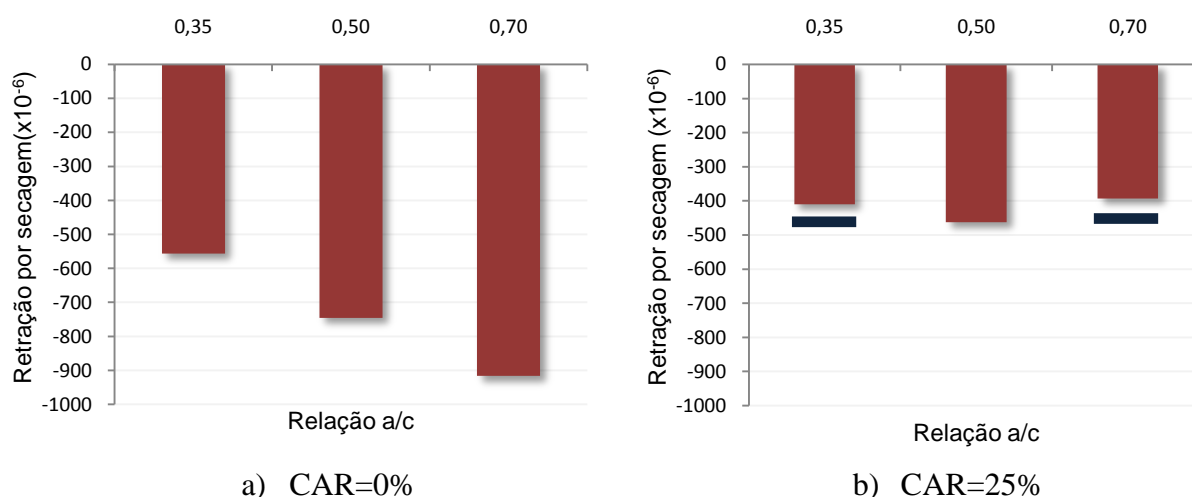
Figura 113: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64 semanas, em função dos níveis da variável *idade de pré-carregamento*, sendo (a) CAR=25%; (b) CAR=50%; (c) CAR=75%: CP V ARI, cura 28 dias

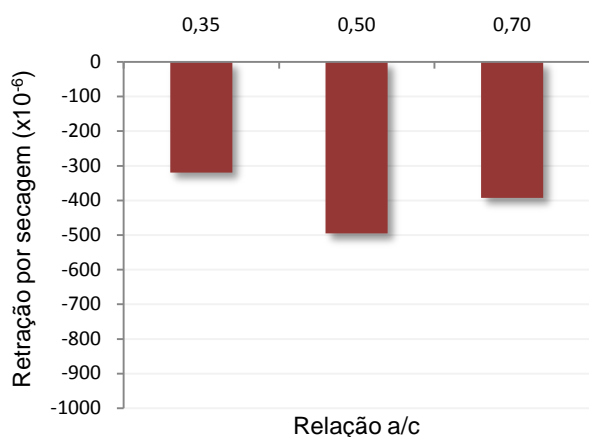


Observa-se que, para os concretos com CP V ARI curados por 28 dias, os menores valores de retração por secagem média ( $\times 10^{-6}$ ), ao final do ensaio (TS=64 semanas), foram obtidos através dos maiores níveis de pré-carregamento (50% e 75%), não havendo diferença significativa entre as médias da retração por secagem, quando o pré-carregamento foi aplicado nas menores idades de pré-carregamento (1 e 3 dias). Considerando-se a elevada taxa de hidratação do cimento CP V ARI, provavelmente os benefícios decorrentes do efeito de compactação, associado à cura prolongada, foram preponderantes nas menores idades, em relação à idade de pré-carregamento de 7 dias.

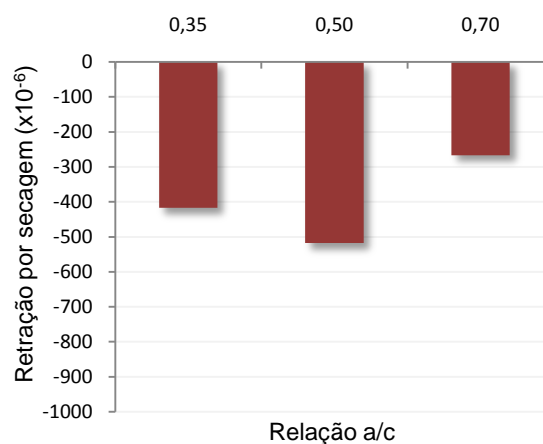
A partir dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64 semanas, realizou-se a comparação múltipla de médias para os concretos com CP V ARI curados por 28 dias, em função da variável *relação a/c*. A Figura 114 mostra os gráficos para os níveis da variável *pré-carregamento*, sendo (a) CAR 25%; (b) CAR 50%; e (c) CAR 75%, respectivamente.

Figura 114: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64 semanas, em função dos níveis da variável *relação a/c*, sendo (a) CAR=0%; (b) CAR=25%; c) CAR=50%; d) CAR=75%: CP V ARI, cura 28 dias





c) CAR=50%

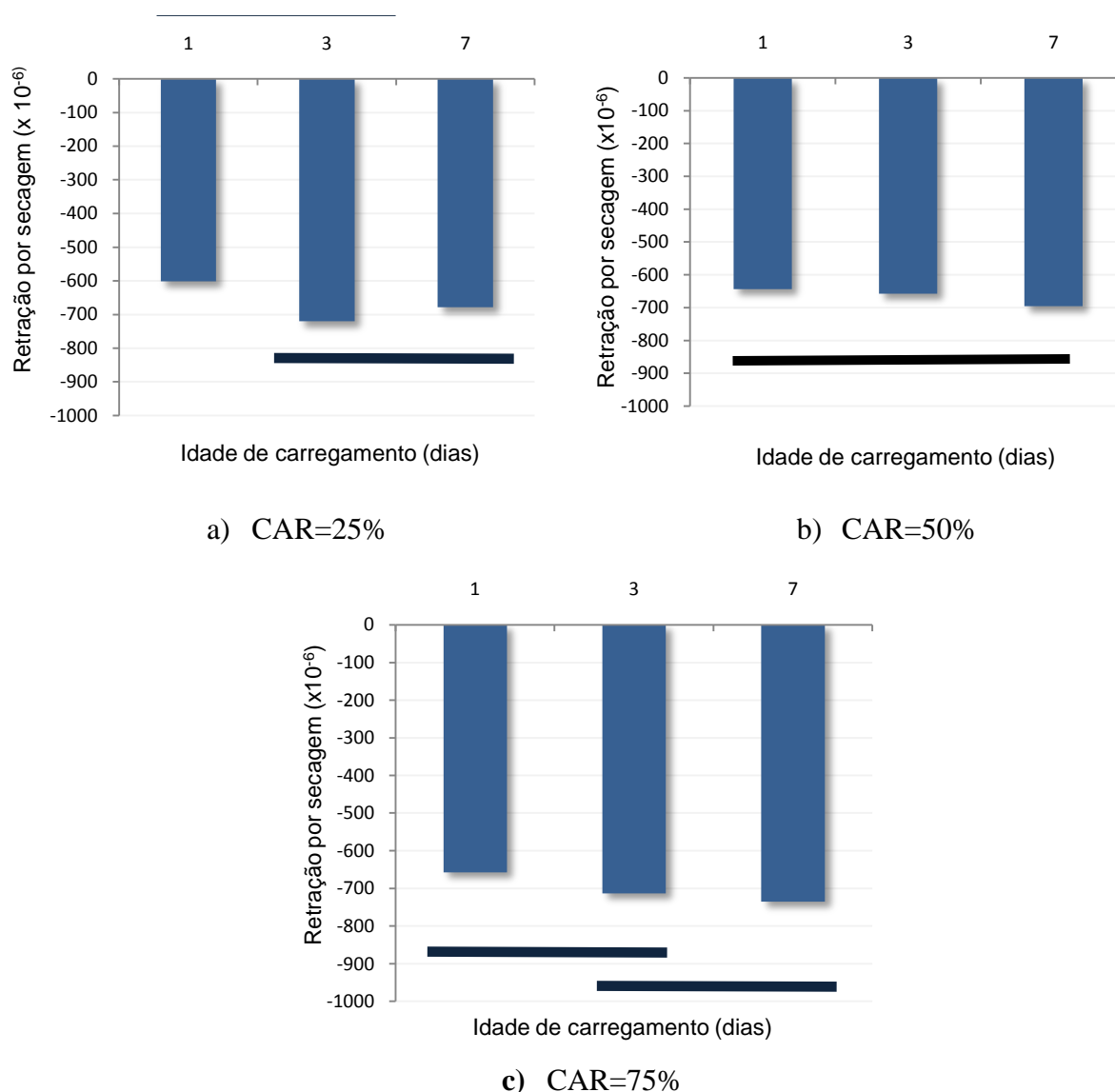


d) CAR=75%

Para os concretos de referência (CAR=0%), a retração por secagem média ( $\times 10^{-6}$ ), ao final do ensaio (TS=64 semanas), seguiu a tendência esperada, sendo proporcional à relação a/c, em função do aumento do volume da porosidade capilar. Considerando-se os níveis da variável *pré-carregamento*, ocorreram diferenças significativas entre os valores da retração por secagem média ( $\times 10^{-6}$ ), com a variação dos níveis da variável *relação a/c*, exceto para as condições: CAR=25% e relações a/c=0,35 e 0,70. Entre os concretos pré-carregados, observa-se que os maiores valores da retração média, para todos os níveis de pré-carregamento foram obtidos para a relação a/c de 0,50. É possível verificar que, para o cimento CP V ARI submetido à cura de 28 dias, a condição mais favorável foi obtida para a combinação CAR=75% *versus* relação a/c=0,70, evidenciando o efeito benéfico da redução das porosidades total e efetiva na retração por secagem média ( $\times 10^{-6}$ ), ao final do ensaio.

Realizou-se, também, a comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ) em função da variável *idade de pré-carregamento*, para os concretos com CP V ARI com cura de 7 dias, no tempo de secagem TS=64 semanas. A Figura 115 apresenta os gráficos para os níveis da variável *pré-carregamento* sendo (a) CAR 25%; (b) CAR 50%; e (c) CAR 75%, respectivamente.

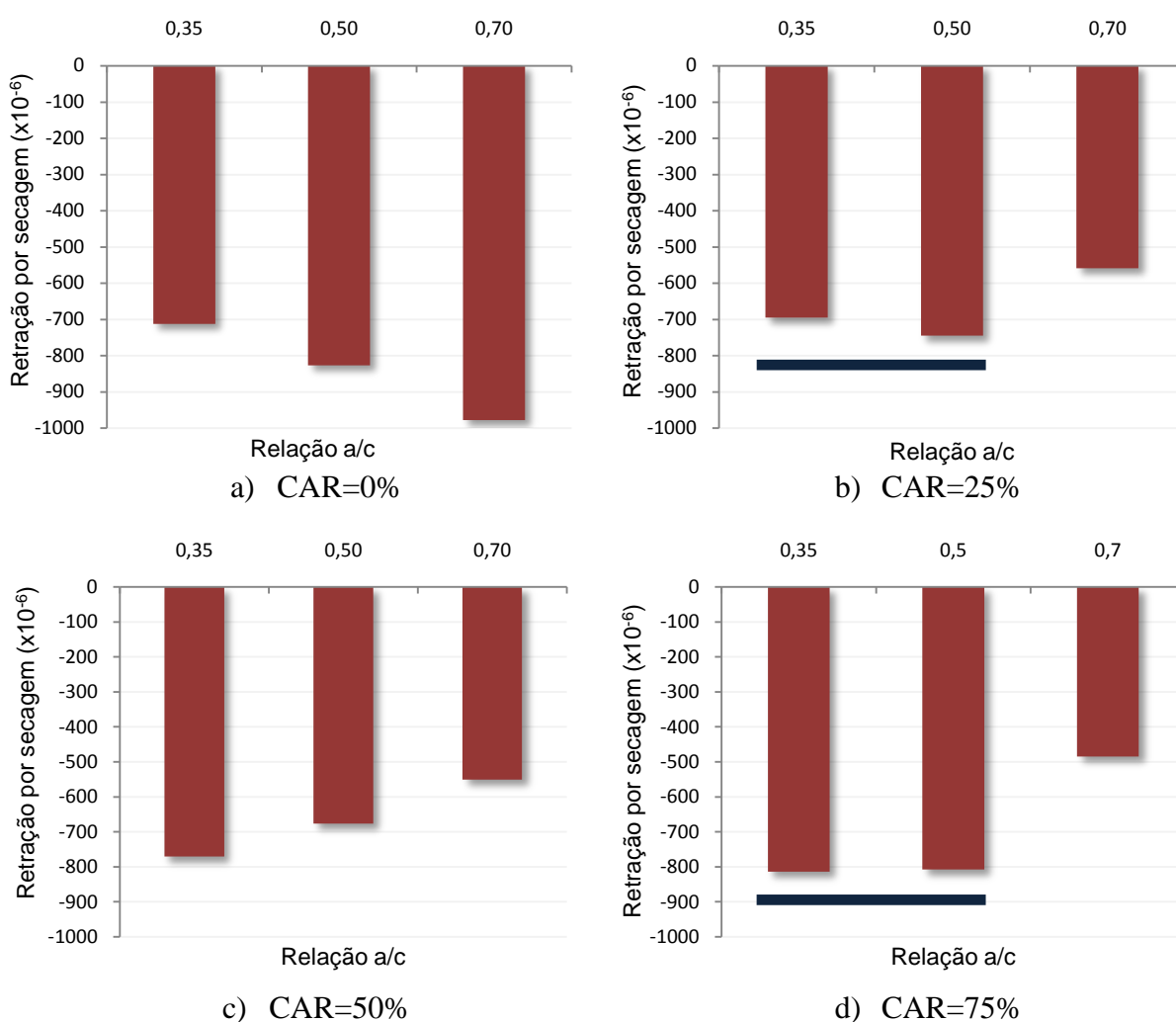
Figura 115: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64 semanas, em função dos níveis da variável *idade de pré-carregamento*, sendo (a) CAR=25%; (b) CAR=50%; (c) CAR=75%: CP V ARI com cura de 7 dias



De um modo geral, não ocorreram diferenças significativas entre as médias da retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ) referentes ao final do ensaio (64 semanas), em função da variação dos níveis da variável *idade de pré-carregamento*, para os concretos com cimento CP V ARI curados por 7 dias. Observa-se que os concretos pré-carregados na idade de 1 dia apresentaram valores de retração final menores em relação aos concretos pré-carregados nas demais idades, permanecendo imersos em água por mais tempo, em comparação aos pré-carregados em idades posteriores.

As Figuras 116 (a), (b) e (c) apresentam os gráficos da comparação múltipla de médias em função da variável *relação a/c*, considerando-se os níveis da variável *pré-carregamento* 0%, 25%, 50% e 75%, respectivamente, para os concretos com CP V ARI curados por 7 dias, no tempo de secagem TS=64.

Figura 116: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64, em função dos níveis da variável *relação a/c*, considerando-se (a) CAR=0%; (b) CAR=25%; (c) CAR=50%; (d) CAR=75%: CP V ARI, cura 7 dias



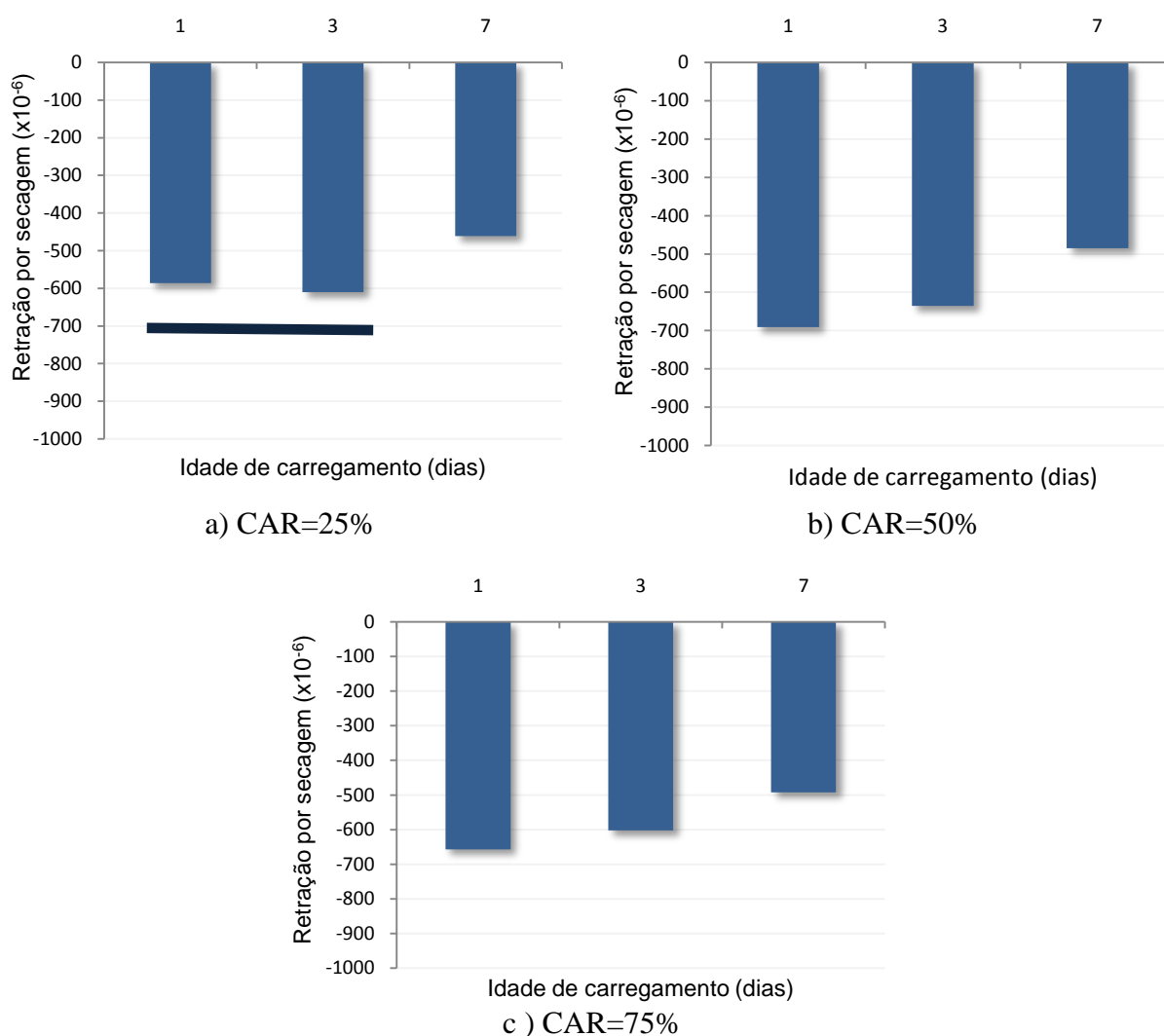
Foi verificado que para os concretos de referência (CAR=0%), a retração por secagem média ( $\times 10^{-6}$ ), ao final do ensaio (TS=64 semanas), seguiu a tendência esperada, sendo proporcional à relação a/c, em função do aumento do volume da porosidade capilar. Não foram observadas diferenças significativas entre as médias entre as médias da retração por secagem, para pré-

carregamentos de 25% e 75%, para as relações a/c 0,35 e 0,50, quando foi adotada cura de 7 dias.

Realizaram-se as mesmas análises para os concretos com o cimento CP IV, considerando-se o tempo de secagem TS=64 semanas e as duas idades de cura adotadas.

As Figuras 117 (a), (b) e (c) apresentam os gráficos em função da variável *idade de pré-carregamento*, para os níveis da variável *pré-carregamento*, sendo (a) 25%, (b) 50% e (c) 75%, respectivamente.

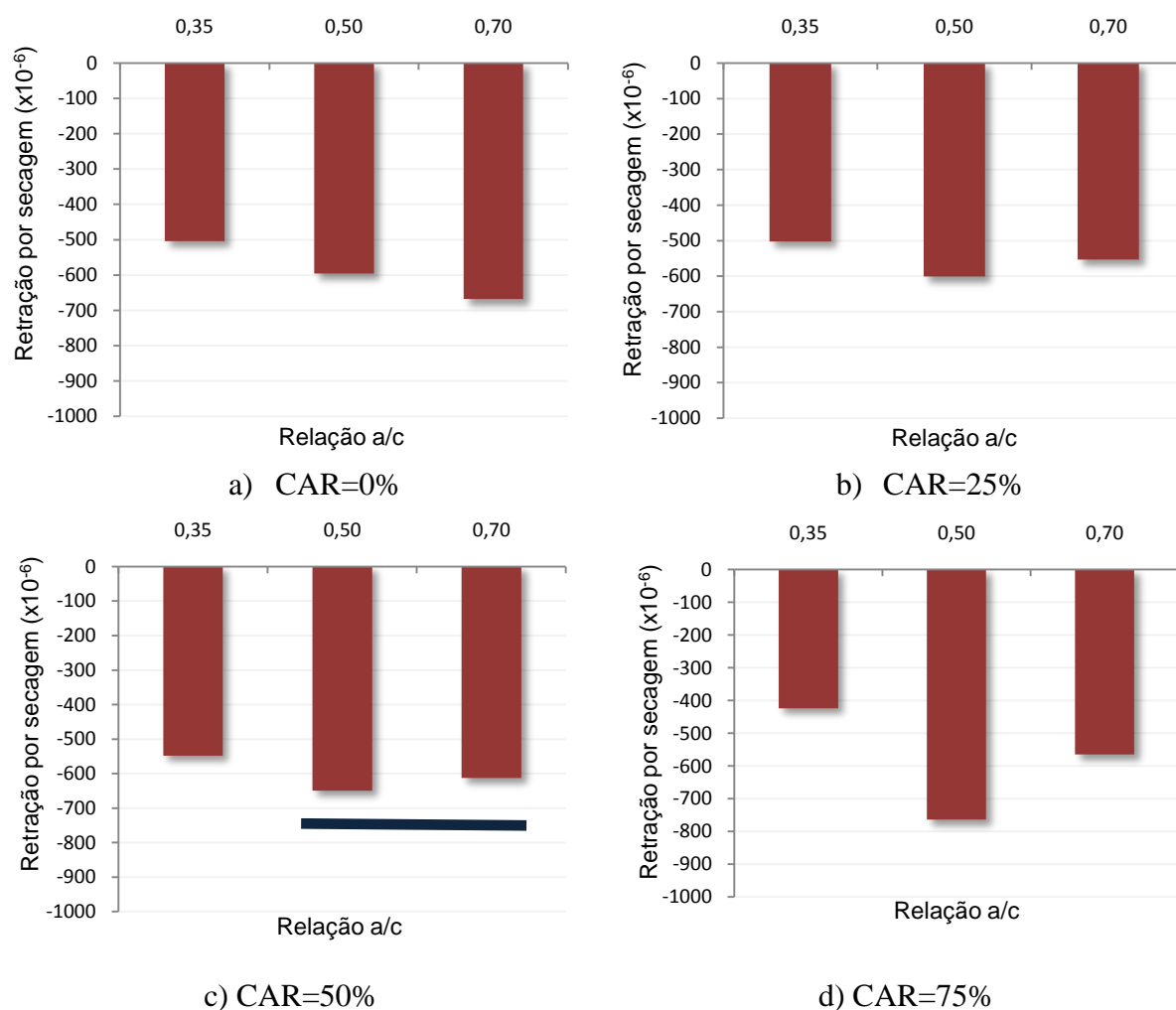
Figura 117: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64, em função dos níveis da variável *idade de pré-carregamento*, considerando-se (a) CAR=25%; (b) CAR=50%; (c) CAR=75%: CP IV, cura 28 dias



Para um pré-carregamento de 25%, não houve diferença significativa entre as médias da retração por secagem no TS=64 semanas, quando os concretos com CP IV foram curados por 28 dias e submetidos ao pré-carregamento nas idades de 1 e 3 dias. Observa-se que, para os maiores níveis de pré-carregamentos (50% e 75%), houve diferença significativa entre os níveis da variável *idade de pré-carregamento* e as maiores médias da retração final ocorreram para as menores idades (1 e 3 dias).

As Figuras 118 (a), (b), (c) e (d) apresentam os gráficos em função da variável *relação a/c*, para os níveis da variável *pré-carregamento* 0%, 25%, 50% e 75%, respectivamente.

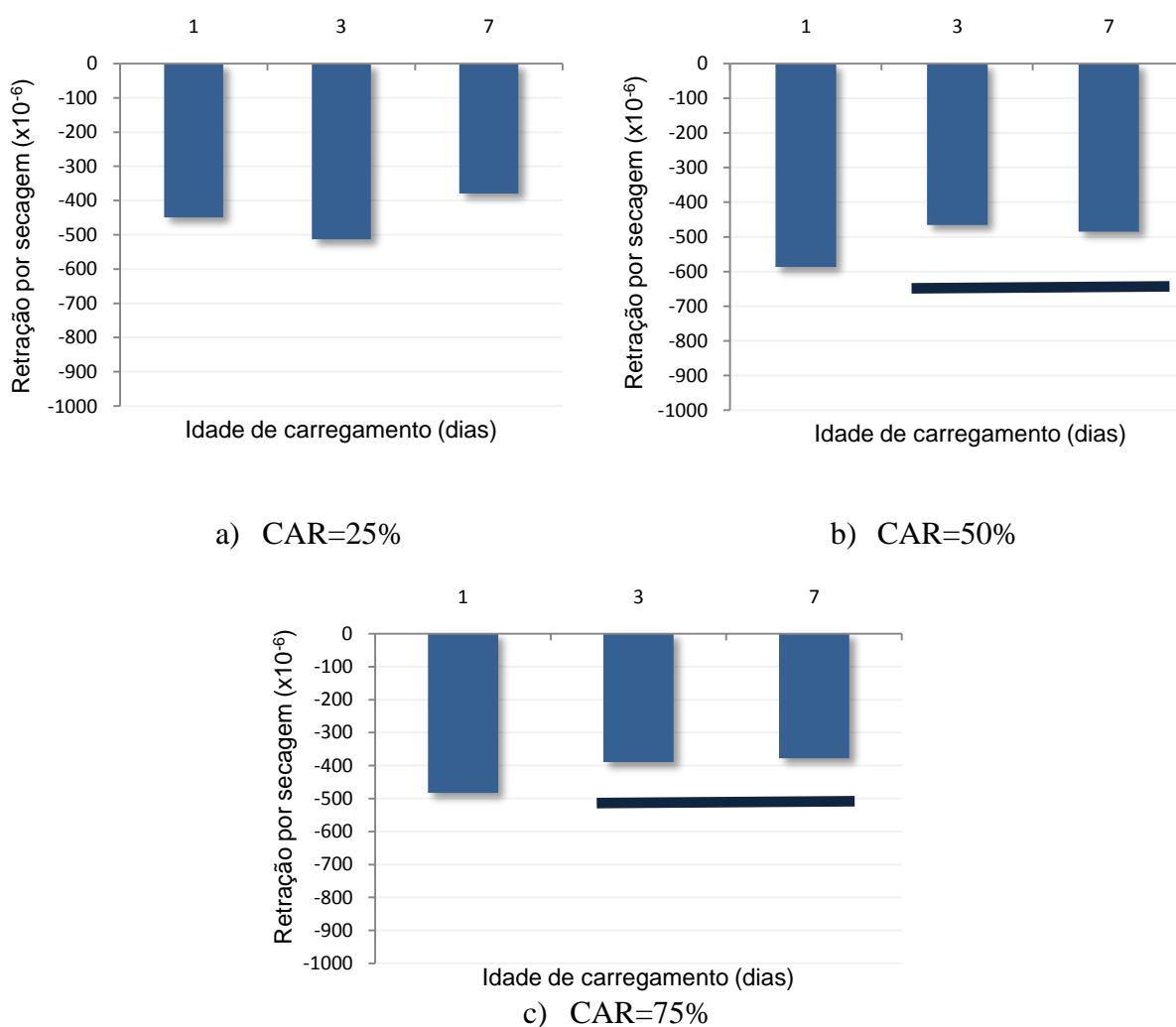
Figura 118: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64 semanas, em função dos níveis da variável *relação a/c*, considerando-se (a) CAR=0%; (b) CAR=25%; (c) CAR=50% e (d) CAR=75%: CP IV: cura 28 dias



Os gráficos permitem observar que somente não ocorreu diferença significativa entre as médias da retração no TS=64 semanas, entre os concretos com cimento CP IV curados por 28 dias, quando a relação a/c foi de 0,50 e 0,70 e o nível de pré-carregamento de 50%.

As Figuras 119 (a), (b) e (c) apresentam os gráficos para os níveis da variável *pré-carregamento* 25%, 50% e 75%, respectivamente, considerando-se o cimento CP IV e a idade de cura de 7 dias.

Figura 119: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), no tempo de secagem TS=64 semanas, em função dos níveis da variável *idade de pré-carregamento*, considerando-se (a) CAR=25%; (b) CAR=50%; (c) CAR=75%: CP IV, cura 7 dias

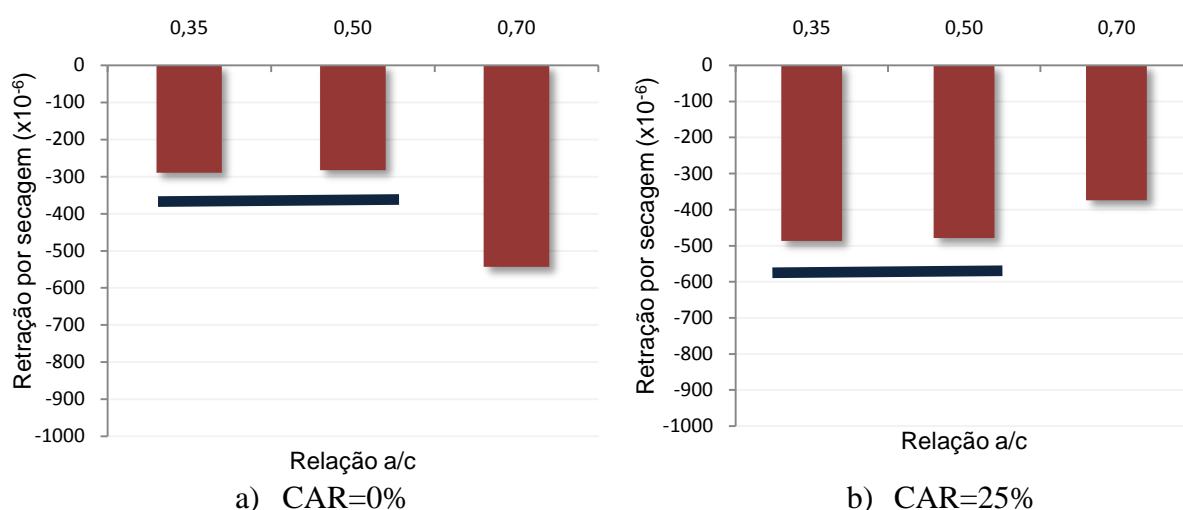


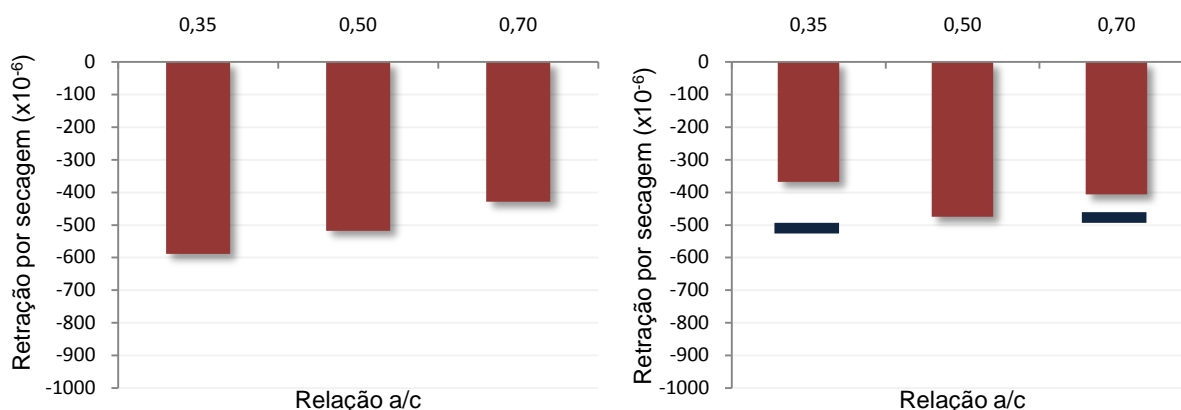


Verifica-se que, para os concretos com CP IV curados por 7 dias, os menores valores de retração por secagem média ( $\times 10^{-6}$ ), ao final do ensaio (TS=64 semanas), foram obtidos quando o pré-carregamento foi aplicado nas idades de pré-carregamento (3 e 7 dias), de um modo geral. Acredita-se que esta diferença de comportamento, em relação aos concretos curados por 28 dias, esteja basicamente relacionada à influência do menor período de cura. Conforme já discutido anteriormente (ver item 5.2.1.2), a cura prolongada possibilitou a continuidade das reações de hidratação, bem como a autocicatrização das microfissuras causadas pelos maiores níveis de pré-carregamento (50% e 75%).

A partir dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ) referentes ao tempo de secagem TS=64 semanas, realizou-se a comparação múltipla de médias para os concretos com CP IV com cura de 7 dias, em função da variável *relação a/c*. As Figuras 120 (a), (b) e (c) apresentam os gráficos para os níveis da variável *pré-carregamento* 0%, 25%, 50% e 75%, respectivamente.

Figura 120: Comparação múltipla de médias dos valores de retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ) para o tempo de secagem TS=64, em função dos níveis da variável *relação a/c*, considerando-se (a) CAR=0%; (b) CAR=25%; (c) CAR=50% e (d) CAR=75%: CP IV, cura 7 dias





c) CAR=50%

d) CAR=75%

Os valores da retração por secagem média ( $\times 10^{-6}$ ) dos concretos de referência (CAR=0%), ao final do ensaio (TS=64 semanas), seguiram a tendência esperada. Para o pré-carregamento de 25%, não ocorreu diferença significativa entre os valores da retração por secagem média ( $\times 10^{-6}$ ) dos concretos com relações a/c de 0,35 e 0,50. E, para o maior nível de pré-carregamento (75%), também não ocorreu diferença significativa entre os valores da retração por secagem média nas relações a/c=0,35 e 0,70. É possível verificar que, para o cimento CP IV, submetido à cura de 7 dias, entre os concretos pré-carregados, os menores valores da retração por secagem média ( $\times 10^{-6}$ ), ao final do ensaio, foram obtidos nos concretos com relação a/c=0,70, evidenciando o efeito benéfico da redução das porosidades total e efetiva.

## 5.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS

Nesta pesquisa foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão conforme prescrições da NBR 12142 (ABNT, 2010). Os resultados obtidos foram comparados aos resultados de resistência à tração por compressão diametral - NBR 7222 (ABNT, 2011) e resistência à compressão axial - NBR 5739 (ABNT, 2007) obtidos por Vieira (2008). Essa comparação foi possível porque, como mencionado no *Capítulo 1*, os programas experimentais de ambos os estudos foram realizados de forma complementar. Os resultados das resistências à compressão axial (NBR 5739, 2007), resistências à tração por compressão diametral (NBR 7222, 2011), obtidos por Vieira (2008) estão apresentados no Apêndice D.

Os resultados das resistências à tração na flexão ( $F_{ct,fl}$ ) dos concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV, para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias, considerando-se as relações a/c adotadas, estão apresentados nos gráficos das Figuras 121 e 122, respectivamente.

Verificou-se que houve crescimento das resistências ao longo do tempo, sendo os seus valores compatíveis com o esperado, considerando-se o tipo de cimento, relações a/c e idade de cura.

Figura 121: Resistência à tração, ao longo do tempo, na flexão dos concretos com cimento CP V ARI

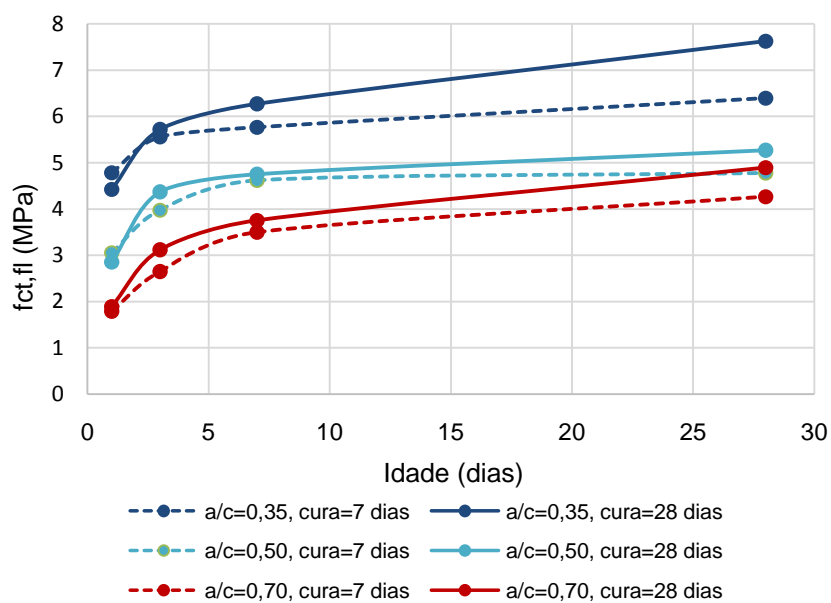
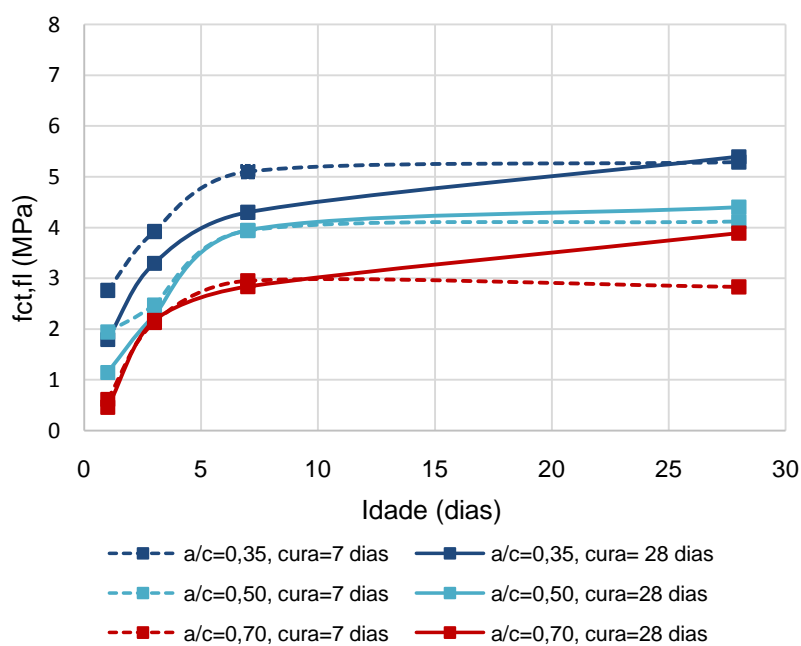


Figura 122: Resistência à tração, ao longo do tempo, na flexão dos concretos com cimento CP IV



## 5.5 INFLUÊNCIA DO PRÉ-CARREGAMENTO NA POROSIDADE DOS CONCRETOS

Como se sabe, os hidratos formados a partir das reações de hidratação ligam as partículas de cimento, originando o esqueleto sólido da pasta. Assim, as partículas sólidas suspensas na fase líquida dão origem a um sólido poroso, parcialmente saturado (DO, 2013, p.9). A estrutura de poros e a fase líquida contida nos mesmos constituem o sistema de poros, que se localiza entre as partículas sólidas em suspensão, exercendo grande influência no comportamento mecânico do concreto (JENNINGS, et al., 2008, p.6). Tendo em vista que importantes propriedades do concreto como resistência, permeabilidade, difusão, fluência e retração são intimamente relacionadas com a porosidade e distribuição do tamanho dos poros (NARAYANAN e RAMAMURTHY, 2000, p.322), considerou-se de grande importância caracterizar a estrutura de poros dos concretos pré-carregados e de referência. Para tanto, realizou-se o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (ver item 4.2.8).

### 5.5.1 Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio de porosimetria foi realizado em amostras de concretos moldados de acordo com as combinações entre variáveis descritas na seção 4.2.1 (cimento CP V ARI, relação  $a/c=0,50$ , pré-carregamento  $CAR=75\%$  da carga de ruptura, aplicado na idade de 3 dias). Foram moldados, também, cp's de referência. Para a verificação da influência do método de cura, os concretos foram curados até as idades de cura: 3 e 28 dias. Foram extraídas duas amostras de referência (Amostras REF) da região central dos cp's. Nos cp's pré-carregados, foram extraídas duas amostras da parte superior (Amostras SUP) e duas da parte inferior (Amostras INF) dos cp's, conforme seção 4.2.7, para verificar a existência de diferenças na porosidade dos concretos em função do tipo de tensão atuante (compressão, tração), já que o ensaio utilizado para o pré-carregamento foi o de tração na flexão. A partir do ensaio de porosimetria foram determinadas algumas características físicas relacionadas à porosidade, relativas às amostras de referência (REF) e às amostras pré-carregadas SUP e INF, para as idades de cura 3 e 28 dias, conforme Tabela 21. Salienta-se que os valores adotados correspondem à média entre duas amostras.

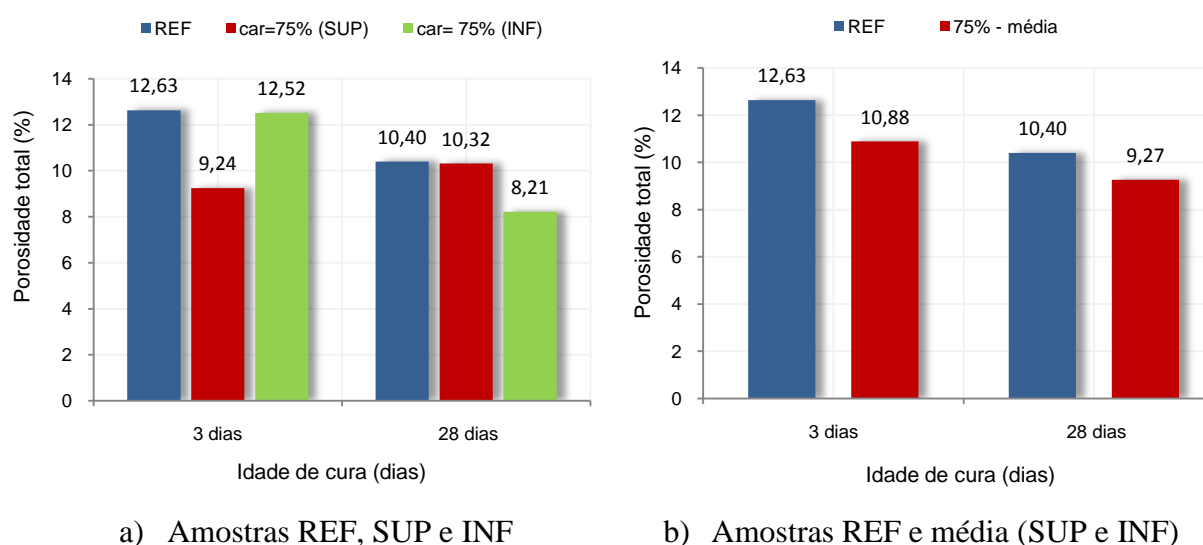
Tabela 21: Características físicas das amostras de referência (REF), das amostras extraídas da parte superior (SUP) e inferior (INF) dos concretos (CP V ARI) curados por 3 e 28 dias

Amostra	Idade de cura(dias)	Total volume de Hg Introduzido (ml/g)	Área total de poros (m <sup>2</sup> /g)	Diâmetro médio do poro(nm)	Densidade volumétrica (envelope) (g/mL)	Densidade real (esqueleto) (g/mL)	Porosidade (%)
REF	3	0,055	6,455	34,60	2,320	2,654	12,63
SUP		0,037	4,381	34,15	2,485	2,738	9,24
INF		0,054	5,873	37,90	2,350	2,680	12,52
REF	28	0,045	6,126	31,20	2,354	2,625	10,40
SUP		0,044	6,068	29,80	2,373	2,644	10,32
INF		0,030	4,774	27,70	2,526	2,751	8,21

No ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio somente os poros das amostras com acesso à superfície podem ser preenchidos pelo mercúrio, sendo que os poros fechados ou poros cegos, não. Portanto, o volume total de mercúrio introduzido dentro da amostra corresponde ao volume total de poros abertos, que efetivamente foram preenchidos com mercúrio (WEBB, 2001, p. 14). Por permitir a medição da porosidade acessível ao mercúrio à máxima pressão aplicada, o volume total de mercúrio intrudido tem sido adotado como um valioso índice para comparação entre estruturas de poros de diferentes misturas (ZHANG et al., 2014, p.4). Comparando-se o volume total de mercúrio intrudido nas amostras (REF, SUP e INF), para ambas as idades de cura, verifica-se que ocorreu redução do volume nas amostras curadas por 28 dias em relação às curadas até 3 dias, exceto para a amostra SUP. Comparando-se a área total de poros das amostras, verifica-se que as pré-carregadas apresentaram valores menores em relação às de referência, para ambas as idades de cura. A área total de poros da amostra SUP foi 32% menor do que a da amostra de referência, para cura de 3 dias, e a área total de poros da amostra INF foi 22% menor do que a amostra de referência, para a cura de 28 dias. Com relação à idade de cura, de um modo geral, houve redução da área total de poros nas amostras curadas por 28 dias, em relação às amostras curadas por 3 dias, exceto para a amostra SUP. O diâmetro médio dos poros também reduziu para todas as amostras curadas por 28 dias. Estes resultados, de um modo geral, estão coerentes com o fato de que a cura prolongada promove o refinamento dos poros, em decorrência da continuidade das reações de hidratação, esperando-se redução da área total e diâmetro médio dos poros.

A Figura 123 apresenta um gráfico comparativo entre as porosidades totais das amostras de referência, SUP e INF (a) e outro gráfico comparativo entre a porosidade total da amostra de referência e da média entre as porosidades das amostras SUP e INF (b).

Figura 123: Porosidade total (%) dos concretos com CP V ARI, relação a/c=0,50, pré-carregados na idade de 3 dias e submetidos a duas idades de cura (3 e 28 dias)



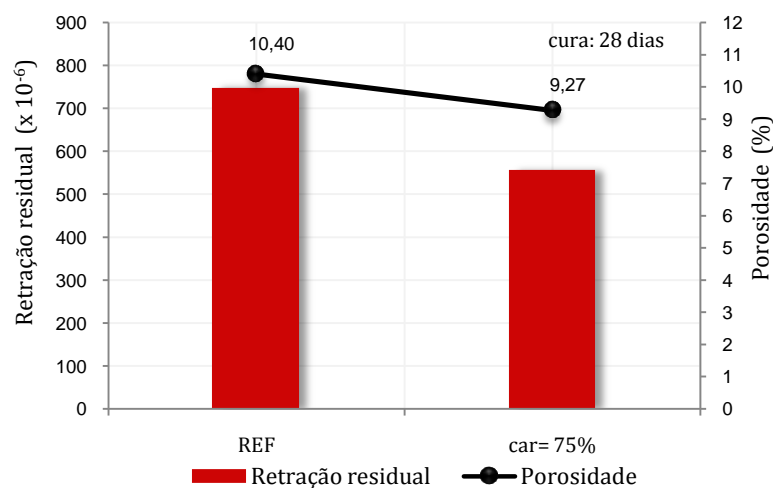
Sabe-se que a porosidade total de uma matriz de cimento fica menor com o aumento do tempo de cura, devido ao preenchimento do espaço entre as partículas com os novos produtos de hidratação (DUREKOVIC<sup>111</sup>, 1995, *apud* CASTRO e PANDOLFELLI, 2009, p. 28). Através da Figura 123 (a), observa-se que, de um modo geral, na idade de cura de 28 dias houve redução da porosidade total (%), evidenciando-se o refinamento dos poros devido à cura prolongada. Salienta-se que o aumento da porosidade da amostra SUP, após a cura prolongada, difere do esperado. No entanto, comparando-se o valor médio da porosidade das amostras pré-carregadas SUP e INF com o valor da porosidade da amostra de referência, conforme Figura 123 (b), constata-se que, para ambas as idades de cura, houve redução da porosidade total em função do efeito pré-carregamento.

A Figura 124 mostra os resultados da retração residual, ou seja, medida ao final do ensaio (64 semanas), para os concretos de referência e pré-carregados, comparando-os aos valores da

<sup>111</sup>Durekovic, A. Cement pastes of low water to solid ratio: an investigation of the porosity characteristics under the influence of a superplasticizer and silica fume, *Cem. Concr. Res.* 25, 2 (1995) 365-375.

porosidade total (%) das amostras de referência e pré-carregadas (porosidade média entre amostras SUP e INF), para idade de cura de 28 dias.

Figura 124: Comparação entre a porosidade total (%) e a retração residual ( $\times 10^{-6}$ ): CP V ARI, relação a/c=0,50, pré-carregados na idade de 3 dias e submetidos a duas idades de cura (3 e 28 dias)

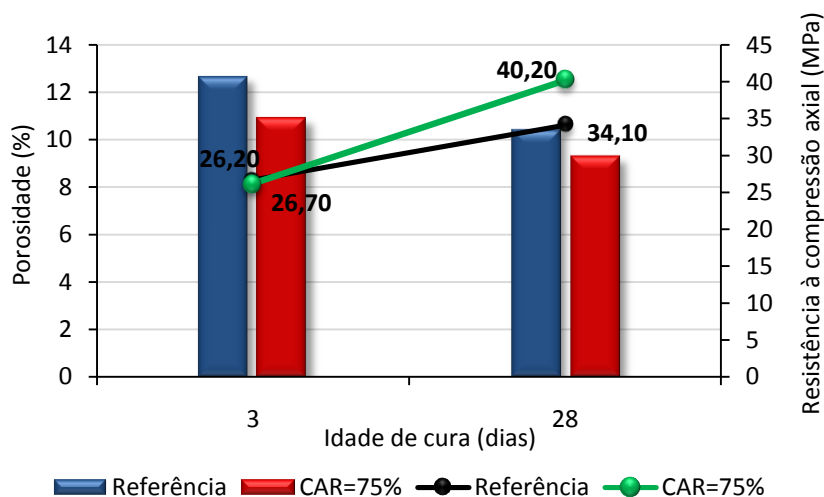


O pré-carregamento exerceu um efeito benéfico, proporcionando a mitigação da retração por secagem dos concretos estudados, como evidenciado através da Figura 124. Conforme já mencionado no item 5.2.1.8, o pré-carregamento alterou o grau de compactação dos concretos reduzindo, portanto, a porosidade. Assim, a difusão da umidade no interior do concreto e a saída da água foram afetadas. Além disso, a redução da porosidade total (%), em associação ao efeito da cura prolongada, influenciou o grau de hidratação, promovendo a formação de novos produtos resistentes, o que contribuiu para a redução dos resultados obtidos no ensaio de retração por secagem, em comparação aos de referência.

O gráfico da Figura 125 compara a porosidade total (%) dos concretos com CP V ARI, relação a/c=0,50, de referência e pré-carregados com 75% da carga média de ruptura aos 3 dias, submetidos a duas idades de cura (7 e 28 dias), com os resultados de resistências à compressão axial.

Os concretos pré-carregados apresentaram menor porosidade total (%), como mencionado anteriormente (Figura 123 b) e, conseqüentemente, também apresentaram maior resistência à compressão axial aos 28 dias, como pode ser observado através da Figura 125.

Figura 125: Porosidade total (%) X resistência à compressão axial (MPa): CP V ARI, relação a/c=0,50, pré-carregados na idade de 3 dias e submetidos a duas idades de cura (3 e 28 dias)

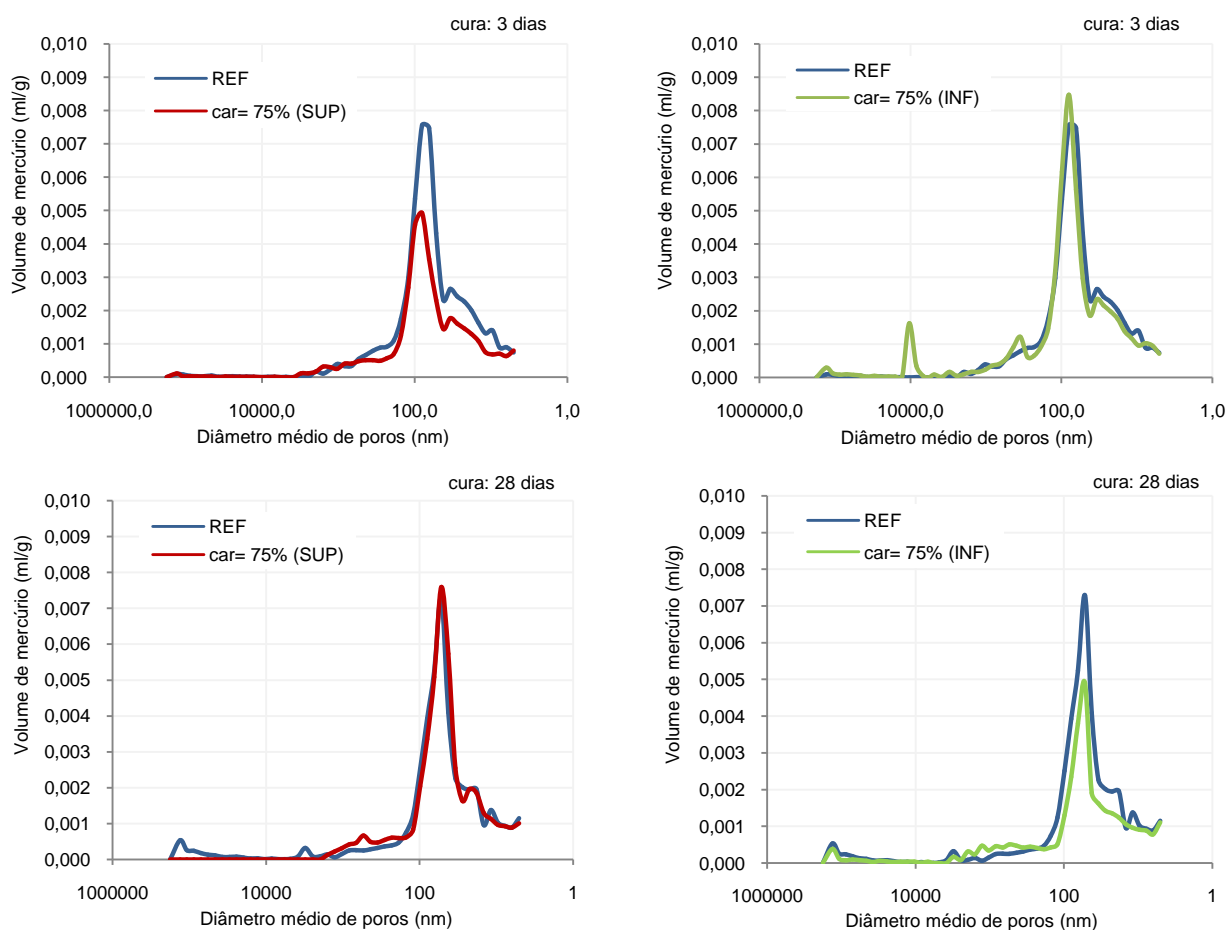


Fonte: Resultados de resistência à compressão axial (MPa) conforme Vieira (2008, p. 186)

Para a caracterização da porosidade do concreto, além da porosidade total (%) é muito importante analisar a distribuição do tamanho dos poros. A partir dos resultados obtidos no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (ver Apêndice G) foram elaborados gráficos do volume incremental *versus* diâmetro dos poros, que indicam, por meio do volume de mercúrio (ml/g) intrudido, a quantidade de poros de um determinado diâmetro. Na Figura 126, as amostras SUP (a) e INF (b) são comparadas às amostras de referência, para as duas idades de cura adotadas (3 e 28 dias).



Figura 126: Volume de mercúrio intrudido (ml/g) *versus* diâmetros de poros (nm) de amostras de concretos pré-carregados (SUP e INF) e concretos de referência, sendo (a) Idade de cura = 3 dias e (b) Idade de cura = 28 dias



a) Amostras extraídas da parte superior do cp

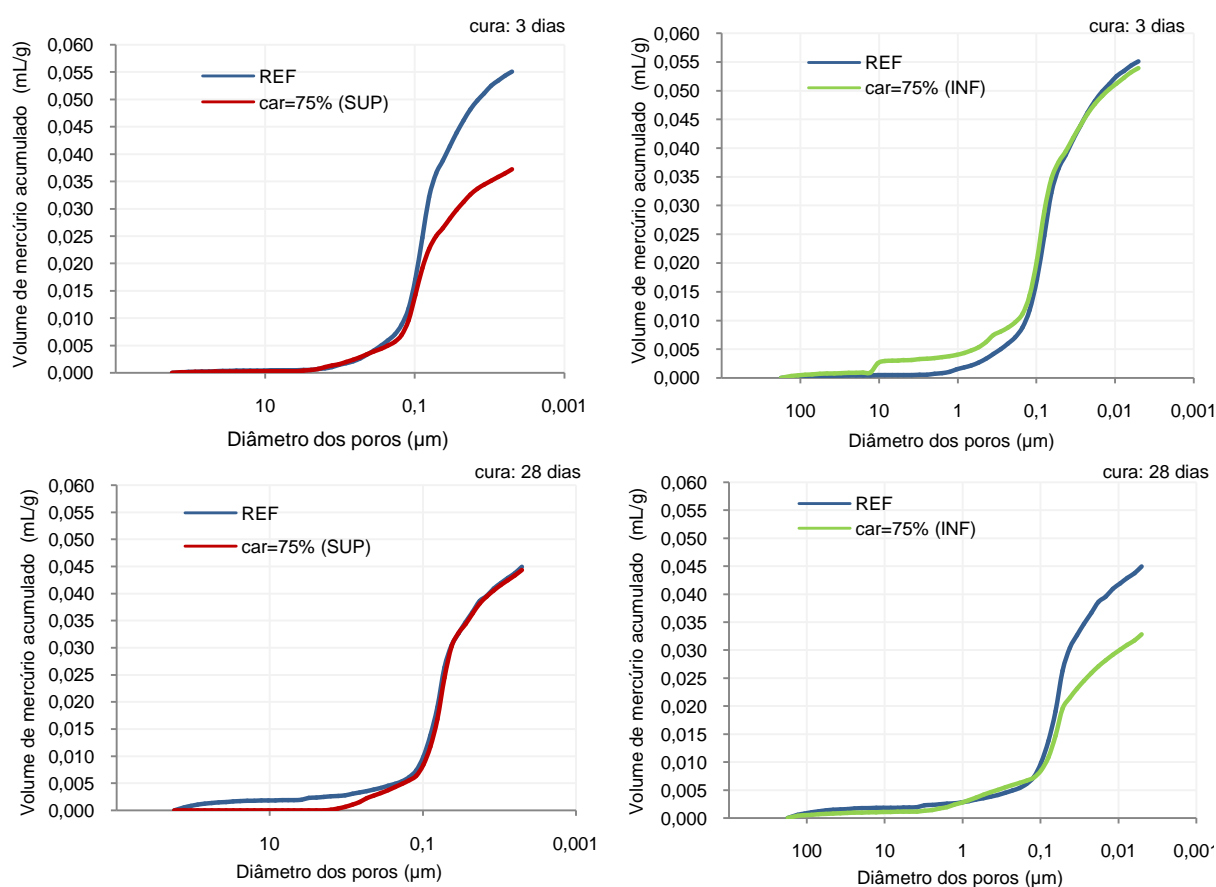
b) Amostras extraídas da parte inferior do cp

Com relação aos concretos curados por 3 dias, verifica-se que o volume de mercúrio (ml/g) intrudido nas amostras SUP foi menor em relação ao volume de mercúrio intrudido nas amostras extraídas dos corpos de prova de referência, e ligeiramente maior nas amostras INF, como já apresentado no gráfico da Figura 126 (a). Provavelmente este comportamento esteja relacionado ao fato de que, na parte superior dos corpos de prova, as tensões dominantes foram de compressão e, na parte inferior, de tração. Como mencionado nos itens 5.2.1.8, a aplicação de carregamento à compressão no concreto, sob determinadas condições, tende a aumentar a resistência do concreto. Os deslocamentos para a direita das curvas relativas às

amostras curadas por 28 dias, tanto as extraídas dos concretos pré-carregados como de referência, demonstram que houve refinamento dos poros devido à cura prolongada, como esperado. O volume de mercúrio (ml/g) intrudido foi menor nas amostras INF, em relação às amostras dos concretos de referência. Esta tendência pode estar relacionada à redução da porosidade através da autoconsolidação das microfissuras, propiciada pela cura prolongada, conforme discutido no item 5.2.1.2.

A Figura 127 apresenta outra forma de representação gráfica, permitindo comparar o comportamento médio das amostras de referência e pré-carregadas: (a) SUP e (b) INF, para as idades de cura adotadas através do volume de mercúrio acumulado (ml/g).

Figura 127: Volume de mercúrio acumulado (ml/g) versus diâmetros de poros ( $\mu\text{m}$ ) das amostras de concretos pré-carregados (SUP e INF) e concretos de referência, sendo (a) Idade de cura = 3 dias e (b) Idade de cura = 28 dias



a) Amostras extraídas (parte superior cp)

b) Amostras extraídas (parte inferior cp)

Através dos gráficos da Figura 127 (a) e (b), constata-se novamente que as amostras SUP apresentaram menor volume de mercúrio acumulado, na idade de 3 dias. O refinamento das amostras na idade de 28 dias também é evidenciado através do deslocamento das curvas para baixo. As amostras INF apresentaram menor volume (ml/g) de mercúrio acumulado, em relação à amostra de referência.

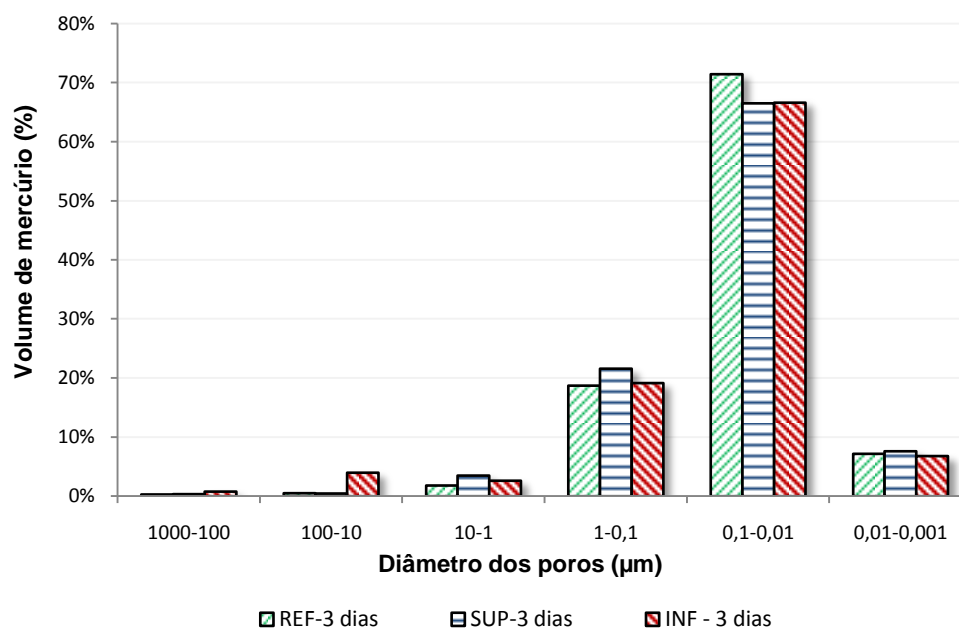
A Tabela 22 apresenta o volume de mercúrio intrudido (%) para os intervalos de diâmetro ( $\mu\text{m}$ ) dos poros adotados nos gráficos das Figuras 127 (a) e (b), para os concretos estudados.

Tabela 22: Volume de mercúrio intrudido (%) de acordo com diferentes faixas de diâmetro ( $\mu\text{m}$ ) dos poros, para as idades de cura (3 e 28 dias)

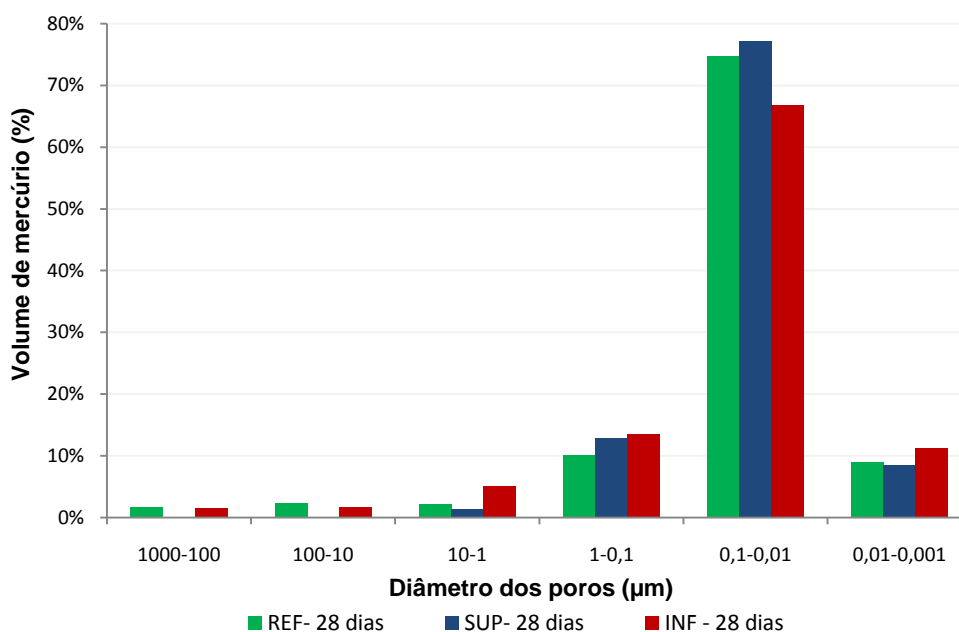
Faixas de diâmetro ( $\mu\text{m}$ ) dos poros	Volume de mercúrio intrudido (%)					
	Idade de cura = 3 dias			Idade de cura = 28 dias		
	REF	75% SUP	75% INF	REF	75% SUP	75% INF
0,001 – 0,01	7,15%	7,60%	6,79%	8,92%	8,53%	11,21%
0,01 – 0,1	71,46%	66,53%	66,63%	74,72%	77,13%	66,76%
0,1 - 1	18,74%	21,57%	19,17%	10,17%	12,86%	13,60%
1 - 10	1,83%	3,47%	2,64%	2,16%	1,48%	5,12%
10 - 100	0,51%	0,46%	3,98%	2,27%	0,00%	1,80%
100 - 1000	0,31%	0,37%	0,78%	1,77%	0,00%	1,51%

As Figuras 128 (a) e (b) mostram as representações gráficas dos dados da Tabela 22.

Figura 128: Volume de mercúrio (%) de acordo com as faixas de diâmetro ( $\mu\text{m}$ ) dos poros, sendo (a) Idade de cura = 3 dias e (b) Idade de cura = 28 dias



a) Idade de cura = de 3 dias



b) Idade de cura = 28 dias

Sabe-se que cada faixa de diâmetro dos poros influencia mais diretamente uma propriedade específica do concreto. De acordo com a classificação apresentada por Mehta e Monteiro (2008, p. 27), conforme Figura 12 apresentada no item 2.2.2.2, a faixa de diâmetros

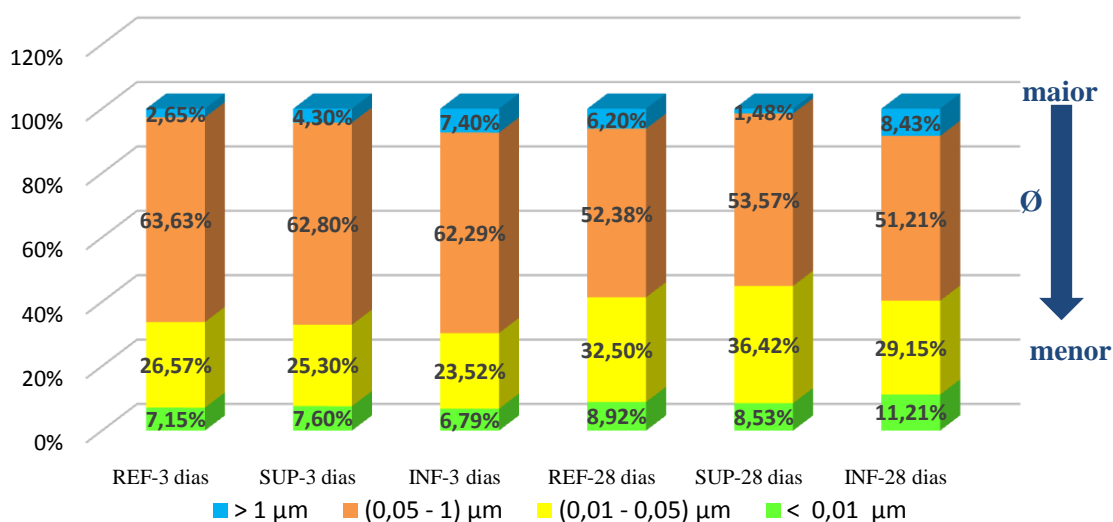
compreendida entre 0,001 – 0,01  $\mu\text{m}$  corresponde à porosidade de gel. Diâmetros compreendidos entre 0,01 – 1  $\mu\text{m}$  correspondem aos vazios capilares e, diâmetros superiores a 1  $\mu\text{m}$  correspondem aos vazios de ar aprisionado. Os microporos (0,001 – 0,01)  $\mu\text{m}$  são parte da estrutura do C-S-H, constituindo os poros de gel (TOPLICIC-CURCIC *et al.*, 2012, p. 134). A porosidade capilar é constituída por poros médios ou mesoporos (0,01 – 0,05)  $\mu\text{m}$  e grandes ou macroporos (0,05 – 1)  $\mu\text{m}$ , de acordo com Silva (2007). Os mesoporos ocorrem como um espaço remanescente, os quais eram preenchidos com água na pasta de cimento fresca e poros integrantes da estrutura do C-S-H (TOPLICIC-CURCIC *et al.*, 2012, p. 134). A porosidade capilar tem grande influência na resistência e elasticidade, já a porosidade de gel não influencia adversamente a resistência, podendo ser negligenciada (KUMAR e BHATTACHARJEE, 2003, p. 156). Segundo Luhovial e Collot<sup>112</sup>, (1981, *apud* TOPLICIC-CURCIC *et al.*, 2012, p. 134), quando o concreto é submetido a tensões, as microfissuras originadas começam em poros grandes e se propagam rapidamente na pasta de cimento hidratada, se esses poros forem numerosos. Com base na classificação entre microporos ou poros de gel, mesoporos e macroporos, apresenta-se o gráfico da Figura 129, para a comparação entre as amostras de referência e pré-carregadas (SUP e INF), considerando-se as idades de cura utilizadas.

A continuidade da hidratação provoca alterações na distribuição dos poros, havendo uma tendência de aumento de poros menores, com o tempo. Com a hidratação, o volume dos poros de gel ( $< 0,01 \mu\text{m}$ ) aumenta, enquanto o volume dos poros capilares diminui (ZHANG *et al.* 2014, p. 5). Verificou-se que todas as amostras curadas por 28 dias apresentaram aumento do volume de poros de gel em relação às curadas por 3 dias, sendo o maior aumento obtido na amostra INF. Portanto, a cura prolongada favoreceu o refinamento dos poros, independentemente do pré-carregamento. Para todas as amostras curadas por 28 dias ocorreu, também, aumento do volume dos mesoporos (0,01 – 0,05)  $\mu\text{m}$  em relação às amostras curadas por 3 dias, sendo o maior aumento apresentado pela amostra SUP.

---

<sup>112</sup>Luhovial, W. e Collot, C. Influence du diametre des bubllessur la microfissurationd’um joint colee. Material and Strutures, N.109, Duond, Paris, 1981.

Figura 129: Porosidade de gel (%) e porosidade capilar (%) para as amostras de referências (REF) e amostras pré-carregadas (SUP e INF, para as idades de cura (3 e 28 dias)



A Tabela 23 apresenta uma comparação entre as somas dos poros  $> 1 \mu\text{m}$  e macroporos, com a soma dos mesoporos e poros de gel, para todas as amostras e condições de cura.

Tabela 23: Comparação entre as porosidades (%) das amostras, para as idades de cura (3 e 28 dias)

Intervalos de diâmetros ( $\mu\text{m}$ )	Porosidade (%)					
	Idade de cura = 3 dias			Idade de cura = 28 dias		
	REF	SUP	INF	REF	SUP	INF
A	66,28.	67,10	69,69	58,58	55,05	59,64
B	33,72	32,9	30,31	41,42	44,95	40,36

Sendo:  $A = (>1) + (1 - 0,05)$  e

$$B = (0,05 - 0,01) + (<0,01)$$

Comparando-se a soma dos poros  $> 1 \mu\text{m}$  e macroporos, com a soma dos mesoporos e poros de gel, verificou-se que as amostras pré-carregadas SUP e INF apresentaram maiores reduções de poros grandes/maiores aumentos de poros pequenos, em relação às amostras de referência (12,05% e 10,05%, respectivamente).

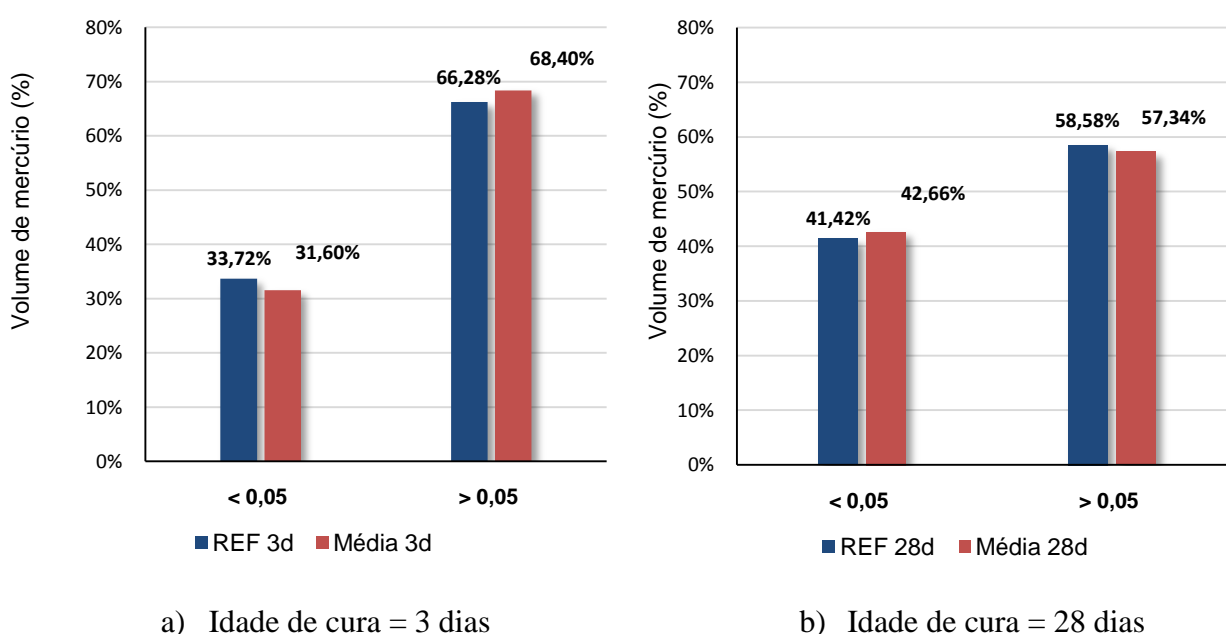
Segundo Mehta e Monteiro (2014), os poros com diâmetro  $> 0,05 \mu\text{m}$ , chamados de macroporos, podem ter origens diversas, como elevada relação a/c ou ar incorporado na

mistura e influem negativamente na resistência e permeabilidade do concreto. Os microporos, com diâmetros  $< 0,05 \mu\text{m}$ , são mais importantes para a retração por secagem e fluência.

Os gráficos da Figura 130 (a) e (b) foram elaborados para comparar o comportamento das áreas pré-carregadas SUP e INF e o das amostras de referência, nas duas idades de cura.

Pode-se observar que, após a cura de 28 dias, houve redução dos poros  $> 0,05 \mu\text{m}$  nas amostras de referência e pré-carregadas, devido ao refinamento do sistema de poros. O volume de mercúrio (%) intrudido nas amostras de referência, em poros com diâmetros  $< 0,05 \mu\text{m}$ , foi menor em comparação à média das amostras pré-carregadas e, em poros com diâmetros  $> 0,05 \mu\text{m}$ , foi maior. Assim, esses resultados indicaram uma tendência de maior capacidade resistente dos concretos pré-carregados, embora o maior volume de poros com diâmetros  $< 0,05 \mu\text{m}$  possam ser desfavoráveis à retração por secagem. No entanto, além da análise do volume de microporos, outros aspectos devem ser considerados para a comparação das amostras pré-carregadas e de referência, frente aos mecanismos ligados à retração por secagem.

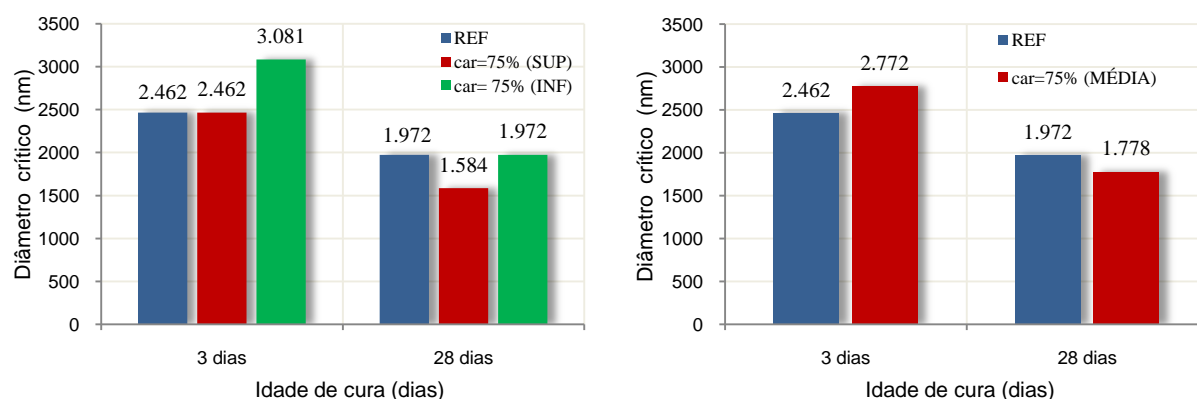
Figura 130: Percentuais de volume de mercúrio intrudido nos poros com diâmetros menores e maiores do que  $0,05 \mu\text{m}$ , para as idades de cura (3 e 28 dias): amostras de referências (REF) X média amostras pré-carregadas (SUP e INF)



A conectividade e tortuosidade dos poros também são aspectos de interesse em algumas propriedades do concreto, como transporte de massa. Nesse sentido, outro parâmetro importante, obtido através do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, é o *diâmetro crítico*, definido como a menor dimensão de poro acima da qual se estabelece uma trajetória de poros conectados de uma extremidade a outra da amostra, sendo determinado pela inflexão na curva de porosidade acumulada (SATO<sup>113</sup>, 1998, apud SILVA, 2011, p.57).

A Figura 131 (a) e (b) apresenta gráficos que permitem comparar os diâmetros críticos (nm) das amostras de referência e pré-carregadas SUP e INF, nas idades de cura de 3 e 28 dias.

Figura 131: Diâmetros críticos (nm) das amostras de referência e pré-carregadas SUP e INF, nas idades de cura de 3 e 28 dias



a) Diâmetro crítico em função da idade de cura (dias), para amostras REF, SUP e INF

b) Diâmetro crítico em função da idade de cura (dias), para amostras REF e MÉD (SUP e INF)

Comparando-se os diâmetros críticos das amostras pré-carregadas (SUP e INF) com o diâmetro crítico da amostra de referência, constata-se que a amostra INF apresentou um maior volume de poros interconectados na idade de 3 dias, conforme Figura 139 (a). Com a cura prolongada, o diâmetro crítico da amostra INF diminuiu, em consequência da continuidade das reações de hidratação do cimento. A amostra SUP apresentou, com a cura de 28 dias, um menor volume de poros interligados em comparação às demais amostras, sugerindo uma possível sobreposição de efeitos da cura prolongada e dos esforços oriundos do pré-carregamento (compressão). Para avaliar o comportamento geral dos concretos pré-

<sup>113</sup>SATO, N.M.N. Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998. 163p



carregados, comparou-se o diâmetro crítico da amostra de REF com a média entre os diâmetros críticos das amostras SUP e INF, conforme apresenta a Figura 139 (b). Como resultado, o diâmetro crítico das amostras pré-carregadas é menor do que o das amostras de referência, para a cura de 28 dias, evidenciando a redução do volume de poros interligados, pelo efeito de compactação e quebra dos cristais mais frágeis e de maior tamanho. Portanto, seria possível dizer que o pré-carregamento, associado à cura prolongada, tende a dificultar o transporte de água através dos poros do concreto, afetando a retração por secagem.

## 5.6 DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE ATRAVÉS DA ANÁLISE DE MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS X

Para a realização da análise de microtomografia de raios X, foram produzidos concretos com cimento CP V ARI, adotando-se os mesmos procedimentos utilizados para obtenção das amostras para o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, conforme descrito no item 4.2.8 do Capítulo 4. Foram encaminhadas para a análise de microtomografia de raios X as seguintes amostras:

Amostra 22: Amostra REF, referênciacura 3 dias;

Amostra 24: Amostra INF, car=75% (extraída da parte inferior do cp), cura 3 dias;

Amostra 28: Amostra REF, referência cura 28 dias;

Amostra 30: Amostra INF, car=75% (extraída da parte inferior do cp), cura 28 dias;

Os parâmetros utilizados estão apresentados no Apêndice H. A partir da realização das análises, para cada amostra foram geradas diversas imagens (raios X), as quais constituíram os conjuntos de dados. As imagens relativas a cada amostra foram analisadas através dos programas CTAn<sup>114</sup>, sendo visualizadas, através do programa *Data Viewer*<sup>115</sup>, selecionando-se as áreas de interesse para a determinação das porosidades percentuais (%), conforme mencionado na seção 4.2.9.

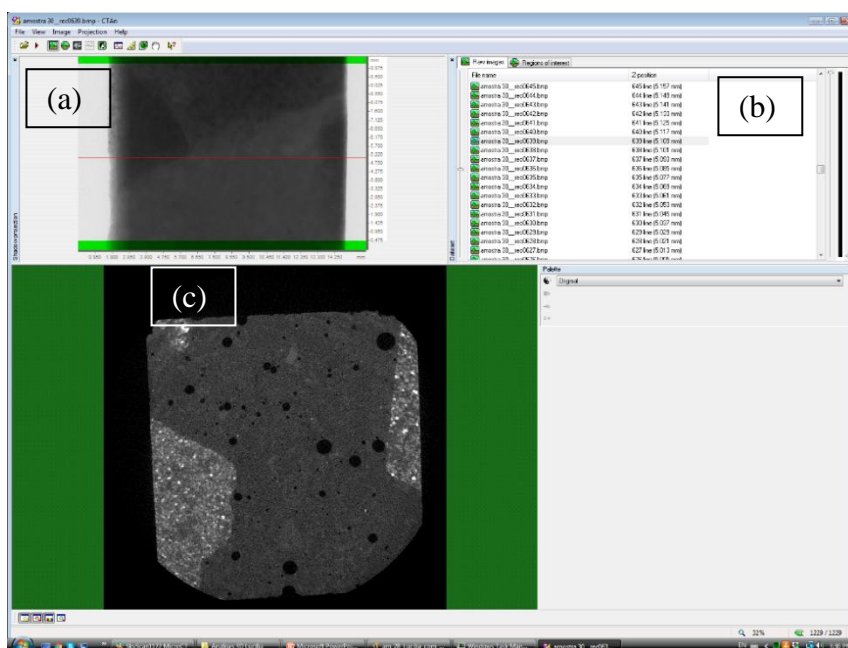
A Figura 132 refere-se à Amostra 30 (pré-carregada com 75% da carga média de ruptura à flexão, extraída da parte inferior do cp) curada por imersão em água durante 28 dias, conforme interface do software CTAn.

---

<sup>114</sup>CTAn-CTAnalyser: programa computacional da SkyScan

<sup>115</sup> Programa Data Viewer – [www.skyscan.be](http://www.skyscan.be)

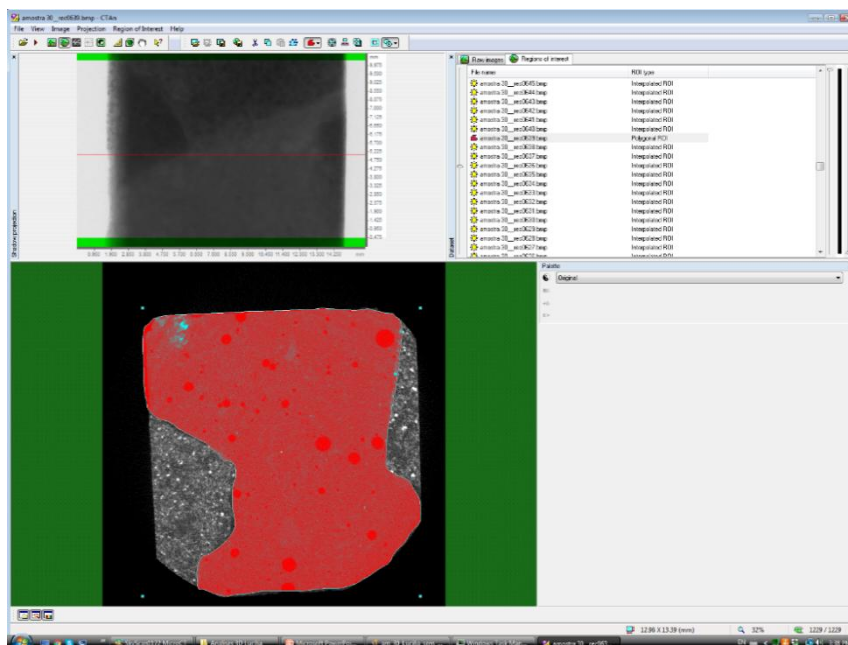
Figura 132: Aspecto do *software* CTAn. Em (a) tem-se uma das imagens de projeção da amostra; (b) corresponde ao conjunto de fatias tomográficas em sequência referentes à secção transversal da imagem em (a); e (c) corresponde à fatia tomográfica marcada pela linha em vermelho na imagem em (a) e selecionada em (b).



Interface do programa CTAn – [www.skyscan.be](http://www.skyscan.be)

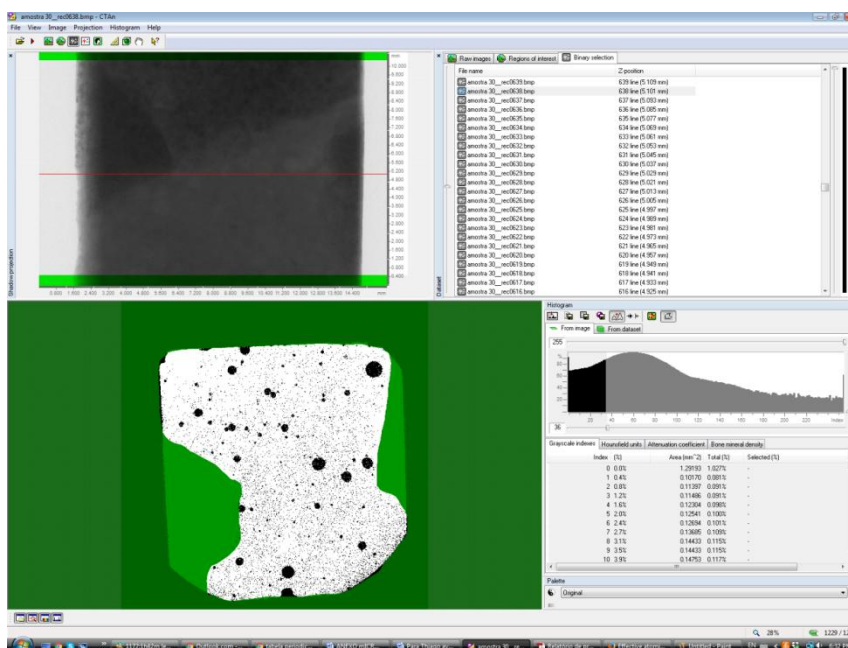
A Figura 133 apresenta a definição da área de interesse na seção transversal selecionada na Amostra 30, conforme interface do *software* CTAn. A Figura 134 apresenta a imagem de binarização da mesma amostra, após a determinação, no histograma, do intervalo de tons de cinza, referente à fase sólida do concreto, correspondente à região de interesse.

Figura 133: Definição da área de interesse na seção transversal da Amostra 30, identificando a região correspondente à argamassa (após a exclusão da brita)



Interface do programa CTAn – [www.skyscan.be](http://www.skyscan.be)

Figura 134: Imagem de binarização da mesma amostra, obtida a partir a determinação, no histograma, do intervalo de tons de cinza, referente à fase sólida do concreto dentro da região de interesse



Interface do programa CTAn – [www.skyscan.be](http://www.skyscan.be)

A Figura 135 apresenta a janela de análise 3D da amostra INF, considerando a binarização para o concreto, demonstrada na Figura 134, e a Figura 136 mostra o conteúdo do arquivo de

texto gerado a partir da análise 3D, para a fase binarizada, utilizando somente os dados básicos do *software* CTAn.

Figura 135: Janela de análise 3D da amostra INF, considerando a binarização para o concreto, demonstrada na Figura 141

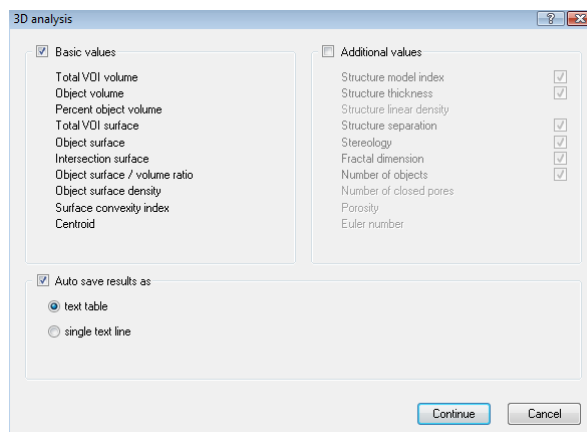
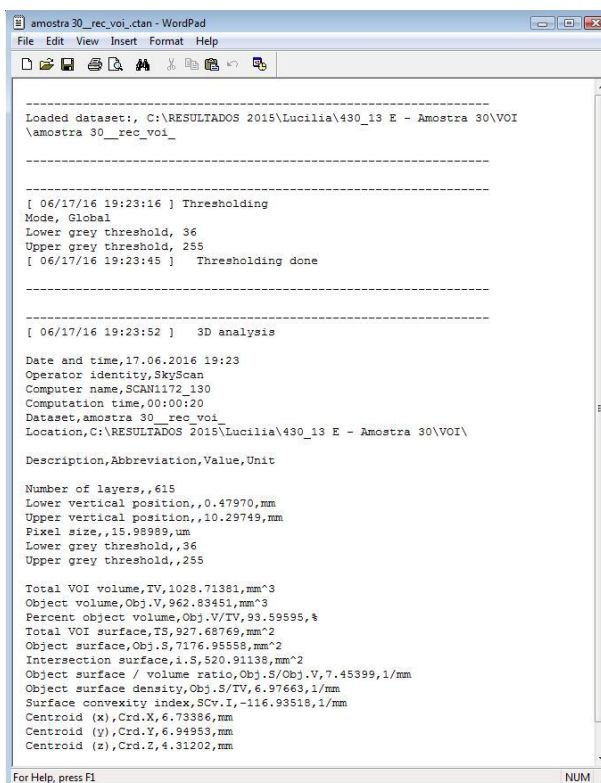
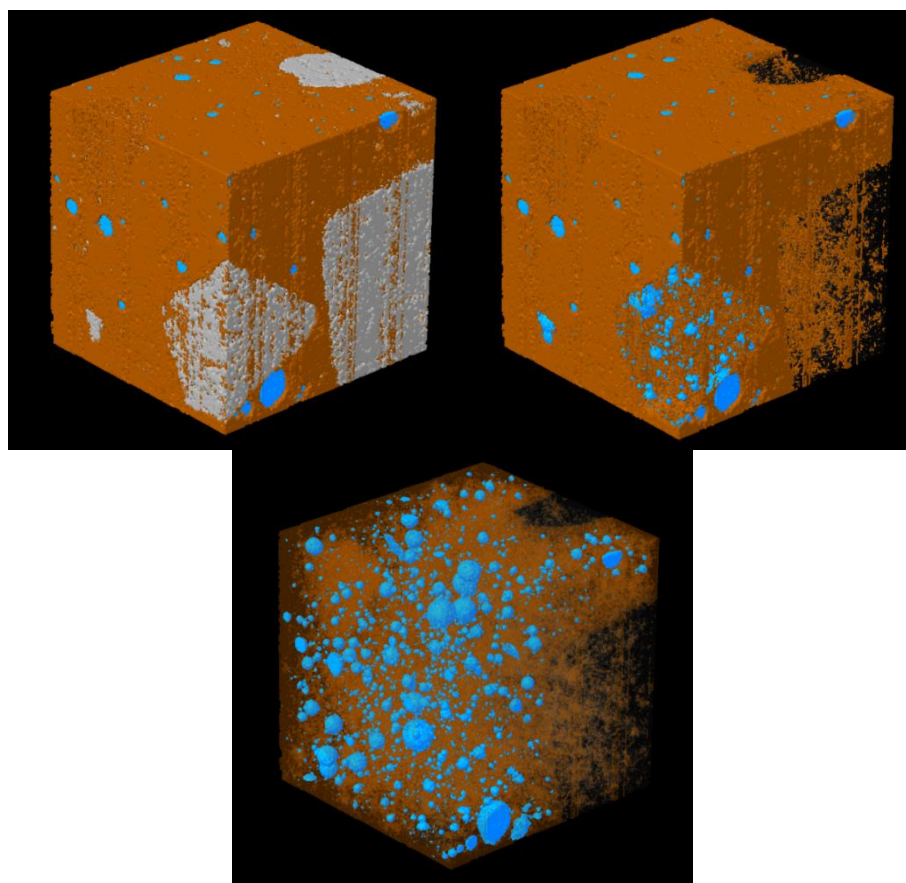


Figura 136: Conteúdo do arquivo de texto gerado a partir da análise 3D para a fase binarizada, utilizando somente os dados básicos do *software* CTAn.



A Figura 137 apresenta a imagem de renderização 3D da amostra REF curada por 3 dias, observando-se o aspecto dos poros, da matriz do concreto e das exclusões correspondentes à brita.

Figura 137: Imagem de renderização 3D da amostra REF curada por 3 dias (Amostra 22).



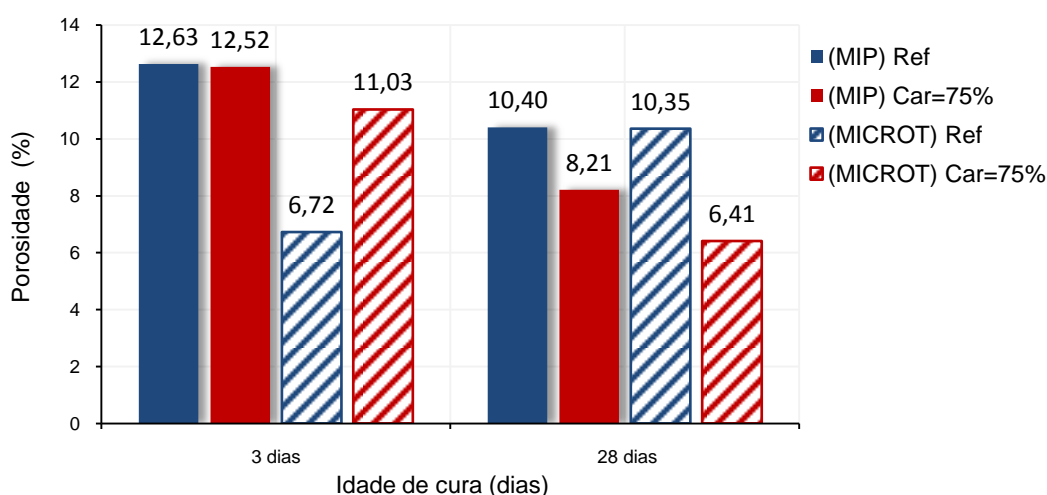
Sabe-se que nem sempre métodos diferentes utilizados para a determinação da porosidade resultam em valores muito próximos, pois a estrutura da pasta de cimento pode sofrer alterações durante a realização de certos tipos de ensaio, como é o caso da porosimetria por intrusão de mercúrio (NEVILLE, 1995, p. 283). A microtomografia de raios X é uma análise não destrutiva do concreto que tem sido bastante usada para a avaliação da porosidade, distribuição de fibras, existência de falhas ou fissuras (CHRIST, 2014, p.44). Embora possam ocorrer ruídos que afetem os resultados, esta técnica é bastante promissora e vantajosa. Os resultados obtidos na determinação da porosidade percentual das amostras estão apresentados na Tabela 24. Fica evidenciado o efeito benéfico da cura prolongada na redução da porosidade e na autocicatrização das fissuras. Os valores correspondem à média das fatias tomográficas analisadas.

Tabela 24: Porosidade percentual das amostras, para as idades de cura (3 e 28 dias), de acordo com a análise de microtomografia de raios X

Idade de cura (dias)	Porosidade percentual	
	REF	INF
3 dias	6,72%	11,03%
28 dias	10,35%	6,41%

A Figura 138 apresenta um gráfico que permite comparar os resultados da porosidade percentual das amostras de referência e pré-carregada (75% da carga média de ruptura à flexão) obtidos por microtomografia de raios X e através da porosimetria por intrusão de mercúrio, para idades de cura=3 e 28 dias.

Figura 138: Porosidade percentual das amostras de referência (REF) e pré-carregada (car=75%) obtidas por microtomografia de raios X (MICROT) e porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), para idades de cura=3 e 28 dias



Comparando-se os resultados de porosidade percentual obtidos pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (ver item 5.3) e os obtidos pela análise de microtomografia de raios X, pode-se dizer que foram bastante coerentes, exceto para as amostras de referência curadas por 3 dias. A porosidade percentual obtida por microtomografia de raios X (6,72%) é cerca de 50% menor do que o resultado obtido por porosimetria (12,63%). Sendo a porosimetria um

ensaio que, eventualmente, pode causar danos microestruturais na amostra, em função das pressões utilizadas, e que a microtomografia é uma análise não destrutiva, pode-se dizer que existe coerência. Principalmente para as amostras curadas por 28 dias, os resultados estão bastante coerentes, não havendo diferença entre a porosidade definida para as amostras de referência curadas por 28 dias. Através da análise de microtomografia de raios X ficou mais uma vez evidenciada a redução da porosidade do concreto submetido ao pré-carregamento, sob a ação conjunta da cura prolongada. Este resultado também evidencia a selagem das microfissuras originadas a partir do pré-carregamento, através do mecanismo da autocolmatação (*self-healing*), contribuindo para a redução da porosidade da amostra após a cura por imersão em água até a idade de 28 dias.

## 5.7 INFLUÊNCIA DO PRÉ-CARREGAMENTO NA COMPACIDADE DOS CONCRETOS ESTUDADOS

Para avaliar a influência do pré-carregamento na compacidade dos concretos pré-carregados, realizou-se o ensaio para determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica (NBR 8802, ABNT, 1994). Para tanto, foram utilizados corpos de prova produzidos com concreto CP V ARI, pré-carregados na idade de 3 dias com 75% da carga média de ruptura à tração na flexão e cp's de referência, ambos curados até as idades de 7 e 28 dias, conforme descrito no item 4.2.2 do Capítulo 4. A descrição dos procedimentos adotados para realização das medições está apresentada no item 4.3.0.

O ensaio para determinação da velocidade da onda ultrassônica dá informações sobre propriedades da microestrutura do concreto, como porosidade, módulo de elasticidade, distribuição de microfissuras e densidade. Há uma relação entre a existência de danos no interior do concreto e o decréscimo da velocidade do pulso ultrassônico, evidenciado pelo método de transmissão ultrassônica. Por outro lado, também existem relações intrínsecas entre o grau de dano e o efeito da autoconsolidação das microfissuras (*self-healing*). Assim, o aumento da velocidade da onda ultrassônica, além da recuperação das propriedades mecânicas do concreto, pode evidenciar a consolidação das microfissuras (ZHONG e YAO, 2008, p. 1138).

A velocidade de propagação do pulso ultrassônico é maior para concretos íntegros, com maior densidade e maior compacidade. O Quadro 19 apresenta a classificação da compacidade do

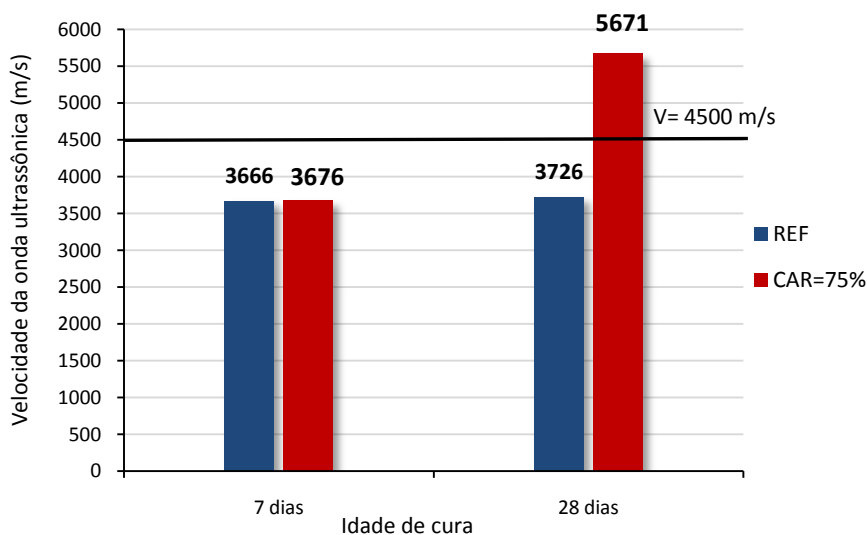
concreto em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica conforme NBR 8802 (ABNT, 1994).

Quadro 19: Classificação da compacidade concreto em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica conforme 8802 (ABNT, 1994).

Velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s)	Compacidade
$V \geq 4500$	Excelente compacidade
$3500 \leq V < 4500$	Compacidade boa
$3000 \leq V < 3500$	Compacidade regular
$2000 \leq V < 3000$	Compacidade ruim

As comparações dos resultados médios obtidos para os concretos curados por 7 e 28 dias são apresentadas através do gráfico da Figura 139.

Figura 139: Velocidade de propagação da onda ultrassônica para os concretos curados por 7 e 28 dias



Observa-se que ambos os concretos (pré-carregado e de referência) apresentaram a mesma velocidade da onda ultrassônica, para a idade de cura de 7 dias. No entanto, para a idade de cura de 28 dias, a velocidade da onda ultrassônica do concreto pré-carregado foi maior (35%) do que a do concreto de referência. De acordo a Figura 139, o concreto da amostra pré-



carregada apresentou compacidade excelente, enquanto que o concreto da amostra do concreto de referência apresentou boa compacidade, após a cura de 28 dias.

A retração ao final do ensaio (64 semanas) apresentada pelos concretos pré-carregados e curados por 28 dias foi 26% menor do que a dos concretos de referência. Comparando-se os valores da retração final aos resultados obtidos para a velocidade da onda ultrassônica, verifica-se que houve redução da retração final e aumento da compacidade, em função do pré-carregamento e cura prolongada.

A velocidade da onda ultrassônica no concreto é influenciada pelo efeito global da matriz, das microfissuras e microfissuras. Zhong e Yao (2008, p. 1140) demonstram como o aumento ou redução das microfissuras e microfissuras podem afetar a velocidade da onda ultrassônica, de forma simplificada, através da expressão:

$$V_c = \frac{1}{\frac{i_1}{V_1} + \frac{i_2}{V_2} + \frac{i_3}{V_3}} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

$V_c$  = velocidade da onda ultrassônica do concreto

$i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  e  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  são as frações do volume e as velocidades de propagação da onda ultrassônica que expressam a matriz, as microfissuras e as microfissuras, respectivamente, sendo  $V_3$  a velocidade da ultrassônica no ar (340 m/s).

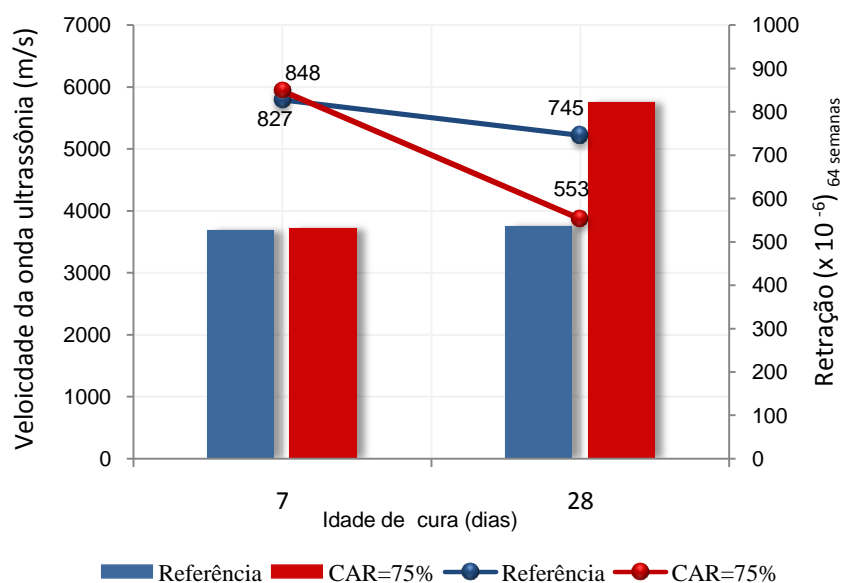
Antes do carregamento, quando a matriz de concreto está íntegra, a velocidade da onda ultrassônica é mais influenciada por  $V_1$ , podendo também ser influenciada por  $V_2$ , considerando-se a existência de microfissuras. Nesse caso,  $i_3=0$ , ou seja, não existem microfissuras. Com o pré-carregamento, as microfissuras existentes no concreto se propagam, dando origem a microfissuras e, também, aumentando o número de microfissuras. O coeficiente relativo à matriz intacta  $i_1$  decresce muito e, paralelamente,  $i_2$  e  $i_3$  aumentam. Consequentemente, a  $V_c$  diminui.

Depois do pré-carregamento, os concretos são submetidos à cura, propiciando a re-hidratação dos produtos e sua recristalização nas fissuras. Assim, a largura das fissuras é estreitada e  $i_3$  decresce. Os produtos ligantes de hidratação nas microfissuras reduzem  $i_2$  e, além disso, alteram o núcleo das microfissuras e da estrutura porosa, aumentando  $V_2$  e havendo, obviamente, o aumento da  $V_c$ . Zhong e Yao (2008, p. 1140) explicam, dessa forma, como a autoconsolidação (*self-healing*) das microfissuras pode ser detectada através da medição da

velocidade da onda ultrassônica. Em alguns casos, de acordo com os autores, o valor medido da  $V_c$  após a consolidação das fissuras, propiciada pela cura prolongada, pode ultrapassar o valor obtido antes do carregamento. Os resultados do ensaio para determinação da velocidade da onda ultrassônica demonstram, portanto, que o concreto submetido a dano pode se recuperar quase completamente durante o período de cura.

A Figura 140 apresenta um gráfico comparativo entre as velocidades de propagação da onda ultrassônica, medidas nos concretos de referência e pré-carregado (CAR=75%), e os valores, em módulo, da retração final (tempo de secagem TS= 64 semanas), para as idades de cura 7 e 28 dias.

Figura 140: Comparação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s) para os concretos de referência e pré-carregado e a retração residual ( $\times 10^{-6}$ ) para as idades de cura de 7 e 28 dias



Através dos resultados obtidos nesse ensaio não destrutivo, ficou também demonstrado que o pré-carregamento e a cura prolongada atuaram de forma associada, reduzindo os vazios (porosidade e microfissuração) e promovendo a densificação da matriz. A classificação apresentada no Quadro 19 comprova a capacidade regenerativa apresentada pelos concretos pré-carregados, quando submetidos à cura até 28 dias. A redução dos vazios e a recuperação das microfissuras contribuíram para a mitigação das deformações por secagem, provavelmente pela associação de dois fatores benéficos: redução da difusão de umidade e aumento da capacidade resistente dos concretos pré-carregados.

Pode-se dizer, portanto, que o pré-carregamento exerceu um efeito benéfico na compacidade do concreto, devido à capacidade de recuperação das microfissuras, favorecida pela cura prolongada (*self-healing*).

## 5.8 DISCUSSÃO FINAL DOS RESULTADOS

A partir dos resultados dos ensaios de retração por secagem ficou bastante evidente que houve uma sobreposição dos efeitos do pré-carregamento e da cura de 28 dias, potencializando a redução da retração por secagem. Para a análise dos resultados obtidos, inicialmente foi necessário retomar algumas definições, princípios físicos e mecanismos fundamentais associados à secagem, buscando-se identificar como e por que o carregamento nas primeiras idades influenciou o comportamento dos concretos frente à retração por secagem. A estratégia utilizada para o entendimento do problema consistiu em analisar a porosidade, a compacidade e a influência da cura na microestrutura do concreto. Assim, através da realização de uma fase experimental complementar, foram realizadas análises importantes para a adequada compreensão dos resultados, como porosimetria por intrusão de mercúrio, microtomografia de raios X e determinação da velocidade da onda ultrassônica. Os resultados dessas análises confirmaram a redução da porosidade dos concretos pré-carregados e evidenciaram a recuperação das microfissuras (*self-healing*).

O efeito exercido pelo pré-carregamento na mitigação das deformações causadas pela retração está relacionado diretamente a alterações da microestrutura do concreto. Nesta tese, o pré-carregamento foi realizado empregando-se o ensaio de tração na flexão, portanto os cp's foram submetidos a esforços de compressão (fibras superiores) e de tração (fibras inferiores). Assim, os concretos estudados foram expostos tanto à compactação, como à microfissuração, considerando-se a distribuição das tensões provenientes do pré-carregamento nos cp's. Em termos microestruturais, a compactação promovida pelo pré-carregamento possivelmente ocasionou a quebra dos cristais de hidróxido de cálcio ( $\text{CaOH}_2$ ) e de etringita, pouco resistentes, ocorrendo o preenchimento dos espaços vazios maiores. Além desse efeito físico, a densificação da matriz foi também promovida pelo preenchimento dos vazios capilares com os produtos da hidratação dos grãos anidros de cimento, tendo em vista a disponibilidade de água, essencial às reações, através da cura. A hidratação continuada promoveu a formação de novos silicatos hidratados de cálcio (C-S-H), estabelecendo-se uma segunda geração de produtos resistentes. Esse efeito já havia sido descrito na pesquisa desenvolvida por Vieira (2008, p. 101), cujo programa experimental foi realizado em paralelo à ETAPA 1 desta tese, e

de forma integrada. Além do preenchimento dos vazios capilares, a cura prolongada possibilitou a hidratação dos grãos de cimento anidro expostos nas paredes das microfissuras geradas pelo pré-carregamento, havendo a formação de hidratos e a selagem, parcial ou integral das mesmas. Portanto, a compactação causada pelo pré-carregamento, em associação à cura prolongada, promoveu alterações microestruturais, influenciando o grau de hidratação e reduzindo, assim, a porosidade da matriz devido ao refinamento dos poros e selagem das microfissuras.

Como se sabe, o movimento da umidade e a secagem ocorrem quando o concreto está exposto a uma umidade mais baixa do que a sua umidade interna, gerando-se um gradiente de umidade próximo à superfície exposta. Durante a secagem, tal gradiente serve como uma força motriz para que a umidade saia do concreto. A frente de secagem, assim constituída, avança desde o interior do concreto para meio externo, através do processo de difusão. O conteúdo de água evaporável existente no concreto é também considerado como força motriz da secagem (IDIART, 2009, p. 70). Os autores de alguns dos mais importantes modelos utilizados para explicar a retração (POWERS, 1948; FELDMAN e SEREDA, 1968; WITTMANN, 1973, *apud* ALY e SANJAYAN, 2010, p. 525) foram unânimes em reconhecer a função relevante que a estrutura de poros desempenha na deformação associada à secagem.

O coeficiente de difusibilidade é influenciado pela microestrutura e, inversamente, a redução da umidade causada pela difusão também afeta o grau de hidratação (KANG *et al.*, 2012, p. 184). Assim, o coeficiente de difusibilidade não é constante ao longo do tempo, variando em função do grau de hidratação, da porosidade do concreto e, principalmente, da distribuição do tamanho dos poros (XI *et al.*, 1994, p.258; KANG *et al.*, 2012, p. 184).

No item 5.5.1 foram apresentados os resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, realizado em amostras dos concretos produzidos com cimento CP V ARI, pré-carregados (car=75%) e de referência (car=0%). Verificou-se que a área total de poros foi menor nas amostras pré-carregadas do que nas amostras de referência, para ambas as idades de cura (7 e 28 dias). Os resultados da análise de microtomografia de raios X corroboraram os resultados de porosimetria, demonstrando que o efeito do pré-carregamento, associado à cura prolongada (28 dias), reduziu a porosidade do concreto.

A taxa de secagem é bastante dependente da microestrutura (ALY e SANJAYAN, 2010, p. 525). Sabe-se que a saída da água para o meio externo depende da porosidade, além do tamanho da rede de poros, sendo mais lenta quando os poros possuem diâmetros menores. A

estrutura de poros se altera quando a relação a/c muda. A níveis baixos de umidade, o coeficiente de difusibilidade aumenta com o aumento da relação a/c porque as moléculas de água migram muito mais depressa nos macroporos do que nos microporos (XI e BAZANT, 1993, p.172). Portanto, a porosidade aumenta para concretos com relações a/c maiores, por apresentarem uma fração maior do volume de macroporos. Tendo em vista que as retrações médias do concretos com CP V ARI e relação a/c=0,70 reduziram, quando submetidos aos níveis de pré-carregamento de 50% e 75% e, com base nos resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio e microtomografia de raios X, pode-se dizer que o pré-carregamento afetou a difusibilidade. Portanto, a compactação associada ao pré-carregamento influenciou a difusão de umidade no interior dos concretos pré-carregados, promovendo a redução da movimentação da água em direção às camadas superficiais, devido à menor porosidade, ou seja, à maior densificação da matriz.

Outro fator que exerce influência significativa nas propriedades de transporte do concreto, segundo Aligizaki (2006, p. 9), é a redução da interconectividade dos poros ou porosidade efetiva. A interconectividade dos poros e, portanto, a porosidade efetiva, são controladas pelo grau de hidratação e, também, pelo grau de compactação (BANTHIA *et al.*, 2005, p. 1651). O aumento do grau de hidratação, favorecido pelo maior tempo de cura, tende a reduzir o diâmetro crítico. Através da continuidade da hidratação, ocorre uma nova formação de gel de C-S-H, promovendo a segmentação da rede de poros capilares e, ainda que os poros capilares permaneçam parcialmente interconectados, o tamanho reduzido dos poros de gel dificulta o fluxo, diminuindo o transporte de água (ODLER e ROBLER<sup>116</sup>, 1985, *apud* TOPLICIC-CURCIC *et al.*, 2012, p. 136). Como pode ser observado na Figura 138 (b), do item 5.5.1, o diâmetro crítico das amostras pré-carregadas também foi menor em relação ao diâmetro crítico das amostras de referência, evidenciando menor volume de poros interligados. Portanto, com o pré-carregamento houve redução da porosidade efetiva, o que também influenciou a difusão de umidade nos concretos pré-carregados.

Sabe-se que, além da conectividade dos poros, a tortuosidade é outro parâmetro físico que auxilia a obter o melhor entendimento do efeito da estrutura de poros nas propriedades de transporte do concreto (PROMENTILLA *et al.*, 2009, p.549). Com relação ao movimento de moléculas e átomos na matriz do concreto, a tortuosidade pode descrever o caminho mais

---

<sup>116</sup>. I. Odler, and M. Röbler, Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes: II. Effects of pore structure and degree of hydration. *Cement Concrete Res* 1985;15:401– 10.

longo a ser percorrido entre poros conectados (PROMENTILLA e SUGIYAMA, 2007, p.4). Abyaneh *et al.* (2013, p.73) realizaram uma investigação numérica para avaliar a difusibilidade do concreto que, como se sabe, é diretamente influenciada pela porosidade capilar. Através das simulações computacionais realizadas pelos referidos autores, ficou evidente que o aumento da tortuosidade reduziu significativamente a difusibilidade, diminuindo assim o transporte no concreto.

Salienta-se que, na presente tese, não foram realizadas medições ou simulações para determinar a tortuosidade dos concretos estudados. Contudo, é bastante provável que a compactação decorrente do pré-carregamento tenha influenciado a tortuosidade dos capilares dos concretos pré-carregados. Os resultados do ensaio de retração por secagem dos concretos pré-carregados, para ambos os cimentos utilizados, indicaram que houve redução da retração para a relação  $a/c=0,70$ , diferente do esperado. Tendo em vista a menor disponibilidade de grãos anidros para a continuidade da hidratação, devido à maior relação  $a/c$ , entende-se que a redução da retração seja devida, parcialmente, ao aumento da tortuosidade. Nesses concretos, devido à maior fragilidade da matriz, é possível que as menores deformações por retração estejam ligadas à maior redução da velocidade de saída da água, em comparação aos concretos com relações  $a/c$  menores. É provável que a redução da taxa de secagem esteja relacionada a obstruções nos poros e ao aumento da tortuosidade, dificultando/reduzindo a saída da água do interior dos concretos. Além disso, a cura prolongada também exerceu um papel fundamental, retardando a evaporação nas idades iniciais.

Outro fator de extrema importância a ser considerado é a capacidade resistente do concreto frente às tensões originadas durante a secagem. Não só a magnitude das tensões geradas na secagem tem influência no grau de deformação do concreto mas, também, a velocidade com que ocorre a saída da água (taxa da retração). O concreto deve apresentar resistência compatível com as tensões geradas e sua capacidade resistente está diretamente ligada à porosidade. Coussy e Brisard (2009, p. 278) abordaram a secagem a partir do comportamento micromecânico do concreto, levando em consideração que os poros não se deformam uniformemente. O processo de secagem leva à distribuição heterogênea da umidade, podendo surgir elevadas tensões de tração (WITTMANN *et al.*, 2009, p. 16) que não devem ultrapassar a capacidade resistente do concreto. Lootens e Bentz (2016, p.2) chamam a atenção para o fato de que, historicamente, o concreto tem sido avaliado através da sua resistência à compressão. Os autores mencionam os impactos do extenso estudo publicado por Lyse, há mais de 80 anos, apontando conclusões importantes sobre a resistência do concreto, com

destaque para as seguintes: (i) resistência à compressão e relação a/c são inversamente proporcionais; (ii) o cimento é o constituinte do concreto responsável pela sua resistência; (iii) a uma dada idade, a resistência do concreto aumenta proporcionalmente ao aumento do número de partículas de cimento por unidade (volume) de água. Lootens e Bentz (2016, p.2) propõem relacionar o desenvolvimento da resistência do concreto com a porosidade e hidratação das pastas de cimento nas primeiras idades. De acordo com os autores, a observação de Lyse de que *“a resistência do concreto aumenta proporcionalmente ao aumento do número de partículas de cimento por unidade (volume) de água”* poderia ser facilmente expandida para supor que *o desenvolvimento da resistência, ao longo do tempo, é diretamente proporcional ao volume de produtos de hidratação produzidos por unidade de volume da água da mistura, também equivalente à fração da porosidade inicial que foi preenchida pelos produtos sólidos da hidratação, desconsiderando-se quaisquer vazios de ar da mistura*. De acordo com tais pesquisadores, existe uma relação direta entre a capacidade resistente do concreto e a densificação da matriz promovida através do preenchimento dos vazios capilares com os produtos sólidos da hidratação, devendo ser adequadamente considerada.

As propriedades dos materiais cimentícios dependem fortemente do conteúdo de umidade e, especialmente para fenômenos dependentes do tempo, como a retração, é importante o conhecimento da evolução da distribuição da umidade no interior do elemento (XI e BAZANT, 1993, p.169). Como discutido anteriormente, o volume de poros capilares e dos poros de gel, bem como a distribuição do diâmetro dos poros e sua conectividade são fatores importantes que influenciam não somente os mecanismos de transporte de umidade mas, de um modo geral, afetam as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. A baixa porosidade, além de um teor suficiente de material ligante, são condições necessárias para o aumento da resistência do concreto frente às deformações impostas por carregamento mecânico, ou por variações dimensionais. Além disso, tais fatores promovem a qualidade da matriz, tornando o concreto menos suscetível à fissuração e, portanto, mais durável.

Conforme item 5.2.1.8 desta tese, para a análise do efeito do pré-carregamento na retração por secagem foram apresentados exemplos de pesquisas que abordaram a influência do pré-carregamento nas propriedades mecânicas do concreto (ABDEL-JAWAD e HADDAD, 1992; SALVADOR, 2007; VIEIRA, 2008). Os resultados de tais pesquisas demonstraram que o pré-carregamento exerceu um efeito benéfico nas propriedades avaliadas, como por exemplo,

aumento da resistência à compressão. Os concretos estudados nesta tese, como discutido anteriormente, apresentaram redução da porosidade total e efetiva, em função do efeito de compactação decorrente do pré-carregamento. Além do efeito favorável no decréscimo da quantidade e da taxa de difusão, acredita-se que a redução da porosidade, possibilitada devido à continuidade das reações de hidratação através da cura prolongada, tenham também promovido o aumento da capacidade resistente dos concretos pré-carregados, de um modo geral.

Outras pesquisas, desenvolvidas com foco na durabilidade, investigaram o efeito de diferentes níveis de carregamento em concretos, medindo sua permeabilidade à água, como Kermani (1991), Bhargava e Banthia, (2006); aos íons cloreto, como Yamakawa (2008) VENQUIARUTO (em desenvolvimento, 2014) e ao gás N<sub>2</sub>, como Sugiyama (1996) e Choinska et al. (2007). Para a avaliação dos parâmetros de interesse das pesquisas mencionadas, diferentes métodos para a aplicação do carregamento foram adotados. De acordo com Banthia e Bhargava (2007, p.28), o tipo de tensão aplicada (compressão, tensão ou flexão), a taxa e o nível de carregamento exercem influência na geração de fissuras no elemento de concreto, bem como no padrão das fissuras geradas. De um modo geral, os resultados das pesquisas mencionadas indicaram que existe um nível de carregamento limite, a partir do qual os efeitos gerados exercem influência significativa nas propriedades investigadas. Quando o concreto é submetido à compressão, existe uma constrição inicial da rede de poros e das microfissuras, e a permeabilidade do concreto permanece constante ou, até mesmo, apresenta uma pequena redução. A partir de um valor limite, a permeabilidade aumenta devido à coalescência das fissuras conforme já mencionado na seção 3.7.3.4. Na literatura, encontram-se diferenças na determinação deste valor limite, dependendo dos parâmetros adotados em cada pesquisa. Concretos submetidos a um carregamento à compressão de até 40% da carga última de ruptura apresentaram pequeno aumento na permeabilidade de concretos a íons cloreto (BIPARVA, 2005, p. 79; SAMAHA e HOVER, 1992, *apud* HOSEINI *et al.*, 2009, p. 214; BANTHIA e BHARGAVA, 2007, p.70). Com relação à permeabilidade ao gás N<sub>2</sub>, algumas pesquisas indicaram que carregamentos entre 50 e 60% da carga última à compressão causam reduções em torno de 20% da permeabilidade do concreto. Aumentos consideráveis da permeabilidade do concreto ao gás, em função da coalescência das fissuras, foram obtidos somente a partir de 80% da tensão última de ruptura à compressão (CHOINSKA, *et al.*, 2007, p. 87; HOSEINI *et al.*, 2009, p. 219). Assim, tanto para água como para o gás nitrogênio, fica evidente que no concreto sob compressão, as redes



pré-existentes de poros e microfissuras são inicialmente comprimidas. Então, a permeabilidade cai até um determinado nível de carga que corresponde ao nível de coalescência das microfissuras, a partir do qual a permeabilidade começa a aumentar (HOSEINI *et al.*, 2009, p.217).

Zhong e Yao (2008, p. 1138) destacaram a importância da avaliação do grau de dano do concreto e da idade em que o concreto é submetido ao carregamento, entre os fatores que influenciam a autoconsolidação das fissuras e a recuperação da capacidade resistente do concreto. Para avaliação destes fatores, os pesquisadores moldaram concretos de resistência normal e concretos de alta resistência. Os concretos de resistência normal foram submetidos a um carregamento por compressão axial nas idades de 7, 14 e 28 dias, enquanto os concretos de alta resistência, nas idades de 3, 14, 28 e 60 dias. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e de determinação da velocidade do pulso ultrassônico nas amostras, antes e depois do carregamento. Posteriormente, os concretos de resistência normal foram curados por 30 dias e os de alta resistência, por 60 dias e, ao término da cura, as amostras foram novamente avaliadas, para verificação das propriedades após a autoconsolidação dos danos. Ficou constatado que, após o período de cura, denominado pelos autores da pesquisa como *período de autoconsolidação*, não apenas as propriedades mecânicas foram recuperadas, mas as medições da velocidade do pulso ultrassônico, que haviam diminuído logo após a aplicação do carregamento, evidenciaram crescimento, obtendo-se valores muito próximos aos medidos antes do carregamento. Esse resultado demonstrou que após a cura por imersão em água, a hidratação continuada promoveu a recristalização das fissuras. Stefan<sup>117</sup> (1995, *apud* Zhong e Yao, 2008, p. 1140) identificou, através de imagens obtidas em microscopia eletrônica de varredura, que os produtos da re-hidratação, localizados nas laterais das fissuras, são mais densos do que os que preenchem a parte central. Dessa forma, a partir da re-hidratação, começa a se estabelecer uma ponte de ligação entre as laterais que não somente estreitam a largura das microfissuras, mas que alteram o seu núcleo e a estrutura porosa que o constitui.

Quando o concreto está exposto ao carregamento, as microfissuras que surgem deixam expostas partículas de cimento anidro que estavam anteriormente envolvidas por produtos de hidratação. Se houver disponibilidade de água, as partículas de cimento anidro se re-hidratam, e os novos produtos formados colmatam as finas fissuras, promovendo o seu gradual estreitamento. Quando o grau de dano for muito baixo, o número de partículas de cimento

---

<sup>117</sup>Stefan J, Jacques M, Hugues H. SEM observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concretes. *Cement and Concrete Res* 1995; 25(8):1781–90.

anidro expostas é pequeno, não favorecendo a re-hidratação. Por outro lado, se o dano for muito elevado, a extensão dos novos produtos formados não pode colmatar as fissuras (ZHONG e YAO, 2008, p.1141). Segundo os pesquisadores, existe um grau limite, a partir do qual a colmatação das fissuras é dificultada, e esse valor limite é maior para concretos de resistência normal, quando ocorre um incremento mais suave de resistência, em comparação aos concretos de alta resistência.

O nível de resistência do concreto de cimento Portland e o ganho da resistência dependem de diversos fatores, destacando-se a taxa e grau de hidratação, que são relacionados ao tipo de cimento, à composição da mistura, tipo e propriedades dos agregados, além da temperatura, tempo e método de cura utilizados. Com relação ao ganho de resistência ao longo do tempo, a pesquisa desenvolvida por Zhong e Yao (2008, p. 1141), possibilitou avaliar a influência da idade de pré-carregamento nas propriedades mecânicas dos concretos. Tais pesquisadores evidenciaram, através da realização do ensaio para determinação da velocidade do pulso ultrassônico, que quanto antes ocorrer o carregamento dos concretos, maior será a recuperação das propriedades mecânicas. Para os concretos de alta resistência, carregados após cura de 60 dias, foi constatado que o ganho de resistência foi praticamente nulo. É que em idades mais avançadas, não existem muitos grãos anidros para contribuírem com o incremento de resistência. Pelas mesmas razões, em concretos de resistência normal, os ganhos na recuperação das propriedades mecânicas tendem a ser maiores, devido à maior disponibilidade de grãos ainda não hidratados.

Sabe-se que a compressão impõe ao concreto uma constrição inicial da rede de poros, a aplicação de níveis elevados de carregamento (até 75% da carga média de ruptura por tração na flexão), nas idades iniciais (1, 3 e 7 dias), tenha favorecido o surgimento de microfissuras, tanto na zona tracionada dos corpos de prova, quanto em regiões de maior porosidade, como na zona de transição. Contudo, os resultados do ensaio de retração por secagem demonstraram que, em geral, o efeito do carregamento precoce foi benéfico, provavelmente superando possíveis efeitos prejudiciais da microfissuração, considerando que os corpos de prova foram submetidos à cura em água, após o pré-carregamento.

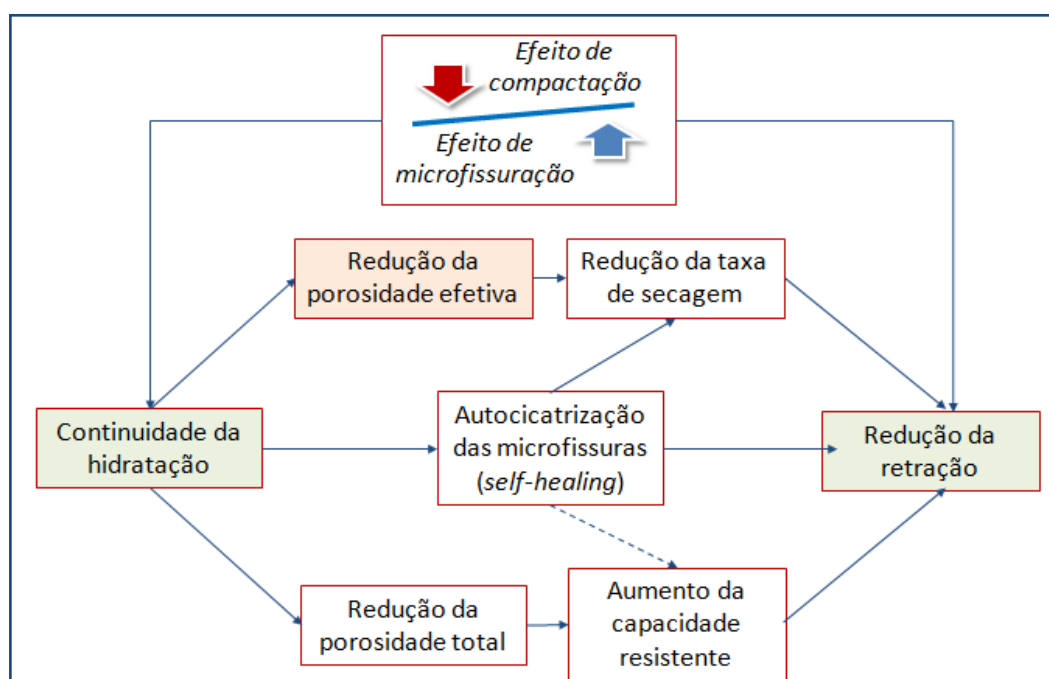
De acordo com a literatura (LI e YANG, 2007, p. 161; YANG *et al.*, 2009, p. 382), entre as condições favoráveis para que a autocicatrização ocorra, a principal é a disponibilidade de água para a continuidade da hidratação, pH da água, composição do concreto, presença de grãos anidros, largura e tortuosidade da fissura, entre outros. Qjan *et al.* (2009, p. 613) pré-

fissuraram amostras através de um teste de flexão com 4 apoios e, posteriormente, submergiram as mesmas em água por um certo período, demonstrando que os concretos apresentaram um comportamento de autocicatrização. Segundo Abdel-Jawad e Haddad (1992, p.936), a cura úmida é essencial para obter a máxima resistência em concretos que sofreram cicatrização através do preenchimento das fissuras, embora não signifique que a resistência completa possa ser recuperada.

Diante do exposto, e considerando resultados obtidos na presente tese, a disponibilidade de água devido à cura por imersão dos cp's desempenhou papel fundamental, possibilitando a continuidade da hidratação do cimento a redução dos concretos submetidos ao carregamento de curta duração, nas idades iniciais, bem como a autoconsolidação das fissuras, como evidenciado através das análises realizadas, foi garantida pela realização da cura por imersão em água.

Acredita-se, portanto, que os resultados benéficos obtidos estão ligados à ação conjunta do pré-carregamento e da cura por imersão em água, possibilitando redução da porosidade, aumento da compacidade e recuperação parcial das microfissuras existentes, como ilustra a Figura 141.

Figura 141: Efeito do carregamento precoce associado à cura por imersão em água



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese teve como principal objetivo verificar a influência do pré-carregamento na retração por secagem do concreto. Para tanto, foram moldados corpos de prova prismáticos (7,5 x 7,5 x 28,5) cm, utilizando-se:

- dois tipos de cimento: CP V ARI, CP IV;
- três relações a/c: 0,35, 0,50 e 0,70;
- duas idades de cura: 7 e 28 dias;
- tempo de secagem: 64 semanas.

Os cp's foram submetidos ao pré-carregamento por tração na flexão (NBR 12142, ABNT, 2010), adotando-se:

- níveis de pré-carregamentos: 0%, 25%, 50% e 75% da carga média de ruptura;
- idades de pré-carregamento: 1, 3 e 7 dias.

Após as respectivas idades de cura, os cp's (pré-carregados e de referência) foram ensaiados para determinação da retração por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), utilizando-se como base a ASTM C 157 (ASTM, 2014).

Verificou-se que o pré-carregamento e a idade de pré-carregamento influenciaram de modo diferente os concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP IV. O Quadro 20 apresenta os percentuais de aumento/redução da retração média, em relação aos concretos de referência (car=0%), em função dos níveis de pré-carregamento, para as relações a/c e idades de cura, possibilitando a comparação do desempenho dos concretos.

Quadro 20: Aumento/Redução percentual da retração média, em relação aos concretos de referência, devido à variação dos níveis de pré-carregamento, para as relações a/c e idades de cura adotadas: CP V ARI e CP IV

Id_cura	a/c	CP V ARI			CP IV		
		Car (em relação a car=0%)			Car (em relação a car=0%)		
		25%	50%	75%	25%	50%	75%
7 dias	0,35	10%	14%	24%	59%	66%	49%
	0,50	12%	3%	6%	30%	35%	32%
	0,70	39%	38%	44%	23%	11%	8%
28 dias	0,35	40%	33%	10%	7%	54%	28%
	0,50	21%	12%	6%	19%	21%	27%
	0,70	70%	65%	90%	26%	30%	27%

Sendo:

**Redução**

**Aumento**

Pode-se dizer que, de um modo geral, ocorreu:

- ✓ CP V ARI: redução da retração média nos concretos pré-carregados, principalmente para as maiores relações a/c e cura prolongada;
- ✓ CP IV: redução da retração média nos concretos com relação a/c 0,70, para ambas as situações de cura.

O Quadro 21 mostra os percentuais de aumento/redução da retração média, em relação aos concretos de referência (car=0%), em função das idades de pré-carregamento, para as relações a/c e idades de cura, possibilitando a comparação do desempenho dos concretos.

Quadro 21: Aumento/Redução percentual da retração média dos concretos pré-carregados nas idades de 3 e 7 dias, em relação aos pré-carregados na idade de 1 dia, para as relações a/c e idades de cura adotadas: CP V ARI e CP IV

Id_cura	a/c	CP V ARI		CP IV	
		Id_car (em relação a 1dia)		Id_car (em relação a 1dia)	
		3 dias	7 dias	3 dias	7 dias
7 dias	0,35	19%	25%	5%	37%
	0,50	17%	2%	11%	17%
	0,70	9%	31%	9%	1%
28 dias	0,35	35%	25%	12%	45%
	0,50	23%	2%	12%	22%
	0,70	34%	28%	8%	30%

Sendo:

<b>Redução</b>	<b>Aumento</b>
----------------	----------------

Pode-se dizer que, de um modo geral, ocorreu:

- ✓ CP V ARI: aumento da retração média para as relações a/c 0,50 e 0,70, para as idades de pré-carregamento de 3 e 7 dia, ou seja, o pré-carregamento na idade de 1 dia foi benéfico para as maiores relações a/c;
- ✓ CP IV: redução da retração média para todas as relações a/c, nas idades de pré-carregamento de 3 e 7 dias, ou seja, o pré-carregamento na idade de 1 dia não foi benéfico para nenhuma relação a/c.

Posteriormente, através de um programa experimental complementar, realizaram-se análises de porosimetria por intrusão de mercúrio, microtomografia de raios X e determinação da velocidade da onda ultrassônica (NBR 8802, ABNT, 1994), para a caracterização da porosidade e da compacidade dos concretos estudados. Para tanto, foram produzidos corpos de prova prismáticos (7,5 x 7,5 x 28,5) cm para a extração de amostras, utilizando-se:

- tipo de cimento: CP V ARI;
- relação a/c: 0,50;
- idades de cura: 3, 7 e 28 dias

Os corpos de prova foram submetidos ao pré-carregamento por tração na flexão (NBR 12142, ABNT, 2010), adotando-se:

- níveis de pré-carregamentos: 0% e 75% da carga média de ruptura;
- idade de pré-carregamento: 3 dias.

O Quadro 22 apresenta as variações (%) da velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s) e da retração média por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), ocorridas em função da idade de cura, para os níveis de pré-carregamento, possibilitando a comparação do desempenho dos concretos.

Quadro 22: Variações (%) da velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s) e da retração média por secagem ( $\times 10^{-6}$ ), em função da idade de cura (7 dias  $\rightarrow$  28 dias), para os dois níveis de pré-carregamento (0% e 75%)

CP V ARI		
Cura 7 dias $\rightarrow$ Cura de 28 dias		
Nível do pré-carregamento (%)	Velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s)	Retração média ( $\times 10^{-6}$ )
0	<b>Inalterada</b>	<b>Redução (10%)</b>
75	<b>Aumento (35%)</b>	<b>Redução (35%)</b>

Ocorreu aumento da compacidade dos concretos pré-carregados (75%) em relação aos concretos de referência (0%), evidenciado pelo aumento da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Em paralelo, a retração média por secagem dos concretos pré-carregados também reduziu em relação aos concretos de referência. Portanto, os concretos pré-carregados, após a cura prolongada, apresentaram densificação da matriz, o que contribuiu para o aumento da sua capacidade resistente e para o melhor desempenho frente às deformações provenientes da secagem.

O Quadro 23 apresenta os percentuais de redução da porosidade total (%), em função da idade de cura (3 dias  $\rightarrow$  28 dias), para os níveis de pré-carregamento 0% e 75%, identificados a partir da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Quadro 23: Redução (%) da porosidade total, em função da idade de cura (3 dias → 28 dias), carregamento: 0% e 75%

CP V ARI	
Cura 3 dias → Cura de 28 dias	
Nível de pré-carregamento	Porosidade total (%)
0%	<b>Redução (18%)</b>
75%	<b>Redução (34%)</b>

O Quadro 24 mostra os diâmetros críticos (nm), para os concretos pré-carregados e de referência, nas idades de cura 3 e 28 dias.

Quadro 24: Diâmetro crítico (nm), em função da idade de cura (3 dias → 28 dias), carregamento: 0% e 75%

CP V ARI		
Diâmetro crítico (nm)		
Nível de pré-carregamento	Cura: 3 dias	Cura: 28 dias
0%	<b>2.462</b>	<b>1.972</b>
75%	<b>2.772</b>	<b>1.778</b>

O pré-carregamento potencializou o efeito benéfico da cura prolongada, promovendo uma redução da porosidade total (%) praticamente duas vezes maior, em relação ao concreto de referência. Além disso, a redução do diâmetro crítico também comprova que o refinamento dos poros foi maior nas amostras pré-carregadas.

A análise de microtomografia de raios X corroborou os resultados obtidos na análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, demonstrando que a porosidade total (%) reduziu nos concretos submetidos ao pré-carregamento e à cura prolongada, conforme apresenta o Quadro 25.



Quadro 25: Valores da porosidade total (%) dos concretos pré-carregados e de referência, obtidos através das análises de porosimetria por intrusão de mercúrio e de microtomografia de raios X, para a idade de cura de 28 dias

CP V ARI		
Porosidade total (%) para idade de cura de 28 dias		
Nível de pré-carregamento	Porosimetria por intrusão de mercúrio	Microtomografia de raios X
0%	<b>10,40 %</b>	<b>10,35 %</b>
75%	<b>8,21 %</b>	<b>6,41 %</b>

## 6.1 CONCLUSÕES

As conclusões apresentadas referem-se aos dados obtidos através dos ensaios e análises realizados com os concretos produzidos nesta tese, utilizando-se tipos, quantidades e qualidades específicas de materiais e técnicas de execução. Portanto, apesar de estarem embasadas e em consonância com as referências bibliográficas consultadas, não devem ser tomadas de forma absoluta. Sua representatividade deve ser firmada através da execução de novas pesquisas experimentais, buscando-se complementar e confirmar os resultados obtidos no presente estudo.

Deve-se salientar, também, que as cargas aplicadas nos concretos estudados nesta tese foram de curta duração.

A seguir são apresentadas as principais tendências de comportamento, identificadas a partir da análise estatística dos resultados obtidos no ensaio de retração por secagem (ASTM C 157 (ASTM, 2014) para os concretos avaliados, e pelos resultados das análises complementares, realizadas durante a segunda etapa experimental da tese. Para a elaboração da discussão dos resultados, realizou-se ampla consulta a referências bibliográficas sobre os temas abordados.

Com relação à influência do tempo de secagem e da idade de cura na retração por secagem dos concretos estudados, concluiu-se que:

- para os concretos produzidos com ambos os cimentos, praticamente 50% da retração por secagem, obtida ao final do ensaio, ocorreram nas oito primeiras semanas, período correspondente a apenas 12,50% da duração total do ensaio (64 semanas);

- para os concretos com cimento CP V ARI, a cura de 28 dias promoveu a redução de 48% da retração média, em relação à cura de 7 dias e, para os concretos com cimento CP IV, essa redução foi de 46%.

Dependendo da combinação entre os fatores *relação a/c*, *idade de cura*, *idade de carregamento* e *nível de carregamento*, ocorreram condições favoráveis à redução da retração por secagem, considerando-se os dois tipos de cimento empregados nesta pesquisa. O pré-carregamento provocou dois efeitos nos concretos estudados, em maior ou menor grau: compactação e microfissuração.

A compactação ocasionou a quebra dos compostos menos resistentes da microestrutura, promovendo o preenchimento dos vazios maiores e deixando expostos grãos anidros de cimento. Quando as tensões geradas ultrapassaram a capacidade resistente dos concretos, o carregamento causou microfissuração, favorecendo, também, a exposição de grãos de cimento não hidratados. A disponibilidade de água, através da cura por imersão, possibilitou a continuidade das reações de hidratação. Portanto, além do efeito físico de preenchimento dos grandes vazios capilares, em função da compactação, a formação de novos produtos resistentes (C-S-H) foi fundamental para a redução das porosidades total e efetiva, com efeitos satisfatórios na redução da saída da água e na taxa da retração, nos concretos com as maiores relações a/c. Os resultados das análises de porosimetria por intrusão de mercúrio e de microtomografia de raios X evidenciaram a redução da porosidade %, e o ensaio para determinação da velocidade da onda ultrassônica mostrou que houve aumento da compactação dos concretos pré-carregados. Assim, a hidratação continuada promoveu também a autocicatrização das microfissuras, contribuindo para a densificação da matriz, e favorecendo, também, o aumento da capacidade resistente dos concretos frente aos esforços oriundos da secagem.

Ficou clara a influência do tipo de cimento no comportamento dos concretos com relação à idade do carregamento. Os concretos produzidos CP V ARI, cuja microestrutura se desenvolve mais rapidamente, apresentaram uma resposta satisfatória ao carregamento na idade de 1 dia, enquanto que para os concretos com cimento CP IV, o efeito benéfico do carregamento ocorreu nas idades de 3 e 7 dias.

Para os materiais e métodos empregados nesta tese, os resultados obtidos mostraram que, mesmo para níveis elevados de carregamento que, nesta tese, corresponderam a cargas de curta duração, os concretos apresentaram desempenho satisfatório frente às tensões

provenientes da secagem. Esse resultado foi devido à ocorrência simultânea entre diversos fatores, como tipo de cimento, nível e idade de carregamento, relação a/c e, principalmente, idade de cura. Tal combinação de condições promoveu a mitigação da retração por secagem, através da redução da porosidade efetiva e, assim, da saída da água do concreto, por difusão. Ao mesmo tempo, a disponibilidade de água propiciou a continuidade da hidratação dos grãos anidros e a cicatrização das microfissuras causadas pelo carregamento, contribuindo para melhorar o desempenho mecânico do concreto.

Contudo, salienta-se que, quando forem adotados maiores níveis de resistência, o volume da porosidade capilar tende a ser muito menor. Nestes casos, a incidência de microfissuração causada por carregamento precoce pode ter efeitos bastante prejudiciais, havendo o aumento da taxa da retração por secagem e, em consequência, da magnitude das tensões nas primeiras idades. Essas constatações evidenciam ser imprescindível o adequado entendimento do desempenho do concreto frente à retração por secagem, quando submetido a carregamentos não previstos, nas idades iniciais. Além disso, comprovam a importância da adoção de medidas que promovam a qualidade da execução da estrutura, principalmente no que se refere às condições de cura do concreto.

Tendo em vista que diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para investigar o efeito do pré-carregamento/pré-fissuração na capacidade resistente e na permeabilidade de concretos submetidos a diferentes condições de cura, considera-se que uma das contribuições importantes desta tese foi apresentar uma forma inovadora para a verificação da consolidação das microfissuras. De acordo com as evidências obtidas na presente tese, o ensaio de retração por secagem (ASTM, C157, 2004), em associação às análises microestruturais (porosimetria por intrusão de mercúrio e microtomografia de raios X) e ao ensaio para determinação de propagação da onda ultrassônica, pode ser considerado como uma alternativa viável para a avaliação da capacidade de autocicatrização das microfissuras em concretos submetidos ao carregamento precoce.

## 6.2 SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Diante da complexidade do tema, faz-se necessária a realização de novos estudos que possam apresentar contribuições ao adequado entendimento dos efeitos do pré-carregamento nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Sugerem-se, portanto, os seguintes temas para futuras pesquisas:

- identificação das alterações da porosidade efetiva em concretos pré-carregados por tração na flexão e expostos à cura prolongada, através da análise de microtomografia de raios X;
- estudo da autocicatrização de microfissuras em concretos pré-carregados por tração na flexão, submetidos à cura prolongada, através de análises de microtomografia de raios X e microscopia eletrônica de varredura;
- estudo da autocicatrização de microfissuras em concretos pré-carregados por tração na flexão, considerando-se diferentes faixas de umidade relativa do ar;
- influência da tortuosidade na difusão de água em concretos pré-carregados por tração na flexão, submetidos à cura prolongada, utilizando-se análise de microtomografia de raios X.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASNIA, R. et al. Prediction of free shrinkage strain related to internal moisture loss. **International Journal of Civil Engineering**. [S.l.]. v.7, n.2, p. 92-98, 2009.

ABDEL-JAWAD, Y. e HADDAD, R. Effect of early overloading of concrete on strength at later ages. **Cement and Concrete Research**. Oxford. v.22, p. 927-936, 1992.

ABYANEH, S.D. Modelling the diffusivity of mortar and concrete using a three-dimensional mesostructure with several aggregate shapes. **Computational Materials Science**. [S.l.]. v.78, p. 63–73, 2013.

ACI Committee 209. **Prediction of creep, shrinkage, and temperature effect in concrete structures**, Detroit, MI, 1992.

AHMAD, S. et al. A study of permeability and tortuosity of concrete. In: CONFERENCE ON OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, 30. 2005, Singapore. **Proceedings...** Singapore: CI-Premier, 2005. Não paginado. Disponível em: <[http://www.cipremier.com/e107\\_files/downloads/Papers/100/30/100030015.pdf](http://www.cipremier.com/e107_files/downloads/Papers/100/30/100030015.pdf)>. Acesso em: 26 jan. 2017.

AHMAD, S. et al. Effect of the key mixture parameters on tortuosity and permeability concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**. [S.l.]. v. 10, p.86-94, 2012.

ALDEA, C. M Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. [S.l.]. v.11, n.3, p. 181-187, 1999.

ALY, T e SANJAYAN, J.G. Effect of pore-size distribution on shrinkage of concretes. **Journal of Materials in Civil Engineering**. [S.l.]. v.22, p.525-532, 2010.

ALIGIZAKI, K.K. **Pore structure of cement-based materials: testing, interpretation and requirements**. (Ed). Abingdon: Taylor & Francis. 2006, 382 p.

AL-SALEH, S.A. e AL-ZAID, R.Z. Effects of drying conditions, admixtures and specimen size on shrinkage strains. **Cement and Concrete Research**. Oxford, v.36, p. 1985 -1991, 2006.

ALY, T e SANJAYAN, J.G. Effect of pore-size distribution on shrinkage of concretes, **Journal of Materials in Civil Engineering**. [S.l.]. v.22, p. 525-532, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 78**: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). Philadelphia, 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 157**. Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic – Cement Mortar and Concrete. Philadelphia, 2014.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 403**: Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. Philadelphia, 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 490**: Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. Philadelphia, 2011.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 496**: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Philadelphia, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial: especificação. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto forno: especificação. Rio de Janeiro, 1991. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico: especificação. Rio de Janeiro, 1999. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2016. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 15 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Concreto Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 7 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais – Desempenho” CBIC, 2013, 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 49**: Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

AURICH, M. **Simulação computacional do comportamento do concreto nas primeiras idades**. 2008. 190 p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BANTHIA, N. et al. Permeability of concrete under stress. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v.35, p. 1651 -1655, 2005.

BANTHIA, N. e BHARGAVA, A. Permeability of stressed concrete and role of fiber reinforcement. **Materials Journal**, [S.l.]. v. 104, n.1, p. 70-76, 2007.

BHARGAVA, A. e BANTHIA, N. Permeability of concrete with fiber reinforcement and service life predictions. **Materials and Structures**, [S.l.]. v. 41, p. 363–372, 2008.

BHARGAVA, A. e BANTHIA, N. Measurement of concrete permeability under stress. **Experimental Techniques**, [S.l.]. v.30, n.5, p. 28-31, 2006.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. 2001. 172 p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BARCELO, L. Chemical Shrinkage, p 21-25. In: **Early Age Cracking in Cementitious Systems. Report of RILEM Technical Committee TC 181-EAS: Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems**. Edited by A. Bentur, 337 p., 2002.

BAROGUEL-BOUNY, V. et al. Autogenous deformations of cement pastes Part. II. W/C effects, micro-macro correlations, and threshold values. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v. 36, p. 123 -136, 2006.

BAŽANT, Z. Criteria for Rational Prediction of Creep and Shrinkage of Concrete. **Revue Française de Génie Civil**, [S.l.]. v. 3, p. 61-89, 1999.

BAZZONI, A. **Study of early hydration mechanisms of cement by means of electron microscopy**. 2014. 142 p. Thèse (Doctorat). Programme Doctoral en Science et Génie des Matériaux. Suisse, 2014.

BENTUR, A.; MITCHEL, D. Material performance lessons. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.38, p. 259 – 272, 2008.

BIPARVA, A. **Permeability and durability of high volume fly ash concrete under an applied compressive stress**. 2005. 94p. Thesis (Master of Applied Science), University of British Columbia, 2005.

BISSONNETTE, B. et al. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.29, p. 1655 – 1662, 1999.

BOUASKER, M. **Étude numérique et expérimentale du retrait endogene au très jeune age des patês de ciment avec et sans inclusions**. 2007. Thèse (Doctorat). École Doctoral et Mecanique, Thermiquet et Genie Civil, Université de Nantes, Nantes, 2007.



BROUWERS, H. J. H. D. The work of Powers and Brownyard revisited: Part 1. **Cement and Concrete Research**. Oxford. v. 34, p. 1697 – 1716, 2004.

BULLARD et al. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v. 41, p: 1208-1223, 2011.

CANUT, M.M.C. **Pore Structure in blended cement pastes**. 2012. 231p. PhD Thesis - Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2012.

CASTRO, A.L. de e PANDOLFELLI, V.C Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, [S.l.]. v.55, p. 18-32, 2009.

CHOINSKA, M. et al. Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.37, p. 79-88, 2007.

CLARK, C. **Concrete shrinkage prediction using maturity and activation energy**. 2009, 114p. Master of Science - University of Maryland, College Park, 2009.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. Bulletin d'Information N. 199. **Evaluation of the time dependent behavior of concrete**. Prepared by H. S. Müller & H. K. Hilsdorf. 1990, 127 p.

COSTOYA FERNANDEZ, M.M. **Effect of Particle Size on the Hydration Kinetics and Microstructural Development of Tricalcium Silicate**. 2008. 198 p. Thèse (Doctorat). Programme Doctoral en Science et Génie des Matériaux, Suisse, 2008.

COUTINHO, M. J. A. R. S. **Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem**, 2005, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rainho e Neves Ltd. 1a ed. Disponível em:

[http://books.google.com.br/books?id=D-wnU7kswRIC&pg=PA38&lpg=PA38&dq=distribui%C3%A7%C3%A3o+de+poros+segundo+Setzer+\(1995\)+CEB+1992&source=bl&ots=aRtmmt25QT&sig=IIE7bVaPLJK77U1qtsAI373sW6U&hl=en&sa=X&ei=hxysU5XgHqjfsATWkYKoDQ&ved=0CBwQ6AEwAA#v=onepage&q=distribui%C3%A7%C3%A3o%20de%20poros%20segundo%20Setzer%20\(1995\)%20CEB%201992&f=false](http://books.google.com.br/books?id=D-wnU7kswRIC&pg=PA38&lpg=PA38&dq=distribui%C3%A7%C3%A3o+de+poros+segundo+Setzer+(1995)+CEB+1992&source=bl&ots=aRtmmt25QT&sig=IIE7bVaPLJK77U1qtsAI373sW6U&hl=en&sa=X&ei=hxysU5XgHqjfsATWkYKoDQ&ved=0CBwQ6AEwAA#v=onepage&q=distribui%C3%A7%C3%A3o%20de%20poros%20segundo%20Setzer%20(1995)%20CEB%201992&f=false)Acesso em: 23/06/2014.

COUSSY, O.P. e BRISARD, S. Prediction of drying shrinkage beyond the pore isodeformation assumption. **Journal of Mechanics of Materials and Structures**, [S.l.]. v.4, n.2, p. 263-279, 2009.

DJERBI, et al. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v. 38, p. 877-883, 2008.

EGHTESADI, S. **The Influence of Defects in Concrete (Cracking and Consolidation) on Water Absorption and Electrical Conductivity**. 2014. Master of Applied Science - Civil Engineering, Concordia University Montréal, Québec, Canada, 2014.

FELDMAN, R. F. e SEREDA, P. J. A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. **Matériaux et Constructions**, [S.l.]. v.1, n.6, p. 509-520, 1968. Disponível em:

[http://download.springer.com/static/pdf/864/art%253A10.1007%252FBF02473639.pdf?auth66=1406219887\\_641b179efb0c5022cb6af54a762b0d1d&ext=.pdf](http://download.springer.com/static/pdf/864/art%253A10.1007%252FBF02473639.pdf?auth66=1406219887_641b179efb0c5022cb6af54a762b0d1d&ext=.pdf) Acesso em: 22/07/2014.

FELDMAN, R. F. e SEREDA, P. J. A new model for hydrated Portland cement and its practical implications. **Engineering Journal**, Ottawa. v. 53, p. 53-59, 1970.

FRANÇA, R. L. S. Fatores críticos de execução de obras e as consequências para as deformações de estruturas de concreto. In: 7o SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA DE ESTRUTURAS, 7. São Paulo. **Anais**. São Paulo, 2005. 44 p.

FREITAS, F. A. E. **Microfissuração e evolução da hidratação de concreto de cimento Portland, com e sem adição de escória, por meio da análise de imagens**. 2001. 185 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

GANI, M. S. J. **Cement and Concrete**. CRC Press, 1997, 224 p. Disponível em:

<http://www.ebay.com/ctg/Cement-and-Concrete-M-S-J-Gani-1997-Paperback-New-Edition-/2133576> Acesso: 08 de junho de 2014.

GARTNER, E.M. et al. Hydration of Portland cement. In: **Structure and Performance of Cements**, P. Barnes, J. Bensted (Eds.) 2nd Edition, Spon Press. New York, 2002, p. 57-113.

GAWIN, D. et al. Modeling creep and shrinkage of concrete by means of effective stresses. **Materials and Structures**. [S.l.]. v. 40, n.6, p. 579-591, 2007.

GRANGER, S. et al. Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis. **Cement and Concrete Research**. Oxford. v. 37, n. 4, p. 519-527, 2007.

HAMMER, T. A. **Deformations, strain capacity and cracking of concrete in plastic and early hardening phases**. 2007. 156 p. Doctoral Thesis - Department of Structural Engineering, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2007.

HANSEN, T. C. Physical structure of hardened cement paste. A classical approach. **Materials and Structures**, [S.l.]. v.19, p. 423-436, 1986.

HAOUAS, A. **Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires – Caractérisation et modélisation chimio-hydro-mécanique du retrait**. 2007. 204 p. Thèse de Doctorat. Laboratoire de Mécanique et Technologie, L'École Normal et Supérieure de Cachan, Cachan, 2007.

HEARN, N. Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference? **Materials and Structures**, [S.l.]. v. 31, p. 563-567, 1998.

HELENE, P. e TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle da resistência do concreto**. São Paulo, Editora PINI, 1992.

HOSEINI, M. et al. The effect of mechanical stress on permeability of concrete: A review. **Cement and Concrete Research**. Oxford. v.31, p. 213–220, 2009.

HOSODA, A. et al. Self-healing of longitudinal cracks in utility concrete pole. **Journal of Advanced Concrete Technology**. Materials, Structures and Environment, V.10, 2012, pp: 278-284.

HUA, X. **Self-healing of Engineered Cementitious Composites (ECC) in Concrete Repair System**. 2010. 45 p. Thesis (Master of Applied Science) – Delft, 2010.

HUANG, H. et al. New insights into autogenous self-healing in cement paste based on nuclear magnetic resonance (NMR) tests. **Materials and Structures**, 2015 DOI 10.1617/s11527-015-0664-9

HUO, X. S. e WONG, L. U. Experimental study of early-age behavior of high-performance concrete deck slabs under different curing methods. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. v. 20, n. 10, p. 1049-1056, 2006.

IDIART, A. E. **Coupled analysis of degradation processes in concrete specimens at the meso-level**. 2009. 213 p. Doctoral Thesis. Department of Geotechnical Engineering and Geosciences – Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009.

IGARASHI, S. et al. **Technical Committee on Self-healing/Repairing Technology in Cement-based Materials**. [Tokyo]: Japan Concrete Institute, 2011.

IGARASHI, S. et al. **Technical Committee on Autogenous Healing in Cementitious Materials**. [Tokyo]: Japan Concrete Institute, 2009.

ISHIKAWA, Y. **Basic Research on the self-healing functions of concrete mixed with fly ash**. 2013. p. 248-252. Disponível em:

<http://repository.tudelft.nl/islandora/search/BASIC%20RESEARCH%20ON%20THE%20SELFHEALING%20FUNCTIONS%20OF%20CONCRETE%20MIXED%20WITH%20FLY%20ASH?collection=research> Acesso em: 29/11/2016

JENSEN, O.M. e HANSEN, P.F. Water-entrained cement-based materialsI. Principles and theoretical background. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.31, p. 647–654, 2001.

JENNINGS, H.M. et al. Characterization and Modeling of Pores and Surfaces in Cement Paste: Correlations to Processing and Properties. **Journal of Advanced Concrete Technology**, [S.l.]. v. 6, n. 1, p. 5-29, 2008.

JENNINGS, H.M. e BULLARD, J.W. From electrons to infrastructure: Engineering concrete from the bottom up. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.41, p. 727–735, 2011.

KACIMI, L. et al. Synthesis of L-C2S cement from fly-ash using the hydrothermal method at low temperature and atmospheric pressure. **Journal of Hazardous Materials**, [S.l.]. v. 181, p. 593–601, 2010.

KANG, S.T. et al. Moisture diffusivity of early age concrete considering temperature and porosity. **Journal of Civil Engineering**, [S.l.]. v.16, p. 179-188, 2012.

KERMANI, A. Permeability of stressed concrete: Steady-state method of measuring permeability of hardened concrete studies in relation to the change in structure of concrete under various short-term stress levels. **Building research and Information**, [S.l.]. v.19, n. 6 p. 360-366, 1991.

KHAM, M. S. et al. **Control of Cracking in Concrete: State of the Art**. Washington: Transportation Research Board , 2006. 46 p. (Transportation Research Circular )

KHOKHAR, M. I. A. **Optimisation of concrete mix design with content of mineral additions: effect on microstructure, hydration and shrinkage**. 2010. 228 p. Thèse de

Doctorat em Cotutelle, l'Ecole Centrale de Nantes et par L'Université Libre de Bruxelles. Nantes, Nantes, 2010.

KIVRAC, S. et al. An economic perspective of advantages of using lightweight concrete in construction. In: CONFERENCE ON OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, 31., 16-17 August 2006, Singapore **Proceedings**... Singapore, 2006. Disponível em:

<http://cipremier.com/100031028>. Acesso em: 15 de julho de 2014.

KIM, J.K e LEE, C.S. Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.29, p. 1921-1927, 1999.

KOVLER, K. e van BREUGEL, K. Foreword In: **RILEM Technical Committee 221-SHC**, Springer, 2013, 266 p.

KURDOWSKI, W. Hydration of Clinker Phases. In: **Cement and Concrete Chemistry**. 2014. 368 p.

KURTIS, K. **Structure of Hydrated Cement Paste**. Disponível em:

<http://www.ce.gatech.edu/~kkurtis/grad/structure.pdf>. Acesso em: 08 de junho de 2014.

LAM, H. **Effects of internal curing methods on restrained shrinkage and permeability**. 2005. Thesis (Master of Applied Science) – Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, 2005.

LEE, B.J. et al. Chloride permeability of damaged high-performance fiber-reinforced cement composite by repeated compressive loads. **Materials**, [S.l.]. v.7, p. 5802-5815, 2014.

LI, V. C. et al. Recovery against Mechanical Actions. In: **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials. Volume 11 de RILEM State-of-the-Art Reports. Ed: Springer Science & Business Media, 2013, p. 119-208.

LI, V. C. e YANG, E. H. Introduction. In: **Self Healing Materials**. An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science S., Ed: van der Zwaag, 2007, p. 161–193.

LIM, C. C et al. Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression, **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 353-360, 2000.

LORENZI, A. et al. Utilização de ultra-som para o monitoramento de estruturas de concreto. PANNDT, Rio de Janeiro, 02-06 junho, 2003. Disponível em:

<http://www.aende.org.ar/ingles/sitio/biblioteca/material/t-020.pdf>. Acesso em: 15/02/2017.

LOOTENS, D. e BENTZ, D.P. On the relation of setting and early-age strength development to porosity and hydration in cement-based materials. **Cement and Concrete Composites**, doi: 10.1016/j.cemconcomp.201602.010

LV, Z. e CHEN, D. Self-healing efficiency of unhydrated cement nuclei for dome-like crack mode in cementitious materials. **Materials and Structures**, [S.l.]. v.46, n.11, p.1881-1892, 2013.

LV, Z. e CHEN, D. Overview of recent work on self-healing in cementitious materials. **Materiales de Construcción**, [S.l.]. v. 64, n.316, 2014, e 034 ISSN-L: 0465-2746 <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.05313>

LV, Z. e CHEN, D. Self-healing efficiency of unhydrated cement nuclei for dome-like crack mode in cementitious materials. **Materials and Structures**, v.46, n.11, p.1881-1892, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Editora IBRACON, 2014. 674 p.

MOKAREN, D. W. **Development of concrete shrinkage performance specifications**. 2002. 225 p. Doctoral Thesis - Civil and Environment Engineering, Faculty of the Virginia, Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2002.

MOUNANGA, P. et al. Predicting Ca(OH)<sub>2</sub> content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.34, p. 255-265, 2004.

NA, SEUNG-HYUN **Experimental investigation on self-healing performance of cementitious composite incorporating fly ash and ground granulated blast furnace slag**. PhD-thesis. Muroran Institute of Technology, Japan, 119 p, 2013.

NEHDI, M.; SOLIMAN, A. M. Early-age properties of concrete: overview of fundamental concepts and state-of-the-art research. **Construction Materials**, [S.l.]. v. 164, p. 57 – 77, 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo, 2<sup>a</sup> ed., Pini, 1997. 738 p.

NISHIWAKI, T. et al. Self-Healing Capability of Fiber-Reinforced Cementitious Composites for Recovery of Watertightness and Mechanical Properties. **Materials**, [S.l.]. v.7, p. 2141-2154, 2014.

NUNES, N. L. e FIGUEIREDO, A. D. **Retração do concreto de cimento Portland. BT/PCC/452.** São Paulo: EPUSP, 2007.

PANE, I. e HANSEN, W. Early-age creep and stress relaxation of concrete containing blended cements. **Materials and Structures Journal**, [S.l.]. v. 35, n. 2, p. 92-96, 2002.

PAULON, V. e KIRCHHEIM, A.P. Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia.** IBRACON, 2011. 931 p.

PERTUÉ, A. **Étude expérimentale e du retrait endogene, du fluage propre et de la fissuration des matrices cimentaires aux jeune et très jeune ages.** 2008. 205 p. Thèse (Doctorat) - Ecole Doctorale pour l'Ingenieur, Geologie et Architecture, Nantes, France, 2005.

PICANDET, V. Crack effects on gas and water permeability of concretes. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v. 39, p. 537–547, 2009.

PROMENTILLA, M.A.B. et al. Quantification of tortuosity in hardened cement pastes using synchrotron-based X-ray computed microtomography. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.39, n.6, p. 548-557, 2009.

PROMENTILLA, M.A.B. e SUGIYAMA, T. Studies on 3D micro-geometry and diffusion tortuosity of cement-based materials using X-ray microtomography. In: CONFERENCE ON OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, 32., 28-29 August 2007, Singapore, **Anais...**, Singapore, 2007. 29 p.

PUSTOVGAR, E. et al. Understanding silicate hydration from quantitative analyses of hydrating tricalcium silicates. **Nature Communications**, New York v. 7, 2016. DOI:10.1038/ncomms10952

RANGEL, G. W. A. **Determinação da resistência à tração do concreto por compressão diametral e flexão.** Seminário da disciplina de Microestrutura e Dosagem de Concreto, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, 2011, 50 p.

RAPOPORT, J. et al. Permeability of Cracked Steel Fiber-Reinforced Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.l.]. v. 14, p.355-358, 2002.

RIAZ, M. R. et al., **Hydration of Cement**, 2011. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/rizwansamor/hydration-of-cement>. Acesso em: 23/06/2014.

RIBEIRO, J. L. D e ten CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. 2000. 126 p. Série Monográfica Qualidade. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

REINHARDT, H-W e JOOSS, M. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.33, p. 981 – 985, 2003.

RODRIGUES, G. S. S. **Contribuição ao estudo da retração e da fluência e seus mecanismos de atuação a baixas idades em concretos estruturais**. 2010. 222 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2010.

ROOJI, M. R. et al. Self-Healing Phenomena. In: **RILEM Technical Committee 221-SHC**, [S.l.]. Springer, 2013, 266 p.

SA, C. de et al. Analisis of microcracking induced by differential drying shrinkage, **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.30, p. 947–956, 2008.

SAKATA, k. A study on moisture diffusion in drying and drying shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**. Oxford. v.13, p. 216–224, 1983.

SALVADOR, P. F. **Influência dos ciclos de execução nas deformações das estruturas de concreto armado de edifícios de andares múltiplos**. 2007. 141 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SCRIVENER, K. The Microstructure of Concrete. Imperial College. **Materials Science of Concrete**, [S.l.]. 1989, p.127-161.

SCRIVENER, K. et al. Advances in understanding hydration of Portland cement Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**. Oxford. v.78, p. 38–56, 2015.

SCRIVENER, K. Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and Concrete Research**. Oxford. v.41, n. 7, p. 6518–665, 2011.

SHIM, K. B. Cementitious materials for crack self-healing concrete, **Journal of Ceramic Processing Research**. [S.l.]. v. 16, Special. 1, p. 1-13, 2015.



SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. 2007. 357 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SILVOSO, M. M. **Otimização da fase construtiva de estruturas de concreto em face dos efeitos da hidratação via algoritmos genéticos**. 2003. 169 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SOBOLEV, K. e SHAH, S. P. In: NANOTECHNOLOGY IN CONSTRUCTION MATERIALS, 5., 2015. **Proceedings.....**, 2015, p. 3-13.

SOUZA, L. M. S. **Estudo de hidratação e nanoindentação de pastas de cinza da casca de arroz e cinza de arroz e cinza do bagaço de cana-de-açúcar com hidróxido de cálcio**. 2011. 122 p. Dissertação (Mestrado) - Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

STEFAN, L. **Étude expérimentale et modélisation de l'évolution des propriétés mécaniques au jeune age dans les matériaux cimentaires**. 2009. 274 p. Thèse (Doctorat). Centre de Recherche sur Le Infrastructures, Béton Département de Génie Civil, Université Laval, Québec, Canada, 2009.

STARK, J. Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.41, p. 666 – 678, 2011.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. London: Academic Press Limited, 1997. 475 p.

TALAEKHOZAN, A. et al. A Review of Self-healing. Concrete Research Development. **Journal of Environmental Treatment Techniques**. [S.l.]. v.2, n.1, p.1-11, 2014.

TER HEIDE, N. **Crack healing in hydrating concrete**. 2005. Thesis (Master of Applied Science) - Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Microlab, Delft, 2005.

TER HEIDE, N. e SCHLANGEN, E. Self-healing of early age in concrete. In: THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON SELF-HEALING MATERIALS, 1., 2007, Noordwijk aan Zee. **Proceedings...** 2007, The Netherlands, 2007.

THAKUR, A. et al. Bacterial concrete and effect of different bacteria on the strength and water absorption characteristics of concrete: A review. **International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)** v.7, n. 5, p. 43–56, 2016.

THOMAS, J. J. et al. Structural changes to the calcium-silicate-hydrate gel phase of hydrated cement with age, drying, and resaturation. **Journal of American Ceramic Society**, p. 3362–3369, 2008.

THOMAS, J. J. et al. State of Water in Hydrating Tricalcium Silicate and Portland Cement Pastes as Measured by Quasi-Elastic Neutron Scattering. **Journal of American Ceramic Society**, [S.l.]. v.84, n. 8, p. 1811–1816, 2001.

THOMAZ, E. C.S. **Hidratação do Cimento Portland** - Microscopia Eletrônica Ambiental. Notas de Aula. Disponível em:

[http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos\\_concretos/hidratacao\\_csh.pdf](http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/hidratacao_csh.pdf) Acesso em: 23/06/2014.

TOPLICIC-CURCIC, G. et al. Aggregate type impact on water permeability of Concrete. **Romanian Journal of Materials**, [S.l.]. v.42, n.2, p. 134-142, 2012.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Control of cracking in concrete, State of the art, **Transportation Research Circular**, N. E-C107, 46 p. 2006.

VENQUIARUTO, S. D. **Estudo da influência da microfissuração causada por carregamento precoce na durabilidade de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. 2006. Proposta de tese (Qualificação) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

VIEIRA, G. L. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. 2008. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

VIEIRA, G. L. e DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação da resistência à compressão, resistência à tração e formação de microfissuras em concretos produzidos com diferentes tipos de cimentos, quando aplicado um pré-carregamento de compressão. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 1, p. 25-40, 2011.

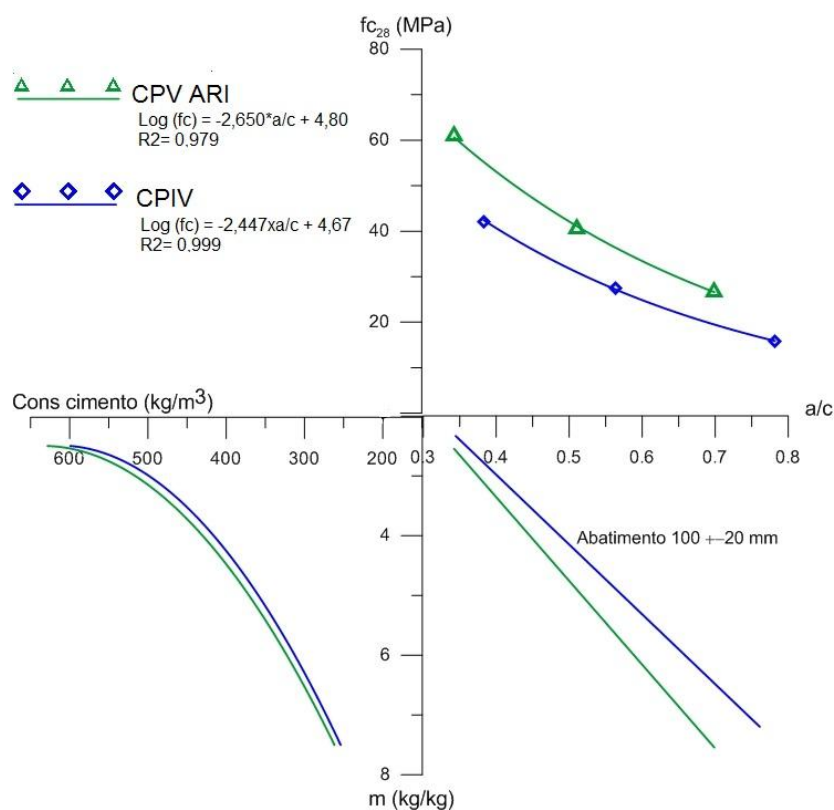
WADE, S. A. et al. Effect of Temperature on the Setting Behavior of Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.l.]. v. 22, p 214-222, 2010.

- WEBB, P.A. **Volume and density determinations for particle technologists**. Norcross: Micromeritics Instrument Corp., 2001. 16p.
- WITTMANN, F.H. On the action of capillary pressure in fresh concrete. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.6, p. 49–76, 1976.
- WITTMANN, F.H. **Shrinkage Mechanisms and Durability. Sustainable Infrastructure System Group Centre of Excellence (COE) Program. Intensive Course**. Hohhaido University, Sapporo, Japan. Aedificat Intitute Freiburg. 2004. 41 p.
- WITTMANN et al. Shrinkage mechanisms, crack formation and service life of reinforced concrete structures. **Structural Engineering**, [S.l.]. v.1, p. 13-28, 2009.
- WITTMANN, F.H. e ROELFSTRA, P.E. Total deformation of loaded drying concrete. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.10, p. 601–610, 1980.
- WU, M. et al. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.28, p. 571–583, 2012.
- XI, Y. e BAŽANT, Z.P. Improved pore water diffusion model for creep analysis of concrete structures. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON CREEP AND SHRINKAGE OF CONCRETE, 5., 1993, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona, 1993, p.169-174.
- XI, Y et al. Moisture diffusion in cementitious materials. **Advanced Cement Based Materials**, v.1, p. 258-266, 1994.
- YAMAKAWA, M. **Chloride permeability of distressed concrete**. 2008. 50p. Thesis (Master of Applied Science) – Department of Civil, Environmental and Architecture Engineering, University of Colorado, 2008.
- YANG, Y. et al. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v. 39, p. 382–390, 2009.
- ZHANG, Y. et al. Pore structure of blended cement paste by means of pressurization-depressurization cycling mercury intrusion porosimetry. In: THE INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGEING OF MATERIALS AND STRUTURES, 2014, Delf. **Proceedings...** The Netherlands, 2014, 8p.
- ZHONG, W. e YAO, W. Influence of damage degree on self-healing of concrete. **Construction and Building Materials**. [S.l.]. v.22, p.1137–1142, 2008.

## APÊNDICE A – DIAGRAMA DE DOSAGEM DOS CONCRETOS

### ETAPA 1

Figura A1 – Diagrama de dosagem dos concretos com os cimentos CP V ARI e CP IV, utilizados na ETAPA 1 do programa experimental



*Observação:* Para o cimento CP V ARI, o ponto correspondente à relação a/c 0,70 ficou situado fora da curva de dosagem, o mesmo ocorrendo para o cimento CP IV com a relação a/c. Contudo, decidiu-se adotar os valores extrapolados e manter os traços calculados, considerando-se que tais diferenças não trariam prejuízos quanto aos resultados obtidos.

## APÊNDICE B – RESULTADOS DAS DEFORMAÇÕES DEVIDAS À RETRAÇÃO POR SECAGEM

Tabela B1 – Deformações devidas à retração por secagem, CP V ARI, cura 28 dias, a/c=0,35.

Tabela B2 – Deformações devidas à retração por secagem, CP V ARI, cura 28 dias, a/c=0,50.

Tabela B3 – Deformações devidas à retração por secagem, CP V ARI, cura 28 dias, a/c=0,70.

Tabela B4 – Deformações devidas à retração por secagem, CP V ARI, cura 7 dias, a/c=0,35.

Tabela B5 – Deformações devidas à retração por secagem, CP V ARI, cura 7 dias, a/c=0,50.

Tabela B6 – Resultados de retração por secagem, cimento CP V ARI, cura 7 dias, a/c=0,70.

Tabela B7 – Deformações devidas à retração por secagem, CP IV RS, cura 28 dias, a/c=0,35.

Tabela B8 – Deformações devidas à retração por secagem, CP IV RS, cura 28 dias, a/c=0,50.

Tabela B9 – Deformações devidas à retração por secagem, CP IV RS, cura 28 dias, a/c=0,70.

Tabela B10 – Resultados de retração por secagem, cimento CP IV, cura 7 dias, a/c=0,35.

Tabela B11 – Resultados de retração por secagem, cimento CP IV, cura 7 dias, a/c=0,50.

Tabela B12 – Resultados de retração por secagem, cimento CP IV, cura 7 dias, a/c=0,70.

**OBSERVAÇÃO:** Nas planilhas, os valores de  $\epsilon_{\text{sec}} (10^{-6})$  que aparecem destacados correspondem à média dos valores dos outros dois corpos de prova.

Tabela B1 – Deformações devidas à retração por secagem, CP V ARI, cura 28 dias, a/c=0,35.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/35/Ref - I	4	0	1	-71,478
V/35/Ref - I	8	0	1	-345,478
V/35/Ref - I	16	0	1	-405,043
V/35/Ref - I	32	0	1	-450,048
V/35/Ref - I	64	0	1	-540,058
V/35/Ref - II	4	0	1	-63,756
V/35/Ref - II	8	0	1	-306,824
V/35/Ref - II	16	0	1	-458,244
V/35/Ref - II	32	0	1	-496,763
V/35/Ref - II	64	0	1	-573,801
V/35/Ref - III	4	0	1	119,366
V/35/Ref - III	8	0	1	-39,789
V/35/Ref - III	16	0	1	-67,641
V/35/Ref - III	32	0	1	-473,406
V/35/Ref - III	64	0	1	-556,929
V/35/Ref - I	4	0	3	-71,478
V/35/Ref - I	8	0	3	-345,478
V/35/Ref - I	16	0	3	-405,043
V/35/Ref - I	32	0	3	-450,048
V/35/Ref - I	64	0	3	-540,058
V/35/Ref - II	4	0	3	-63,756
V/35/Ref - II	8	0	3	-306,824
V/35/Ref - II	16	0	3	-458,244
V/35/Ref - II	32	0	3	-496,763
V/35/Ref - II	64	0	3	-573,801
V/35/Ref - III	4	0	3	119,366
V/35/Ref - III	8	0	3	-39,789
V/35/Ref - III	16	0	3	-67,641
V/35/Ref - III	32	0	3	-473,406
V/35/Ref - III	64	0	3	-556,929
V/35/Ref - I	4	0	7	-71,478
V/35/Ref - I	8	0	7	-345,478
V/35/Ref - I	16	0	7	-405,043
V/35/Ref - I	32	0	7	-450,048
V/35/Ref - I	64	0	7	-540,058

				Cont.
Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
V/35/Ref - II	4	0	7	-63,756
V/35/Ref - II	8	0	7	-306,824
V/35/Ref - II	16	0	7	-458,244
V/35/Ref - II	32	0	7	-496,763
V/35/Ref - II	64	0	7	-573,801
V/35/Ref - III	4	0	7	119,366
V/35/Ref - III	8	0	7	-39,789
V/35/Ref - III	16	0	7	-67,641
V/35/Ref - III	32	0	7	-473,406
V/35/Ref - III	64	0	7	-556,929
V/35/25/1d - I	4	25	1	96,310
V/35/25/1d - I	8	25	1	-94,970
V/35/25/1d - I	16	25	1	-320,410
V/35/25/1d - I	32	25	1	-454,663
V/35/25/1d - I	64	25	1	-398,827
V/35/25/1d - II	4	25	1	170,414
V/35/25/1d - II	8	25	1	43,594
V/35/25/1d - II	16	25	1	-158,524
V/35/25/1d - II	32	25	1	-463,684
V/35/25/1d - II	64	25	1	-479,536
V/35/25/1d - III	4	25	1	-107,372
V/35/25/1d - III	8	25	1	-270,419
V/35/25/1d - III	16	25	1	-489,140
V/35/25/1d - III	32	25	1	-544,814
V/35/25/1d - III	64	25	1	-604,465
V/35/25/3d - I	4	25	3	127,221
V/35/25/3d - I	8	25	3	-63,611
V/35/25/3d - I	16	25	3	-155,051
V/35/25/3d - I	32	25	3	-337,932
V/35/25/3d - I	64	25	3	-545,901
V/35/25/3d - II	4	25	3	296,685
V/35/25/3d - II	8	25	3	137,135
V/35/25/3d - II	16	25	3	-181,967
V/35/25/3d - II	32	25	3	-359,978
V/35/25/3d - II	64	25	3	-545,901
V/35/25/3d - III	4	25	3	211,953
V/35/25/3d - III	8	25	3	36,762
V/35/25/3d - III	16	25	3	-168,509
V/35/25/3d - III	32	25	3	-348,955
V/35/25/3d - III	64	25	3	-545,901

				Cont.
Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/35/25/7d - I	4	25	7	264,952
V/35/25/7d - I	8	25	7	-215,061
V/35/25/7d - I	16	25	7	-221,048
V/35/25/7d - I	32	25	7	-284,791
V/35/25/7d - I	64	25	7	-189,182
V/35/25/7d - II	4	25	7	462,205
V/35/25/7d - II	8	25	7	-67,737
V/35/25/7d - II	16	25	7	-115,551
V/35/25/7d - II	32	25	7	-211,180
V/35/25/7d - II	64	25	7	-87,660
V/35/25/7d - III	4	25	7	67,698
V/35/25/7d - III	8	25	7	-362,385
V/35/25/7d - III	16	25	7	-326,545
V/35/25/7d - III	32	25	7	-358,403
V/35/25/7d - III	64	25	7	-290,705
V/35/50/1d - I	4	50	1	80,233
V/35/50/1d - I	8	50	1	-473,377
V/35/50/1d - I	16	50	1	-393,143
V/35/50/1d - I	32	50	1	-417,213
V/35/50/1d - I	64	50	1	-321,379
V/35/50/1d - II	4	50	1	-12,768
V/35/50/1d - II	8	50	1	-425,854
V/35/50/1d - II	16	50	1	-345,057
V/35/50/1d - II	32	50	1	-428,283
V/35/50/1d - II	64	50	1	-321,379
V/35/50/1d - III	4	50	1	-105,770
V/35/50/1d - III	8	50	1	-378,332
V/35/50/1d - III	16	50	1	-296,970
V/35/50/1d - III	32	50	1	-439,353
V/35/50/1d - III	64	50	1	-321,379
V/35/50/3d - I	4	50	3	309,668
V/35/50/3d - I	8	50	3	-79,402
V/35/50/3d - I	16	50	3	-190,565
V/35/50/3d - I	32	50	3	-250,116
V/35/50/3d - I	64	50	3	-277,907
V/35/50/3d - II	4	50	3	262,188
V/35/50/3d - II	8	50	3	-43,677
V/35/50/3d - II	16	50	3	-158,900
V/35/50/3d - II	32	50	3	-268,198
V/35/50/3d - II	64	50	3	-297,997



				Cont.
Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
V/35/50/3d - III	4	50	3	214,709
V/35/50/3d - III	8	50	3	-7,952
V/35/50/3d - III	16	50	3	-127,235
V/35/50/3d - III	32	50	3	-286,279
V/35/50/3d - III	64	50	3	-318,088
V/35/50/7d - I	4	50	7	19,821
V/35/50/7d - I	8	50	7	-233,886
V/35/50/7d - I	16	50	7	-317,133
V/35/50/7d - I	32	50	7	-289,384
V/35/50/7d - I	64	50	7	-396,416
V/35/50/7d - II	4	50	7	-32,562
V/35/50/7d - II	8	50	7	-280,846
V/35/50/7d - II	16	50	7	-256,425
V/35/50/7d - II	32	50	7	-219,793
V/35/50/7d - II	64	50	7	-284,917
V/35/50/7d - III	4	50	7	-6,371
V/35/50/7d - III	8	50	7	-257,366
V/35/50/7d - III	16	50	7	-286,779
V/35/50/7d - III	32	50	7	-254,588
V/35/50/7d - III	64	50	7	-340,666
V/35/75/1d - I	4	75	1	115,287
V/35/75/1d - I	8	75	1	-469,097
V/35/75/1d - I	16	75	1	-512,827
V/35/75/1d - I	32	75	1	-616,187
V/35/75/1d - I	64	75	1	-508,851
V/35/75/1d - II	4	75	1	71,409
V/35/75/1d - II	8	75	1	-317,375
V/35/75/1d - II	16	75	1	-420,521
V/35/75/1d - II	32	75	1	-547,471
V/35/75/1d - II	64	75	1	-428,456
V/35/75/1d - III	4	75	1	-35,799
V/35/75/1d - III	8	75	1	-357,991
V/35/75/1d - III	16	75	1	-334,125
V/35/75/1d - III	32	75	1	-469,366
V/35/75/1d - III	64	75	1	-453,455
V/35/75/3d - I	4	75	3	139,975
V/35/75/3d - I	8	75	3	-219,960
V/35/75/3d - I	16	75	3	-267,952
V/35/75/3d - I	32	75	3	-457,118
V/35/75/3d - I	64	75	3	-455,918

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/35/75/3d - II	4	75	3	148,573
V/35/75/3d - II	8	75	3	-4,015
V/35/75/3d - II	16	75	3	-365,410
V/35/75/3d - II	32	75	3	-389,503
V/35/75/3d - II	64	75	3	-455,918
V/35/75/3d - III	4	75	3	144,274
V/35/75/3d - III	8	75	3	-111,988
V/35/75/3d - III	16	75	3	-316,681
V/35/75/3d - III	32	75	3	-423,311
V/35/75/3d - III	64	75	3	-455,918
V/35/75/7d - I	4	75	7	176,974
V/35/75/7d - I	8	75	7	-583,210
V/35/75/7d - I	16	75	7	-663,653
V/35/75/7d - I	32	75	7	-559,077
V/35/75/7d - I	64	75	7	-332,505
V/35/75/7d - II	4	75	7	147,863
V/35/75/7d - II	8	75	7	-293,584
V/35/75/7d - II	16	75	7	-409,015
V/35/75/7d - II	32	75	7	-433,916
V/35/75/7d - II	64	75	7	-332,505
V/35/75/7d - III	4	75	7	118,752
V/35/75/7d - III	8	75	7	-3,958
V/35/75/7d - III	16	75	7	-154,377
V/35/75/7d - III	32	75	7	-308,754
V/35/75/7d - III	64	75	7	-332,505

Tabela B2 – Deformações devidas à retração por secagem, CP V ARI, cura 28 dias, a/c=0,50.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/50/Ref - I	4	0	1	275,460
V/50/Ref - I	8	0	1	-299,765
V/50/Ref - I	16	0	1	-384,834
V/50/Ref - I	32	0	1	-644,090
V/50/Ref - I	64	0	1	-725,107
V/50/Ref - II	4	0	1	106,062
V/50/Ref - II	8	0	1	-228,442
V/50/Ref - II	16	0	1	-424,249
V/50/Ref - II	32	0	1	-669,008
V/50/Ref - II	64	0	1	-844,419
V/50/Ref - III	4	0	1	179,874
V/50/Ref - III	8	0	1	-183,963
V/50/Ref - III	16	0	1	-286,164
V/50/Ref - III	32	0	1	-498,743
V/50/Ref - III	64	0	1	-666,353
V/50/Ref - I	4	0	3	275,460
V/50/Ref - I	8	0	3	-299,765
V/50/Ref - I	16	0	3	-384,834
V/50/Ref - I	32	0	3	-644,090
V/50/Ref - I	64	0	3	-725,107
V/50/Ref - II	4	0	3	106,062
V/50/Ref - II	8	0	3	-228,442
V/50/Ref - II	16	0	3	-424,249
V/50/Ref - II	32	0	3	-669,008
V/50/Ref - II	64	0	3	-844,419
V/50/Ref - III	4	0	3	179,874
V/50/Ref - III	8	0	3	-183,963
V/50/Ref - III	16	0	3	-286,164
V/50/Ref - III	32	0	3	-498,743
V/50/Ref - III	64	0	3	-666,353
V/50/Ref - I	4	0	7	275,460
V/50/Ref - I	8	0	7	-299,765
V/50/Ref - I	16	0	7	-384,834
V/50/Ref - I	32	0	7	-644,090
V/50/Ref - I	64	0	7	-725,107
V/50/Ref - II	4	0	7	106,062
V/50/Ref - II	8	0	7	-228,442
V/50/Ref - II	16	0	7	-424,249
V/50/Ref - II	32	0	7	-669,008
V/50/Ref - II	64	0	7	-844,419

				Cont.
Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
V/50/Ref - III	4	0	7	179,874
V/50/Ref - III	8	0	7	-183,963
V/50/Ref - III	16	0	7	-286,164
V/50/Ref - III	32	0	7	-498,743
V/50/Ref - III	64	0	7	-666,353
V/50/25/1d - I	4	25	1	145,954
V/50/25/1d - I	8	25	1	-267,582
V/50/25/1d - I	16	25	1	-381,102
V/50/25/1d - I	32	25	1	-445,971
V/50/25/1d - I	64	25	1	-527,056
V/50/25/1d - II	4	25	1	39,273
V/50/25/1d - II	8	25	1	-244,817
V/50/25/1d - II	16	25	1	-337,264
V/50/25/1d - II	32	25	1	-397,454
V/50/25/1d - II	64	25	1	-479,632
V/50/25/1d - III	4	25	1	-67,408
V/50/25/1d - III	8	25	1	-222,051
V/50/25/1d - III	16	25	1	-293,425
V/50/25/1d - III	32	25	1	-348,938
V/50/25/1d - III	64	25	1	-432,207
V/50/25/3d - I	4	25	3	23,926
V/50/25/3d - I	8	25	3	-334,967
V/50/25/3d - I	16	25	3	-332,308
V/50/25/3d - I	32	25	3	-326,992
V/50/25/3d - I	64	25	3	-378,832
V/50/25/3d - II	4	25	3	-214,371
V/50/25/3d - II	8	25	3	-369,194
V/50/25/3d - II	16	25	3	-412,862
V/50/25/3d - II	32	25	3	-500,198
V/50/25/3d - II	64	25	3	-456,530
V/50/25/3d - III	4	25	3	253,365
V/50/25/3d - III	8	25	3	-237,530
V/50/25/3d - III	16	25	3	-372,130
V/50/25/3d - III	32	25	3	-506,730
V/50/25/3d - III	64	25	3	-498,812
V/50/25/7d - I	4	25	7	146,563
V/50/25/7d - I	8	25	7	-312,932
V/50/25/7d - I	16	25	7	-359,146
V/50/25/7d - I	32	25	7	-451,573
V/50/25/7d - I	64	25	7	-522,874

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/50/25/7d - II	4	25	7	218,074
V/50/25/7d - II	8	25	7	-222,039
V/50/25/7d - II	16	25	7	-257,724
V/50/25/7d - II	32	25	7	-329,093
V/50/25/7d - II	64	25	7	-364,778
V/50/25/7d - III	4	25	7	297,391
V/50/25/7d - III	8	25	7	-348,939
V/50/25/7d - III	16	25	7	-362,156
V/50/25/7d - III	32	25	7	-388,591
V/50/25/7d - III	64	25	7	-499,617
V/50/50/1d - I	4	50	1	281,308
V/50/50/1d - I	8	50	1	-309,043
V/50/50/1d - I	16	50	1	-360,550
V/50/50/1d - I	32	50	1	-463,565
V/50/50/1d - I	64	50	1	-408,095
V/50/50/1d - II	4	50	1	281,308
V/50/50/1d - II	8	50	1	-309,043
V/50/50/1d - II	16	50	1	-360,550
V/50/50/1d - II	32	50	1	-463,565
V/50/50/1d - II	64	50	1	-408,095
V/50/50/1d - III	4	50	1	15,805
V/50/50/1d - III	8	50	1	-403,023
V/50/50/1d - III	16	50	1	-412,243
V/50/50/1d - III	32	50	1	-430,682
V/50/50/1d - III	64	50	1	-422,780
V/50/50/3d - I	4	50	3	-102,824
V/50/50/3d - I	8	50	3	-249,150
V/50/50/3d - I	16	50	3	-486,435
V/50/50/3d - I	32	50	3	-482,480
V/50/50/3d - I	64	50	3	-537,847
V/50/50/3d - II	4	50	3	-48,909
V/50/50/3d - II	8	50	3	-479,837
V/50/50/3d - II	16	50	3	-543,286
V/50/50/3d - II	32	50	3	-551,218
V/50/50/3d - II	64	50	3	-658,289
V/50/50/3d - III	4	50	3	-249,317
V/50/50/3d - III	8	50	3	-225,573
V/50/50/3d - III	16	50	3	-391,784
V/50/50/3d - III	32	50	3	-419,486
V/50/50/3d - III	64	50	3	-466,975

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
V/50/50/7d - I	4	50	7	112,011
V/50/50/7d - I	8	50	7	-272,027
V/50/50/7d - I	16	50	7	-456,046
V/50/50/7d - I	32	50	7	-580,058
V/50/50/7d - I	64	50	7	-532,053
V/50/50/7d - II	4	50	7	195,121
V/50/50/7d - II	8	50	7	-135,390
V/50/50/7d - II	16	50	7	-299,451
V/50/50/7d - II	32	50	7	-370,332
V/50/50/7d - II	64	50	7	-418,117
V/50/50/7d - III	4	50	7	336,000
V/50/50/7d - III	8	50	7	-130,447
V/50/50/7d - III	16	50	7	-395,294
V/50/50/7d - III	32	50	7	-490,165
V/50/50/7d - III	64	50	7	-612,706
V/50/75/1d - I	4	75	1	75,323
V/50/75/1d - I	8	75	1	-202,182
V/50/75/1d - I	16	75	1	-278,826
V/50/75/1d - I	32	75	1	-432,114
V/50/75/1d - I	64	75	1	-424,186
V/50/75/1d - II	4	75	1	103,197
V/50/75/1d - II	8	75	1	-374,936
V/50/75/1d - II	16	75	1	-378,921
V/50/75/1d - II	32	75	1	-386,889
V/50/75/1d - II	64	75	1	-494,469
V/50/75/1d - III	4	75	1	89,260
V/50/75/1d - III	8	75	1	-288,559
V/50/75/1d - III	16	75	1	-328,873
V/50/75/1d - III	32	75	1	-409,502
V/50/75/1d - III	64	75	1	-459,328
V/50/75/3d - I	4	75	3	-280,702
V/50/75/3d - I	8	75	3	-474,239
V/50/75/3d - I	16	75	3	-511,823
V/50/75/3d - I	32	75	3	-555,344
V/50/75/3d - I	64	75	3	-553,367
V/50/75/3d - II	4	75	3	-280,702
V/50/75/3d - II	8	75	3	-494,194
V/50/75/3d - II	16	75	3	-494,194
V/50/75/3d - II	32	75	3	-683,965
V/50/75/3d - II	64	75	3	-680,011

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/50/75/3d - III	4	75	3	-640,083
V/50/75/3d - III	8	75	3	-458,331
V/50/75/3d - III	16	75	3	-529,452
V/50/75/3d - III	32	75	3	-425,800
V/50/75/3d - III	64	75	3	-426,722
V/50/75/7d - I	4	75	7	119,141
V/50/75/7d - I	8	75	7	-297,853
V/50/75/7d - I	16	75	7	-516,279
V/50/75/7d - I	32	75	7	-428,908
V/50/75/7d - I	64	75	7	-413,023
V/50/75/7d - II	4	75	7	103,378
V/50/75/7d - II	8	75	7	-330,013
V/50/75/7d - II	16	75	7	-504,960
V/50/75/7d - II	32	75	7	-524,840
V/50/75/7d - II	64	75	7	-548,697
V/50/75/7d - III	4	75	7	123,222
V/50/75/7d - III	8	75	7	-385,565
V/50/75/7d - III	16	75	7	-556,485
V/50/75/7d - III	32	75	7	-555,360
V/50/75/7d - III	64	75	7	-663,807

Tabela B3 – Deformações devidas à retração por secagem, CP V ARI, cura 28 dias, a/c=0,70.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/70/Ref - I	4	0	1	178,640
V/70/Ref - I	8	0	1	-257,593
V/70/Ref - I	16	0	1	-468,930
V/70/Ref - I	32	0	1	-756,030
V/70/Ref - I	64	0	1	-859,705
V/70/Ref - II	4	0	1	60,027
V/70/Ref - II	8	0	1	-205,426
V/70/Ref - II	16	0	1	-736,333
V/70/Ref - II	32	0	1	-836,378
V/70/Ref - II	64	0	1	-972,840
V/70/Ref - III	4	0	1	119,334
V/70/Ref - III	8	0	1	-231,509
V/70/Ref - III	16	0	1	-602,632
V/70/Ref - III	32	0	1	-796,204
V/70/Ref - III	64	0	1	-916,273
V/70/Ref - I	4	0	3	178,640
V/70/Ref - I	8	0	3	-257,593
V/70/Ref - I	16	0	3	-468,930
V/70/Ref - I	32	0	3	-756,030
V/70/Ref - I	64	0	3	-859,705
V/70/Ref - II	4	0	3	60,027
V/70/Ref - II	8	0	3	-205,426
V/70/Ref - II	16	0	3	-736,333
V/70/Ref - II	32	0	3	-836,378
V/70/Ref - II	64	0	3	-972,840
V/70/Ref - III	4	0	3	119,334
V/70/Ref - III	8	0	3	-231,509
V/70/Ref - III	16	0	3	-602,632
V/70/Ref - III	32	0	3	-796,204
V/70/Ref - III	64	0	3	-916,273
V/70/Ref - I	4	0	7	178,640
V/70/Ref - I	8	0	7	-257,593
V/70/Ref - I	16	0	7	-468,930
V/70/Ref - I	32	0	7	-756,030
V/70/Ref - I	64	0	7	-859,705
V/70/Ref - II	4	0	7	60,027
V/70/Ref - II	8	0	7	-205,426
V/70/Ref - II	16	0	7	-736,333
V/70/Ref - II	32	0	7	-836,378
V/70/Ref - II	64	0	7	-972,840



				Cont.
Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
V/70/Ref - III	4	0	7	119,334
V/70/Ref - III	8	0	7	-231,509
V/70/Ref - III	16	0	7	-602,632
V/70/Ref - III	32	0	7	-796,204
V/70/Ref - III	64	0	7	-916,273
V/70/25/1d - I	4	25	1	212,096
V/70/25/1d - I	8	25	1	-48,022
V/70/25/1d - I	16	25	1	-200,090
V/70/25/1d - I	32	25	1	-364,165
V/70/25/1d - I	64	25	1	-652,295
V/70/25/1d - II	4	25	1	135,912
V/70/25/1d - II	8	25	1	-123,920
V/70/25/1d - II	16	25	1	-551,643
V/70/25/1d - II	32	25	1	-571,630
V/70/25/1d - II	64	25	1	-639,586
V/70/25/1d - III	4	25	1	251,938
V/70/25/1d - III	8	25	1	-123,969
V/70/25/1d - III	16	25	1	-447,889
V/70/25/1d - III	32	25	1	-483,880
V/70/25/1d - III	64	25	1	-575,857
V/70/25/3d - I	4	25	3	268,277
V/70/25/3d - I	8	25	3	-36,037
V/70/25/3d - I	16	25	3	-220,227
V/70/25/3d - I	32	25	3	-112,116
V/70/25/3d - I	64	25	3	-92,095
V/70/25/3d - II	4	25	3	189,129
V/70/25/3d - II	8	25	3	181,081
V/70/25/3d - II	16	25	3	-136,817
V/70/25/3d - II	32	25	3	-187,788
V/70/25/3d - II	64	25	3	-289,730
V/70/25/3d - III	4	25	3	195,406
V/70/25/3d - III	8	25	3	7,976
V/70/25/3d - III	16	25	3	-287,127
V/70/25/3d - III	32	25	3	-269,846
V/70/25/3d - III	64	25	3	-235,285
V/70/25/7d - I	4	25	7	215,691
V/70/25/7d - I	8	25	7	-39,943
V/70/25/7d - I	16	25	7	-183,737
V/70/25/7d - I	32	25	7	-283,594
V/70/25/7d - I	64	25	7	-235,663

				Cont.
Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/70/25/7d - II	4	25	7	207,850
V/70/25/7d - II	8	25	7	-171,876
V/70/25/7d - II	16	25	7	-275,800
V/70/25/7d - II	32	25	7	-295,786
V/70/25/7d - II	64	25	7	-363,737
V/70/25/7d - III	4	25	7	475,911
V/70/25/7d - III	8	25	7	83,984
V/70/25/7d - III	16	25	7	15,997
V/70/25/7d - III	32	25	7	-51,990
V/70/25/7d - III	64	25	7	-451,915
V/70/50/1d - I	4	50	1	243,245
V/70/50/1d - I	8	50	1	187,418
V/70/50/1d - I	16	70	1	-478,515
V/70/50/1d - I	32	70	1	-510,416
V/70/50/1d - I	64	70	1	-574,218
V/70/50/1d - II	4	70	1	311,497
V/70/50/1d - II	8	70	1	187,697
V/70/50/1d - II	16	70	1	-303,510
V/70/50/1d - II	32	70	1	-324,808
V/70/70/1d - II	64	70	1	-367,406
V/70/50/1d - III	4	70	1	70,543
V/70/50/1d - III	8	70	1	-3,993
V/70/50/1d - III	16	70	1	-363,363
V/70/50/1d - III	32	70	1	-287,496
V/70/50/1d - III	64	70	1	-355,377
V/70/50/3d - I	4	70	3	352,929
V/70/50/3d - I	8	70	3	44,816
V/70/50/3d - I	16	70	3	16,806
V/70/50/3d - I	32	70	3	-119,244
V/70/50/3d - I	64	70	3	-163,260
V/70/50/3d - II	4	70	3	200,612
V/70/50/3d - II	8	70	3	104,318
V/70/50/3d - II	16	70	3	-268,820
V/70/50/3d - II	32	70	3	-353,078
V/70/50/3d - II	64	70	3	-308,943
V/70/50/3d - III	4	70	3	280,093
V/70/50/3d - III	8	70	3	164,054
V/70/50/3d - III	16	70	3	-152,050
V/70/50/3d - III	32	70	3	-184,061
V/70/50/3d - III	64	70	3	-148,049

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
V/70/50/7d - I	4	70	7	136,306
V/70/50/7d - I	8	70	7	8,018
V/70/50/7d - I	16	70	7	-252,568
V/70/50/7d - I	32	70	7	-424,955
V/70/50/7d - I	64	70	7	-489,099
V/70/50/7d - II	4	70	7	187,781
V/70/50/7d - II	8	70	7	-111,870
V/70/50/7d - II	16	70	7	-271,684
V/70/50/7d - II	32	70	7	-323,623
V/70/50/7d - II	64	70	7	-431,498
V/70/50/7d - III	4	70	7	52,130
V/70/50/7d - III	8	70	7	-517,293
V/70/50/7d - III	16	70	7	-609,524
V/70/50/7d - III	32	70	7	-721,805
V/70/50/7d - III	64	70	7	-697,744
V/70/75/1d - I	4	75	1	462,745
V/70/75/1d - I	8	75	1	183,502
V/70/75/1d - I	16	75	1	-63,827
V/70/75/1d - I	32	75	1	-124,462
V/70/75/1d - I	64	75	1	-263,286
V/70/75/1d - II	4	75	1	507,140
V/70/75/1d - II	8	75	1	195,668
V/70/75/1d - II	16	75	1	67,885
V/70/75/1d - II	32	75	1	-9,318
V/70/75/1d - II	64	75	1	-163,722
V/70/75/1d - III	4	75	1	475,827
V/70/75/1d - III	8	75	1	243,911
V/70/75/1d - III	16	75	1	7,997
V/70/75/1d - III	32	75	1	-3,999
V/70/75/1d - III	64	75	1	-27,990
V/70/75/3d - I	4	75	3	291,661
V/70/75/3d - I	8	75	3	139,837
V/70/75/3d - I	16	75	3	-79,907
V/70/75/3d - I	32	75	3	-251,707
V/70/75/3d - I	64	75	3	-271,684
V/70/75/3d - II	4	75	3	281,134
V/70/75/3d - II	8	75	3	208,842
V/70/75/3d - II	16	75	3	-200,810
V/70/75/3d - II	32	75	3	-204,826
V/70/75/3d - II	64	75	3	-28,113

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/70/75/3d - III	4	75	3	375,576
V/70/75/3d - III	8	75	3	267,698
V/70/75/3d - III	16	75	3	67,923
V/70/75/3d - III	32	75	3	-3,995
V/70/75/3d - III	64	75	3	-15,982
V/70/75/7d - I	4	75	7	47,809
V/70/75/7d - I	8	75	7	-247,015
V/70/75/7d - I	16	75	7	-282,872
V/70/75/7d - I	32	75	7	-430,284
V/70/75/7d - I	64	75	7	-605,585
V/70/75/7d - II	4	75	7	-109,236
V/70/75/7d - II	8	75	7	-364,120
V/70/75/7d - II	16	75	7	-408,624
V/70/75/7d - II	32	75	7	-521,906
V/70/75/7d - II	64	75	7	-598,776
V/70/75/7d - III	4	75	7	96,197
V/70/75/7d - III	8	75	7	4,008
V/70/75/7d - III	16	75	7	-164,337
V/70/75/7d - III	32	75	7	-236,485
V/70/75/7d - III	64	75	7	-428,880

Tabela B4 – Deformações devidas à retração por secagem, CP V ARI, cura 7 dias, a/c=0,35.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/35/Ref - I	1	0	1	255,219
V/35/Ref - I	4	0	1	-167,487
V/35/Ref - I	8	0	1	-394,792
V/35/Ref - I	16	0	1	-482,523
V/35/Ref - I	32	0	1	-470,560
V/35/Ref - I	64	0	1	-675,692
V/35/Ref - II	1	0	1	147,062
V/35/Ref - II	4	0	1	-139,113
V/35/Ref - II	8	0	1	-425,288
V/35/Ref - II	16	0	1	-500,807
V/35/Ref - II	32	0	1	-559,102
V/35/Ref - II	64	0	1	-675,692
V/35/Ref - III	1	0	1	201,141
V/35/Ref - III	4	0	1	-153,300
V/35/Ref - III	8	0	1	-410,040
V/35/Ref - III	16	0	1	-491,665
V/35/Ref - III	32	0	1	-514,831
V/35/Ref - III	64	0	1	-788,467
V/35/Ref - I	1	0	3	255,219
V/35/Ref - I	4	0	3	-167,487
V/35/Ref - I	8	0	3	-394,792
V/35/Ref - I	16	0	3	-482,523
V/35/Ref - I	32	0	3	-470,560
V/35/Ref - I	64	0	3	-675,692
V/35/Ref - II	1	0	3	147,062
V/35/Ref - II	4	0	3	-139,113
V/35/Ref - II	8	0	3	-425,288
V/35/Ref - II	16	0	3	-500,807
V/35/Ref - II	32	0	3	-559,102
V/35/Ref - II	64	0	3	-675,692
V/35/Ref - III	1	0	3	201,141
V/35/Ref - III	4	0	3	-153,300
V/35/Ref - III	8	0	3	-410,040
V/35/Ref - III	16	0	3	-491,665
V/35/Ref - III	32	0	3	-514,831
V/35/Ref - III	64	0	3	-788,467
V/35/Ref - I	1	0	7	255,219
V/35/Ref - I	4	0	7	-167,487
V/35/Ref - I	8	0	7	-394,792
V/35/Ref - I	16	0	7	-482,523
V/35/Ref - I	32	0	7	-470,560

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/35/Ref - I	64	0	7	-675,692
V/35/Ref - II	1	0	7	147,062
V/35/Ref - II	4	0	7	-139,113
V/35/Ref - II	8	0	7	-425,288
V/35/Ref - II	16	0	7	-500,807
V/35/Ref - II	32	0	7	-559,102
V/35/Ref - II	64	0	7	-675,692
V/35/Ref - III	1	0	7	201,141
V/35/Ref - III	4	0	7	-153,300
V/35/Ref - III	8	0	7	-410,040
V/35/Ref - III	16	0	7	-491,665
V/35/Ref - III	32	0	7	-514,831
V/35/Ref - III	64	0	7	-788,467
V/35/25/1d - I	1	25	1	67,807
V/35/25/1d - I	4	25	1	-279,204
V/35/25/1d - I	8	25	1	-315,101
V/35/25/1d - I	16	25	1	-694,021
V/35/25/1d - I	32	25	1	-650,146
V/35/25/1d - I	64	25	1	-801,714
V/35/25/1d - II	1	25	1	189,455
V/35/25/1d - II	4	25	1	-165,269
V/35/25/1d - II	8	25	1	-403,096
V/35/25/1d - II	16	25	1	-511,932
V/35/25/1d - II	32	25	1	-568,365
V/35/25/1d - II	64	25	1	-644,953
V/35/25/1d - III	1	25	1	19,928
V/35/25/1d - III	4	25	1	-243,119
V/35/25/1d - III	8	25	1	-454,353
V/35/25/1d - III	16	25	1	-629,718
V/35/25/1d - III	32	25	1	-709,429
V/35/25/1d - III	64	25	1	-761,241
V/35/25/3d - I	1	25	3	10,152
V/35/25/3d - I	4	25	3	-99,710
V/35/25/3d - I	8	25	3	-398,840
V/35/25/3d - I	16	25	3	-598,260
V/35/25/3d - I	32	25	3	-697,970
V/35/25/3d - I	64	25	3	-756,124
V/35/25/3d - I	1	25	3	63,861
V/35/25/3d - II	4	25	3	-379,176
V/35/25/3d - II	8	25	3	-407,116

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/35/25/3d - II	16	25	3	-542,821
V/35/25/3d - II	32	25	3	-650,587
V/35/25/3d - II	64	25	3	-614,665
V/35/25/3d - III	1	25	3	79,785
V/35/25/3d - III	4	25	3	-99,732
V/35/25/3d - III	8	25	3	-255,313
V/35/25/3d - III	16	25	3	-450,786
V/35/25/3d - III	32	25	3	-518,604
V/35/25/3d - III	64	25	3	-897,584
V/35/25/7d - II	1	25	7	195,762
V/35/25/7d - I	4	25	7	79,903
V/35/25/7d - I	8	25	7	-359,563
V/35/25/7d - I	16	25	7	-395,519
V/35/25/7d - I	32	25	7	-327,602
V/35/25/7d - I	64	25	7	-515,373
V/35/25/7d - II	1	25	7	135,400
V/35/25/7d - II	4	25	7	-179,206
V/35/25/7d - II	8	25	7	-457,970
V/35/25/7d - II	16	25	7	-525,670
V/35/25/7d - II	32	25	7	-573,458
V/35/25/7d - II	64	25	7	-669,035
V/35/25/7d - III	1	25	7	-135,500
V/35/25/7d - III	4	25	7	-354,692
V/35/25/7d - III	8	25	7	-406,501
V/35/25/7d - III	16	25	7	-442,369
V/35/25/7d - III	32	25	7	-409,158
V/35/25/7d - III	64	25	7	-597,795
V/35/50/1d - I	1	50	1	258,715
V/35/50/1d - I	4	50	1	-3,980
V/35/50/1d - I	8	50	1	-214,932
V/35/50/1d - I	16	50	1	-342,299
V/35/50/1d - I	32	50	1	-358,220
V/35/50/1d - I	64	50	1	-565,192
V/35/50/1d - II	1	50	1	-3,992
V/35/50/1d - II	4	50	1	-183,648
V/35/50/1d - II	8	50	1	-538,967
V/35/50/1d - II	16	50	1	-1049,988
V/35/50/1d - II	32	50	1	-1169,759
V/35/50/1d - II	64	50	1	-1201,698
V/35/50/1d - III	1	50	1	-51,845

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/35/50/1d - III	4	50	1	-235,296
V/35/50/1d - III	8	50	1	-673,983
V/35/50/1d - III	16	50	1	-797,614
V/35/50/1d - III	32	50	1	-825,530
V/35/50/1d - III	64	50	1	-805,590
V/35/50/3d - I	1	50	3	11,935
V/35/50/3d - I	4	50	3	-51,720
V/35/50/3d - I	8	50	3	-358,062
V/35/50/3d - I	16	50	3	-330,213
V/35/50/3d - I	32	50	3	-517,201
V/35/50/3d - I	64	50	3	-612,684
V/35/50/3d - II	1	50	3	-35,833
V/35/50/3d - II	4	50	3	-151,296
V/35/50/3d - II	8	50	3	-358,332
V/35/50/3d - II	16	50	3	-457,868
V/35/50/3d - II	32	50	3	-565,368
V/35/50/3d - II	64	50	3	-672,184
V/35/50/3d - III	1	50	3	-151,934
V/35/50/3d - III	4	50	3	-247,893
V/35/50/3d - III	8	50	3	-339,853
V/35/50/3d - III	16	50	3	-507,781
V/35/50/3d - III	32	50	3	-647,720
V/35/50/3d - III	64	50	3	-731,684
V/35/50/7d - I	1	50	7	79,623
V/35/50/7d - I	4	50	7	-226,925
V/35/50/7d - I	8	50	7	-398,115
V/35/50/7d - I	16	50	7	-505,605
V/35/50/7d - I	32	50	7	-748,455
V/35/50/7d - I	64	50	7	-820,116
V/35/50/7d - II	1	50	7	314,300
V/35/50/7d - II	4	50	7	-3,978
V/35/50/7d - II	8	50	7	-278,494
V/35/50/7d - II	16	50	7	-306,343
V/35/50/7d - II	32	50	7	-592,794
V/35/50/7d - II	64	50	7	-743,977
V/35/50/7d - III	1	50	7	196,962
V/35/50/7d - III	4	50	7	-115,452
V/35/50/7d - III	8	50	7	-338,304
V/35/50/7d - III	16	50	7	-405,974
V/35/50/7d - III	32	50	7	-670,625



Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/35/50/7d - III	64	50	7	-782,046
V/35/75/1d - I	1	75	1	-83,503
V/35/75/1d - I	4	75	1	-282,827
V/35/75/1d - I	8	75	1	-677,097
V/35/75/1d - I	16	75	1	-762,689
V/35/75/1d - I	32	75	1	-828,455
V/35/75/1d - I	64	75	1	-1007,764
V/35/75/1d - II	1	75	1	39,893
V/35/75/1d - II	4	75	1	-251,325
V/35/75/1d - II	8	75	1	-530,576
V/35/75/1d - II	16	75	1	-566,480
V/35/75/1d - II	32	75	1	-654,244
V/35/75/1d - II	64	75	1	-853,709
V/35/75/1d - III	1	75	1	-206,899
V/35/75/1d - III	4	75	1	-314,328
V/35/75/1d - III	8	75	1	-823,618
V/35/75/1d - III	16	75	1	-958,899
V/35/75/1d - III	32	75	1	-1002,666
V/35/75/1d - III	64	75	1	-1161,819
V/35/75/3d - I	1	75	3	7,981
V/35/75/3d - I	4	75	3	-127,692
V/35/75/3d - I	8	75	3	-395,047
V/35/75/3d - I	16	75	3	-397,707
V/35/75/3d - I	32	75	3	-403,028
V/35/75/3d - I	64	75	3	-658,412
V/35/75/3d - II	1	75	3	91,731
V/35/75/3d - II	4	75	3	-335,016
V/35/75/3d - II	8	75	3	-586,279
V/35/75/3d - II	16	75	3	-681,998
V/35/75/3d - II	32	75	3	-713,904
V/35/75/3d - II	64	75	3	-777,717
V/35/75/3d - III	1	75	3	226,833
V/35/75/3d - III	4	75	3	107,447
V/35/75/3d - III	8	75	3	-417,851
V/35/75/3d - III	16	75	3	-541,216
V/35/75/3d - III	32	75	3	-561,114
V/35/75/3d - III	64	75	3	-688,459
V/35/75/7d - I	1	75	7	-31,904
V/35/75/7d - I	4	75	7	-110,335
V/35/75/7d - I	8	75	7	-323,030

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/35/75/7d - I	16	75	7	-494,514
V/35/75/7d - I	32	75	7	-554,335
V/35/75/7d - I	64	75	7	-749,748
V/35/75/7d - II	1	75	7	79,731
V/35/75/7d - II	4	75	7	-91,690
V/35/75/7d - II	8	75	7	-314,937
V/35/75/7d - II	16	75	7	-502,304
V/35/75/7d - II	32	75	7	-637,847
V/35/75/7d - II	64	75	7	-705,618
V/35/75/7d - III	1	75	7	79,859
V/35/75/7d - III	4	75	7	-275,513
V/35/75/7d - III	8	75	7	-379,329
V/35/75/7d - III	16	75	7	-503,111
V/35/75/7d - III	32	75	7	-519,082
V/35/75/7d - III	64	75	7	-718,729

Tabela B5 – Deformações devidas à retração por secagem, CP V ARI, cura 7 dias,  $a/c=0,50$ .

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
V/50/Ref - I	1	0	1	56,229
V/50/Ref - I	4	0	1	-502,046
V/50/Ref - I	8	0	1	-544,888
V/50/Ref - I	16	0	1	-630,570
V/50/Ref - I	32	0	1	-678,767
V/50/Ref - I	64	0	1	-827,372
V/50/Ref - II	1	0	1	4,099
V/50/Ref - II	4	0	1	-418,079
V/50/Ref - II	8	0	1	-393,486
V/50/Ref - II	16	0	1	-483,660
V/50/Ref - II	32	0	1	-647,613
V/50/Ref - II	64	0	1	-827,372
V/50/Ref - III	1	0	1	30,164
V/50/Ref - III	4	0	1	-460,063
V/50/Ref - III	8	0	1	-469,187
V/50/Ref - III	16	0	1	-557,115
V/50/Ref - III	32	0	1	-663,190
V/50/Ref - III	64	0	1	-827,372
V/50/Ref - I	1	0	3	56,229
V/50/Ref - I	4	0	3	-502,046
V/50/Ref - I	8	0	3	-544,888
V/50/Ref - I	16	0	3	-630,570
V/50/Ref - I	32	0	3	-678,767
V/50/Ref - I	64	0	3	-827,372
V/50/Ref - II	1	0	3	4,099
V/50/Ref - II	4	0	3	-418,079
V/50/Ref - II	8	0	3	-393,486
V/50/Ref - II	16	0	3	-483,660
V/50/Ref - II	32	0	3	-647,613
V/50/Ref - II	64	0	3	-827,372
V/50/Ref - III	1	0	3	30,164
V/50/Ref - III	4	0	3	-460,063
V/50/Ref - III	8	0	3	-469,187
V/50/Ref - III	16	0	3	-557,115
V/50/Ref - III	32	0	3	-663,190
V/50/Ref - III	64	0	3	-827,372
V/50/Ref - I	1	0	7	56,229
V/50/Ref - I	4	0	7	-502,046
V/50/Ref - I	8	0	7	-544,888

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/50/Ref - I	16	0	7	-630,570
V/50/Ref - I	32	0	7	-678,767
V/50/Ref - I	64	0	7	-827,372
V/50/Ref - II	1	0	7	4,099
V/50/Ref - II	4	0	7	-418,079
V/50/Ref - II	8	0	7	-393,486
V/50/Ref - II	16	0	7	-483,660
V/50/Ref - II	32	0	7	-647,613
V/50/Ref - II	64	0	7	-827,372
V/50/Ref - III	1	0	7	30,164
V/50/Ref - III	4	0	7	-460,063
V/50/Ref - III	8	0	7	-469,187
V/50/Ref - III	16	0	7	-557,115
V/50/Ref - III	32	0	7	-663,190
V/50/Ref - III	64	0	7	-827,372
V/50/25/1d - I	1	25	1	85,348
V/50/25/1d - I	4	25	1	-345,455
V/50/25/1d - I	8	25	1	-288,557
V/50/25/1d - I	16	25	1	-459,253
V/50/25/1d - I	32	25	1	-577,114
V/50/25/1d - I	64	25	1	-601,499
V/50/25/1d - II	1	25	1	101,716
V/50/25/1d - II	4	25	1	-382,453
V/50/25/1d - II	8	25	1	-443,482
V/50/25/1d - II	16	25	1	-581,816
V/50/25/1d - II	32	25	1	-634,709
V/50/25/1d - II	64	25	1	-642,846
V/50/25/1d - III	1	25	1	169,923
V/50/25/1d - III	4	25	1	-271,067
V/50/25/1d - III	8	25	1	-351,983
V/50/25/1d - III	16	25	1	-445,036
V/50/25/1d - III	32	25	1	-566,409
V/50/25/1d - III	64	25	1	-562,364
V/50/25/3d - I	1	25	3	76,535
V/50/25/3d - I	4	25	3	-523,661
V/50/25/3d - I	8	25	3	-455,183
V/50/25/3d - I	16	25	3	-761,323
V/50/25/3d - I	32	25	3	-857,999
V/50/25/3d - I	64	25	3	-970,788

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/50/25/3d - I	1	25	3	-12,181
V/50/25/3d - II	4	25	3	-454,763
V/50/25/3d - II	8	25	3	-397,918
V/50/25/3d - II	16	25	3	-674,024
V/50/25/3d - II	32	25	3	-747,111
V/50/25/3d - II	64	25	3	-852,547
V/50/25/3d - III	1	25	3	73,431
V/50/25/3d - III	4	25	3	-460,982
V/50/25/3d - III	8	25	3	-371,233
V/50/25/3d - III	16	25	3	-624,161
V/50/25/3d - III	32	25	3	-705,751
V/50/25/3d - III	64	25	3	-734,307
V/50/25/7d - II	1	25	7	69,623
V/50/25/7d - I	4	25	7	-466,882
V/50/25/7d - I	8	25	7	-438,214
V/50/25/7d - I	16	25	7	-573,364
V/50/25/7d - I	32	25	7	-679,846
V/50/25/7d - I	64	25	7	-745,373
V/50/25/7d - II	1	25	7	178,710
V/50/25/7d - II	4	25	7	-264,003
V/50/25/7d - II	8	25	7	-308,681
V/50/25/7d - II	16	25	7	-552,376
V/50/25/7d - II	32	25	7	-601,115
V/50/25/7d - II	64	25	7	-771,702
V/50/25/7d - III	1	25	7	97,741
V/50/25/7d - III	4	25	7	-89,596
V/50/25/7d - III	8	25	7	-166,974
V/50/25/7d - III	16	25	7	-456,124
V/50/25/7d - III	32	25	7	-582,373
V/50/25/7d - III	64	25	7	-826,726
V/50/50/1d - I	1	50	1	40,788
V/50/50/1d - I	4	50	1	-411,954
V/50/50/1d - I	8	50	1	-473,135
V/50/50/1d - I	16	50	1	-501,687
V/50/50/1d - I	32	50	1	-672,994
V/50/50/1d - I	64	50	1	-726,018
V/50/50/1d - II	1	50	1	76,669
V/50/50/1d - II	4	50	1	-464,048
V/50/50/1d - II	8	50	1	-540,717

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/50/50/1d - II	16	50	1	-690,020
V/50/50/1d - II	32	50	1	-746,513
V/50/50/1d - II	64	50	1	-553,739
V/50/50/1d - III	1	50	1	-7,947
V/50/50/1d - III	4	50	1	-480,798
V/50/50/1d - III	8	50	1	-496,692
V/50/50/1d - III	16	50	1	-460,930
V/50/50/1d - III	32	50	1	-434,440
V/50/50/1d - III	64	50	1	-381,459
V/50/50/3d - I	1	50	3	48,304
V/50/50/3d - I	4	50	3	-535,364
V/50/50/3d - I	8	50	3	-507,187
V/50/50/3d - I	16	50	3	-676,250
V/50/50/3d - I	32	50	3	-865,438
V/50/50/3d - I	64	50	3	-921,793
V/50/50/3d - II	1	50	3	76,957
V/50/50/3d - II	4	50	3	-563,423
V/50/50/3d - II	8	50	3	-537,199
V/50/50/3d - II	16	50	3	-723,054
V/50/50/3d - II	32	50	3	-865,438
V/50/50/3d - II	64	50	3	-921,793
V/50/50/3d - III	1	50	3	105,611
V/50/50/3d - III	4	50	3	-591,482
V/50/50/3d - III	8	50	3	-567,211
V/50/50/3d - III	16	50	3	-769,858
V/50/50/3d - III	32	50	3	-865,438
V/50/50/3d - III	64	50	3	-921,793
V/50/50/7d - I	1	50	7	126,140
V/50/50/7d - I	4	50	7	-24,414
V/50/50/7d - I	8	50	7	-252,281
V/50/50/7d - I	16	50	7	-451,664
V/50/50/7d - I	32	50	7	-500,492
V/50/50/7d - I	64	50	7	-663,254
V/50/50/7d - II	1	50	7	42,678
V/50/50/7d - II	4	50	7	-248,752
V/50/50/7d - II	8	50	7	-397,351
V/50/50/7d - II	16	50	7	-572,492
V/50/50/7d - II	32	50	7	-651,964
V/50/50/7d - II	64	50	7	-331,627

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/50/50/7d - III	1	50	7	-40,784
V/50/50/7d - III	4	50	7	-473,089
V/50/50/7d - III	8	50	7	-542,421
V/50/50/7d - III	16	50	7	-693,320
V/50/50/7d - III	32	50	7	-803,436
V/50/50/7d - III	64	50	7	-663,254
V/50/75/1d - I	1	75	1	187,311
V/50/75/1d - I	4	75	1	-302,885
V/50/75/1d - I	8	75	1	-215,208
V/50/75/1d - I	16	75	1	-581,859
V/50/75/1d - I	32	75	1	-645,624
V/50/75/1d - I	64	75	1	-741,272
V/50/75/1d - II	1	75	1	88,308
V/50/75/1d - II	4	75	1	-433,510
V/50/75/1d - II	8	75	1	-473,650
V/50/75/1d - II	16	75	1	-650,266
V/50/75/1d - II	32	75	1	-806,811
V/50/75/1d - II	64	75	1	-826,881
V/50/75/1d - III	1	75	1	138,048
V/50/75/1d - III	4	75	1	-316,699
V/50/75/1d - III	8	75	1	-280,156
V/50/75/1d - III	16	75	1	-491,289
V/50/75/1d - III	32	75	1	-600,915
V/50/75/1d - III	64	75	1	-657,759
V/50/75/3d - I	1	75	3	-360,616
V/50/75/3d - I	4	75	3	-663,861
V/50/75/3d - I	8	75	3	-577,805
V/50/75/3d - I	16	75	3	-647,469
V/50/75/3d - I	32	75	3	-840,071
V/50/75/3d - I	64	75	3	-926,127
V/50/75/3d - II	1	75	3	276,226
V/50/75/3d - II	4	75	3	-239,667
V/50/75/3d - II	8	75	3	-215,294
V/50/75/3d - II	16	75	3	-276,226
V/50/75/3d - II	32	75	3	-284,351
V/50/75/3d - II	64	75	3	-848,061
V/50/75/3d - III	1	75	3	-81,052
V/50/75/3d - III	4	75	3	-466,049
V/50/75/3d - III	8	75	3	-417,418

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
<b>V/50/75/3d - III</b>	<b>16</b>	<b>75</b>	<b>3</b>	<b>-603,838</b>
V/50/75/3d - III	32	75	3	-721,363
V/50/75/3d - III	64	75	3	-769,995
V/50/75/7d - I	1	75	7	23,902
V/50/75/7d - I	4	75	7	-525,840
V/50/75/7d - I	8	75	7	-585,594
V/50/75/7d - I	16	75	7	-645,349
V/50/75/7d - I	32	75	7	-736,973
V/50/75/7d - I	64	75	7	-864,449
V/50/75/7d - II	1	75	7	175,211
V/50/75/7d - II	4	75	7	-191,510
V/50/75/7d - II	8	75	7	-407,468
V/50/75/7d - II	16	75	7	-729,368
V/50/75/7d - II	32	75	7	-598,978
V/50/75/7d - II	64	75	7	-688,621
V/50/75/7d - III	1	75	7	24,274
V/50/75/7d - III	4	75	7	-473,349
V/50/75/7d - III	8	75	7	-428,846
V/50/75/7d - III	16	75	7	-509,760
V/50/75/7d - III	32	75	7	-627,086
V/50/75/7d - III	64	75	7	-946,698



Tabela B6 – Resultados de retração por secagem, cimento CP V ARI, cura 7 dias, a/c=0,70.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
V/70/Ref - I	1	0	1	-60,791
V/70/Ref - I	4	0	1	-510,642
V/70/Ref - I	8	0	1	-559,275
V/70/Ref - I	16	0	1	-733,542
V/70/Ref - I	32	0	1	-802,438
V/70/Ref - I	64	0	1	-972,652
V/70/Ref - II	1	0	1	-109,332
V/70/Ref - II	4	0	1	-404,932
V/70/Ref - II	8	0	1	-611,447
V/70/Ref - II	16	0	1	-761,272
V/70/Ref - II	32	0	1	-842,259
V/70/Ref - II	64	0	1	-983,985
V/70/Ref - III	1	0	1	24,254
V/70/Ref - III	4	0	1	-371,896
V/70/Ref - III	8	0	1	-420,404
V/70/Ref - III	16	0	1	-792,300
V/70/Ref - III	32	0	1	-877,189
V/70/Ref - III	64	0	1	-978,319
V/70/Ref - I	1	0	3	-60,791
V/70/Ref - I	4	0	3	-510,642
V/70/Ref - I	8	0	3	-559,275
V/70/Ref - I	16	0	3	-733,542
V/70/Ref - I	32	0	3	-802,438
V/70/Ref - I	64	0	3	-972,652
V/70/Ref - II	1	0	3	-109,332
V/70/Ref - II	4	0	3	-404,932
V/70/Ref - II	8	0	3	-611,447
V/70/Ref - II	16	0	3	-761,272
V/70/Ref - II	32	0	3	-842,259
V/70/Ref - II	64	0	3	-983,985
V/70/Ref - III	1	0	3	24,254
V/70/Ref - III	4	0	3	-371,896
V/70/Ref - III	8	0	3	-420,404
V/70/Ref - III	16	0	3	-792,300
V/70/Ref - III	32	0	3	-877,189
V/70/Ref - III	64	0	3	-978,319
V/70/Ref - I	1	0	7	-60,791
V/70/Ref - I	4	0	7	-510,642
V/70/Ref - I	8	0	7	-559,275
V/70/Ref - I	16	0	7	-733,542

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/70/Ref - I	32	0	7	-802,438
V/70/Ref - I	64	0	7	-972,652
V/70/Ref - II	1	0	7	-109,332
V/70/Ref - II	4	0	7	-404,932
V/70/Ref - II	8	0	7	-611,447
V/70/Ref - II	16	0	7	-761,272
V/70/Ref - II	32	0	7	-842,259
V/70/Ref - II	64	0	7	-983,985
V/70/Ref - III	1	0	7	24,254
V/70/Ref - III	4	0	7	-371,896
V/70/Ref - III	8	0	7	-420,404
V/70/Ref - III	16	0	7	-792,300
V/70/Ref - III	32	0	7	-877,189
V/70/Ref - III	64	0	7	-978,319
V/70/25/1d - I	1	25	1	-142,12
V/70/25/1d - I	4	25	1	-300,49
V/70/25/1d - I	8	25	1	-483,22
V/70/25/1d - I	16	25	1	-527,89
V/70/25/1d - I	32	25	1	-517,06
V/70/25/1d - I	64	25	1	-495,40
V/70/25/1d - II	1	25	1	-54,85
V/70/25/1d - II	4	25	1	-204,97
V/70/25/1d - II	8	25	1	-434,17
V/70/25/1d - II	16	25	1	-539,61
V/70/25/1d - II	32	25	1	-515,28
V/70/25/1d - II	64	25	1	-466,61
V/70/25/1d - III	1	25	1	32,43
V/70/25/1d - III	4	25	1	-109,46
V/70/25/1d - III	8	25	1	-385,13
V/70/25/1d - III	16	25	1	-551,34
V/70/25/1d - III	32	25	1	-513,50
V/70/25/1d - III	64	25	1	-437,83
V/70/25/3d - I	1	25	3	76,814
V/70/25/3d - I	4	25	3	-355,771
V/70/25/3d - I	8	25	3	-327,471
V/70/25/3d - I	16	25	3	-594,300
V/70/25/3d - I	32	25	3	-477,057
V/70/25/3d - I	64	25	3	-533,657
V/70/25/3d - I	1	25	3	121,496
V/70/25/3d - II	4	25	3	-210,593
V/70/25/3d - II	8	25	3	-255,141

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/70/25/3d - II	16	25	3	-445,485
V/70/25/3d - II	32	25	3	-429,285
V/70/25/3d - II	64	25	3	-421,186
V/70/25/3d - III	1	25	3	-48,851
V/70/25/3d - III	4	25	3	-47,990
V/70/25/3d - III	8	25	3	-255,245
V/70/25/3d - III	16	25	3	-534,798
V/70/25/3d - III	32	25	3	-534,798
V/70/25/3d - III	64	25	3	-700,910
V/70/25/7d - II	1	25	7	-56,970
V/70/25/7d - I	4	25	7	-295,195
V/70/25/7d - I	8	25	7	-305,489
V/70/25/7d - I	16	25	7	-521,126
V/70/25/7d - I	32	25	7	-559,793
V/70/25/7d - I	64	25	7	-659,745
V/70/25/7d - II	1	25	7	-64,969
V/70/25/7d - II	4	25	7	-267,997
V/70/25/7d - II	8	25	7	-231,452
V/70/25/7d - II	16	25	7	-491,329
V/70/25/7d - II	32	25	7	-531,934
V/70/25/7d - II	64	25	7	-544,116
V/70/25/7d - III	1	25	7	-48,971
V/70/25/7d - III	4	25	7	-322,392
V/70/25/7d - III	8	25	7	-379,525
V/70/25/7d - III	16	25	7	-550,924
V/70/25/7d - III	32	25	7	-587,652
V/70/25/7d - III	64	25	7	-775,374
V/70/50/1d - I	1	50	1	-12,170
V/70/50/1d - I	4	50	1	-243,350
V/70/50/1d - I	8	50	1	-466,410
V/70/50/1d - I	16	50	1	-429,910
V/70/50/1d - I	32	50	1	-470,470
V/70/50/1d - I	64	50	1	-519,850
V/70/50/1d - II	1	50	1	56,860
V/70/50/1d - II	4	50	1	-337,090
V/70/50/1d - II	8	50	1	-312,720
V/70/50/1d - II	16	50	1	-414,250
V/70/50/1d - II	32	50	1	-446,740
V/70/50/1d - II	64	50	1	-519,850
V/70/50/1d - III	1	50	1	28,310
V/70/50/1d - III	4	50	1	-440,830

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
V/70/50/1d - III	8	50	1	-529,810
V/70/50/1d - III	16	50	1	-428,700
V/70/50/1d - III	32	50	1	-458,610
V/70/50/1d - III	64	50	1	-519,850
V/70/50/3d - I	1	50	3	48,490
V/70/50/3d - I	4	50	3	-32,330
V/70/50/3d - I	8	50	3	-101,020
V/70/50/3d - I	16	50	3	-294,990
V/70/50/3d - I	32	50	3	-343,480
V/70/50/3d - I	64	50	3	-339,440
V/70/50/3d - II	1	50	3	-101,860
V/70/50/3d - II	4	50	3	-207,79
V/70/50/3d - II	8	50	3	-317,79
V/70/50/3d - II	16	50	3	-480,76
V/70/50/3d - II	32	50	3	-456,31
V/70/50/3d - II	64	50	3	-554,09
V/70/50/3d - III	1	50	3	121,69
V/70/50/3d - III	4	50	3	-48,67
V/70/50/3d - III	8	50	3	-97,35
V/70/50/3d - III	16	50	3	-239,32
V/70/50/3d - III	32	50	3	-247,43
V/70/50/3d - III	64	50	3	-243,37
V/70/50/7d - I	1	50	7	-61,116
V/70/50/7d - I	4	50	7	-370,772
V/70/50/7d - I	8	50	7	-395,218
V/70/50/7d - I	16	50	7	-545,972
V/70/50/7d - I	32	50	7	-525,600
V/70/50/7d - I	64	50	7	-615,237
V/70/50/7d - II	1	50	7	-77,460
V/70/50/7d - II	4	50	7	-542,218
V/70/50/7d - II	8	50	7	-497,372
V/70/50/7d - II	16	50	7	-644,138
V/70/50/7d - II	32	50	7	-688,983
V/70/50/7d - II	64	50	7	-746,059
V/70/50/7d - III	1	50	7	-194,624
V/70/50/7d - III	4	50	7	-579,816
V/70/50/7d - III	8	50	7	-644,690
V/70/50/7d - III	16	50	7	-814,986
V/70/50/7d - III	32	50	7	-835,259
V/70/50/7d - III	64	50	7	-896,079
V/70/75/1d - I	1	75	1	121,880

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{\text{sec}} (10^{-6})$
V/70/75/1d - I	4	75	1	-130,010
V/70/75/1d - I	8	75	1	-231,580
V/70/75/1d - I	16	75	1	-255,960
V/70/75/1d - I	32	75	1	-247,830
V/70/75/1d - I	64	75	1	-284,400
V/70/75/1d - II	1	75	1	166,640
V/70/75/1d - II	4	75	1	24,390
V/70/75/1d - II	8	75	1	-158,510
V/70/75/1d - II	16	75	1	-231,660
V/70/75/1d - II	32	75	1	-125,990
V/70/75/1d - II	64	75	1	-158,510
V/70/75/1d - III	1	75	1	303,870
V/70/75/1d - III		75	1	162,060
V/70/75/1d - III	8	75	1	-4,050
V/70/75/1d - III	16	75	1	-166,110
V/70/75/1d - III	32	75	1	-190,420
V/70/75/1d - III	64	75	1	-226,800
V/70/75/3d - I	1	75	3	-121,600
V/70/75/3d - I	4	75	3	-287,780
V/70/75/3d - I	8	75	3	-312,100
V/70/75/3d - I	16	75	3	-352,630
V/70/75/3d - I	32	75	3	-522,860
V/70/75/3d - I	64	75	3	-535,020
V/70/75/3d - II	1	75	3	-85,280
V/70/75/3d - II	4	75	3	-422,320
V/70/75/3d - II	8	75	3	-414,190
V/70/75/3d - II	16	75	3	-519,770
V/70/75/3d - II	32	75	3	-527,900
V/70/75/3d - II	64	75	3	-536,020
V/70/75/3d - III	1	75	3	-296,730
V/70/75/3d - III	4	75	3	-333,320
V/70/75/3d - III	8	75	3	-402,420
V/70/75/3d - III	16	75	3	-540,620
V/70/75/3d - III	32	75	3	-491,840
V/70/75/3d - III	64	75	3	-678,830
V/70/75/7d - I	1	75	7	-4,080
V/70/75/7d - I	4	75	7	-489,120
V/70/75/7d - I	8	75	7	-480,970
V/70/75/7d - I	16	75	7	-464,660
V/70/75/7d - I	32	75	7	-509,500
V/70/75/7d - I	64	75	7	-517,650

Cont.

<b>Identificação</b>	<b>Idade leitura (semanas)</b>	<b>Carregamento (%)</b>	<b>Idade de carregamento (dias)</b>	<b><math>\epsilon_{sec}</math> (<math>10^{-6}</math>)</b>
V/70/75/7d - II	1	75	7	-283,030
V/70/75/7d - II	4	75	7	-460,940
V/70/75/7d - II	8	75	7	-424,550
V/70/75/7d - II	16	75	7	-452,850
V/70/75/7d - II	32	75	7	-642,880
V/70/75/7d - II	64	75	7	-683,320
V/70/75/7d - III	1	75	7	-228,060
V/70/75/7d - III	4	75	7	-586,450
V/70/75/7d - III	8	75	7	-632,600
V/70/75/7d - III	16	75	7	-724,910
V/70/75/7d - III	32	75	7	-753,420
V/70/75/7d - III	64	75	7	-741,200

Tabela B7 – Deformações devidas à retração por secagem, CP IV RS, cura 28 dias,  $a/c=0,35$ .

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
IV/35/Ref - I	4	0	1	280,801
IV/35/Ref - I	8	0	1	61,044
IV/35/Ref - I	16	0	1	-142,435
IV/35/Ref - I	32	0	1	-261,809
IV/35/Ref - I	64	0	1	-500,558
IV/35/Ref - II	4	0	1	242,063
IV/35/Ref - II	8	0	1	151,802
IV/35/Ref - II	16	0	1	-135,391
IV/35/Ref - II	32	0	1	-220,182
IV/35/Ref - II	64	0	1	-507,686
IV/35/Ref - III	4	0	1	267,028
IV/35/Ref - III	8	0	1	-69,838
IV/35/Ref - III	16	0	1	-234,163
IV/35/Ref - III	32	0	1	-394,380
IV/35/Ref - III	64	0	1	-504,122
IV/35/Ref - I	4	0	3	280,801
IV/35/Ref - I	8	0	3	61,044
IV/35/Ref - I	16	0	3	-142,435
IV/35/Ref - I	32	0	3	-261,809
IV/35/Ref - I	64	0	3	-500,558
IV/35/Ref - II	4	0	3	242,063
IV/35/Ref - II	8	0	3	151,802
IV/35/Ref - II	16	0	3	-135,391
IV/35/Ref - II	32	0	3	-220,182
IV/35/Ref - II	64	0	3	-507,686
IV/35/Ref - III	4	0	3	267,028
IV/35/Ref - III	8	0	3	-69,838
IV/35/Ref - III	16	0	3	-234,163
IV/35/Ref - III	32	0	3	-394,380
IV/35/Ref - III	64	0	3	-504,122
IV/35/Ref - I	4	0	7	280,801
IV/35/Ref - I	8	0	7	61,044
IV/35/Ref - I	16	0	7	-142,435
IV/35/Ref - I	32	0	7	-261,809
IV/35/Ref - I	64	0	7	-500,558
IV/35/Ref - II	4	0	7	242,063
IV/35/Ref - II	8	0	7	151,802
IV/35/Ref - II	16	0	7	-135,391
IV/35/Ref - II	32	0	7	-220,182
IV/35/Ref - II	64	0	7	-507,686

				Cont.
Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/35/Ref - III	4	0	7	267,028
IV/35/Ref - III	8	0	7	-69,838
IV/35/Ref - III	16	0	7	-234,163
IV/35/Ref - III	32	0	7	-394,380
IV/35/Ref - III	64	0	7	-504,122
IV/35/25/1d - I	4	25	1	264,578
IV/35/25/1d - I	8	25	1	122,113
IV/35/25/1d - I	16	25	1	-213,698
IV/35/25/1d - I	32	25	1	-324,278
IV/35/25/1d - I	64	25	1	-549,509
IV/35/25/1d - II	4	25	1	4,056
IV/35/25/1d - II	8	25	1	-64,894
IV/35/25/1d - II	16	25	1	-129,788
IV/35/25/1d - II	32	25	1	-243,352
IV/35/25/1d - II	64	25	1	-470,481
IV/35/25/1d - III	4	25	1	131,463
IV/35/25/1d - III	8	25	1	12,325
IV/35/25/1d - III	16	25	1	-110,922
IV/35/25/1d - III	32	25	1	-261,556
IV/35/25/1d - III	64	25	1	-562,825
IV/35/25/3d - I	4	25	3	323,554
IV/35/25/3d - I	8	25	3	-32,355
IV/35/25/3d - I	16	25	3	-76,844
IV/35/25/3d - I	32	25	3	-198,177
IV/35/25/3d - I	64	25	3	-440,842
IV/35/25/3d - II	4	25	3	69,171
IV/35/25/3d - II	8	25	3	-170,892
IV/35/25/3d - II	16	25	3	-268,545
IV/35/25/3d - II	32	25	3	-386,542
IV/35/25/3d - II	64	25	3	-622,536
IV/35/25/3d - III	4	25	3	-4,067
IV/35/25/3d - III	8	25	3	-402,642
IV/35/25/3d - III	16	25	3	-479,917
IV/35/25/3d - III	32	25	3	-569,393
IV/35/25/3d - III	64	25	3	-748,345
IV/35/25/7d - I	4	25	7	305,586
IV/35/25/7d - I	8	25	7	101,862
IV/35/25/7d - I	16	25	7	-40,745
IV/35/25/7d - I	32	25	7	-146,681
IV/35/25/7d - I	64	25	7	-358,554



				Cont.
Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/35/25/7d - II	4	25	7	438,919
IV/35/25/7d - II	8	25	7	98,449
IV/35/25/7d - II	16	25	7	0,000
IV/35/25/7d - II	32	25	7	-98,449
IV/35/25/7d - II	64	25	7	-295,347
IV/35/25/7d - III	4	25	7	474,726
IV/35/25/7d - III	8	25	7	129,840
IV/35/25/7d - III	16	25	7	52,747
IV/35/25/7d - III	32	25	7	-123,077
IV/35/25/7d - III	64	25	7	-474,726
IV/35/50/1d - I	4	50	1	48,872
IV/35/50/1d - I	8	50	1	-272,869
IV/35/50/1d - I	16	50	1	-452,067
IV/35/50/1d - I	32	50	1	-488,721
IV/35/50/1d - I	64	50	1	-533,520
IV/35/50/1d - II	4	50	1	253,148
IV/35/50/1d - II	8	50	1	-249,065
IV/35/50/1d - II	16	50	1	-342,975
IV/35/50/1d - II	32	50	1	-587,957
IV/35/50/1d - II	64	50	1	-714,531
IV/35/50/1d - III	4	50	1	130,485
IV/35/50/1d - III	8	50	1	-517,864
IV/35/50/1d - III	16	50	1	-583,107
IV/35/50/1d - III	32	50	1	-668,738
IV/35/50/1d - III	64	50	1	-758,447
IV/35/50/3d - I	4	50	3	464,506
IV/35/50/3d - I	8	50	3	-57,549
IV/35/50/3d - I	16	50	3	-258,973
IV/35/50/3d - I	32	50	3	-345,297
IV/35/50/3d - I	64	50	3	-522,056
IV/35/50/3d - II	4	50	3	143,363
IV/35/50/3d - II	8	50	3	-331,782
IV/35/50/3d - II	16	50	3	-491,529
IV/35/50/3d - II	32	50	3	-552,970
IV/35/50/3d - II	64	50	3	-540,682
IV/35/50/3d - III	4	50	3	154,325
IV/35/50/3d - III	8	50	3	-393,936
IV/35/50/3d - III	16	50	3	-495,466
IV/35/50/3d - III	32	50	3	-661,975
IV/35/50/3d - III	64	50	3	-832,545

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
IV/35/50/7d - I	4	50	7	134,823
IV/35/50/7d - I	8	50	7	-32,684
IV/35/50/7d - I	16	50	7	-102,139
IV/35/50/7d - I	32	50	7	-202,916
IV/35/50/7d - I	64	50	7	-414,275
IV/35/50/7d - II	4	50	7	175,422
IV/35/50/7d - II	8	50	7	81,402
IV/35/50/7d - II	16	50	7	-40,701
IV/35/50/7d - II	32	50	7	-100,396
IV/35/50/7d - II	64	50	7	-219,786
IV/35/50/7d - III	4	50	7	90,107
IV/35/50/7d - III	8	50	7	-364,526
IV/35/50/7d - III	16	50	7	-450,537
IV/35/50/7d - III	32	50	7	-434,154
IV/35/50/7d - III	64	50	7	-401,388
IV/35/75/1d - I	4	75	1	25,869
IV/35/75/1d - I	8	75	1	-228,913
IV/35/75/1d - I	16	75	1	-280,516
IV/35/75/1d - I	32	75	1	-299,068
IV/35/75/1d - I	64	75	1	-336,172
IV/35/75/1d - II	4	75	1	122,254
IV/35/75/1d - II	8	75	1	-195,607
IV/35/75/1d - II	16	75	1	-338,237
IV/35/75/1d - II	32	75	1	-384,422
IV/35/75/1d - II	64	75	1	-476,792
IV/35/75/1d - III	4	75	1	74,062
IV/35/75/1d - III	8	75	1	-212,260
IV/35/75/1d - III	16	75	1	-309,376
IV/35/75/1d - III	32	75	1	-341,745
IV/35/75/1d - III	64	75	1	-406,482
IV/35/75/3d - I	4	75	3	328,353
IV/35/75/3d - I	8	75	3	-20,269
IV/35/75/3d - I	16	75	3	-97,290
IV/35/75/3d - I	32	75	3	-224,307
IV/35/75/3d - I	64	75	3	-478,341
IV/35/75/3d - II	4	75	3	367,062
IV/35/75/3d - II	8	75	3	-4,078
IV/35/75/3d - II	16	75	3	-114,197
IV/35/75/3d - II	32	75	3	-290,931
IV/35/75/3d - II	64	75	3	-644,398

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/35/75/3d - III	4	75	3	135,249
IV/35/75/3d - III	8	75	3	-20,492
IV/35/75/3d - III	16	75	3	-65,575
IV/35/75/3d - III	32	75	3	-94,265
IV/35/75/3d - III	64	75	3	-151,643
IV/35/75/7d - I	4	75	7	224,452
IV/35/75/7d - I	8	75	7	-126,170
IV/35/75/7d - I	16	75	7	-301,848
IV/35/75/7d - I	32	75	7	-451,577
IV/35/75/7d - I	64	75	7	-440,781
IV/35/75/7d - II	4	75	7	265,922
IV/35/75/7d - II	8	75	7	-106,369
IV/35/75/7d - II	16	75	7	-339,561
IV/35/75/7d - II	32	75	7	-557,753
IV/35/75/7d - II	64	75	7	-510,000
IV/35/75/7d - III	4	75	7	182,982
IV/35/75/7d - III	8	75	7	-145,971
IV/35/75/7d - III	16	75	7	-264,134
IV/35/75/7d - III	32	75	7	-345,400
IV/35/75/7d - III	64	75	7	-371,563

Tabela B8 – Deformações devidas à retração por secagem, CP IV RS, cura 28 dias,  $a/c=0,50$ .

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
IV/50/Ref - I	4	0	1	275,460
IV/50/Ref - I	8	0	1	-259,256
IV/50/Ref - I	16	0	1	-303,816
IV/50/Ref - I	32	0	1	-482,055
IV/50/Ref - I	64	0	1	-625,107
IV/50/Ref - II	4	0	1	159,102
IV/50/Ref - II	8	0	1	-114,227
IV/50/Ref - II	16	0	1	-248,852
IV/50/Ref - II	32	0	1	-575,214
IV/50/Ref - II	64	0	1	-595,730
IV/50/Ref - III	4	0	1	179,874
IV/50/Ref - III	8	0	1	-183,963
IV/50/Ref - III	16	0	1	-286,164
IV/50/Ref - III	32	0	1	-498,743
IV/50/Ref - III	64	0	1	-566,353
IV/50/Ref - I	4	0	3	275,460
IV/50/Ref - I	8	0	3	-259,256
IV/50/Ref - I	16	0	3	-303,816
IV/50/Ref - I	32	0	3	-482,055
IV/50/Ref - I	64	0	3	-625,107
IV/50/Ref - II	4	0	3	159,102
IV/50/Ref - II	8	0	3	-114,227
IV/50/Ref - II	16	0	3	-248,852
IV/50/Ref - II	32	0	3	-575,214
IV/50/Ref - II	64	0	3	-595,730
IV/50/Ref - III	4	0	3	179,874
IV/50/Ref - III	8	0	3	-183,963
IV/50/Ref - III	16	0	3	-286,164
IV/50/Ref - III	32	0	3	-498,743
IV/50/Ref - III	64	0	3	-566,353
IV/50/Ref - I	4	0	7	275,460
IV/50/Ref - I	8	0	7	-259,256
IV/50/Ref - I	16	0	7	-303,816
IV/50/Ref - I	32	0	7	-482,055
IV/50/Ref - I	64	0	7	-625,107
IV/50/Ref - II	4	0	7	159,102
IV/50/Ref - II	8	0	7	-114,227
IV/50/Ref - II	16	0	7	-248,852
IV/50/Ref - II	32	0	7	-575,214
IV/50/Ref - II	64	0	7	-595,730

				Cont.
Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
IV/50/Ref - III	4	0	7	179,874
IV/50/Ref - III	8	0	7	-183,963
IV/50/Ref - III	16	0	7	-286,164
IV/50/Ref - III	32	0	7	-498,743
IV/50/Ref - III	64	0	7	-566,353
IV/50/25/1d - I	4	25	1	171,684
IV/50/25/1d - I	8	25	1	-396,509
IV/50/25/1d - I	16	25	1	-441,474
IV/50/25/1d - I	32	25	1	-588,632
IV/50/25/1d - I	64	25	1	-617,246
IV/50/25/1d - II	4	25	1	255,912
IV/50/25/1d - II	8	25	1	-349,341
IV/50/25/1d - II	16	25	1	-357,465
IV/50/25/1d - II	32	25	1	-410,272
IV/50/25/1d - II	64	25	1	-666,185
IV/50/25/1d - III	4	25	1	370,616
IV/50/25/1d - III	8	25	1	-492,797
IV/50/25/1d - III	16	25	1	-570,179
IV/50/25/1d - III	32	25	1	-606,833
IV/50/25/1d - III	64	25	1	-655,706
IV/50/25/3d - I	4	25	3	183,884
IV/50/25/3d - I	8	25	3	-396,373
IV/50/25/3d - I	16	25	3	-506,704
IV/50/25/3d - I	32	25	3	-539,394
IV/50/25/3d - I	64	25	3	-657,897
IV/50/25/3d - II	4	25	3	208,139
IV/50/25/3d - II	8	25	3	-326,492
IV/50/25/3d - II	16	25	3	-395,872
IV/50/25/3d - II	32	25	3	-526,468
IV/50/25/3d - II	64	25	3	-661,146
IV/50/25/3d - III	4	25	3	85,099
IV/50/25/3d - III	8	25	3	-429,548
IV/50/25/3d - III	16	25	3	-575,432
IV/50/25/3d - III	32	25	3	-607,851
IV/50/25/3d - III	64	25	3	-644,322
IV/50/25/7d - I	4	25	7	76,653
IV/50/25/7d - I	8	25	7	-145,237
IV/50/25/7d - I	16	25	7	-371,162
IV/50/25/7d - I	32	25	7	-338,887
IV/50/25/7d - I	64	25	7	-532,537

				Cont.
Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/50/25/7d - II	4	25	7	260,393
IV/50/25/7d - II	8	25	7	-280,737
IV/50/25/7d - II	16	25	7	-398,727
IV/50/25/7d - II	32	25	7	-435,345
IV/50/25/7d - II	64	25	7	-516,718
IV/50/25/7d - III	4	25	7	233,712
IV/50/25/7d - III	8	25	7	-410,021
IV/50/25/7d - III	16	25	7	-471,524
IV/50/25/7d - III	32	25	7	-504,326
IV/50/25/7d - III	64	25	7	-459,223
IV/50/50/1d - I	4	50	1	191,817
IV/50/50/1d - I	8	50	1	-383,465
IV/50/50/1d - I	16	50	1	-463,041
IV/50/50/1d - I	32	50	1	-628,347
IV/50/50/1d - I	64	50	1	-758,447
IV/50/50/1d - II	4	50	1	253,148
IV/50/50/1d - II	8	50	1	-249,065
IV/50/50/1d - II	16	50	1	-342,975
IV/50/50/1d - II	32	50	1	-587,957
IV/50/50/1d - II	64	50	1	-758,447
IV/50/50/1d - III	4	50	1	130,485
IV/50/50/1d - III	8	50	1	-517,864
IV/50/50/1d - III	16	50	1	-583,107
IV/50/50/1d - III	32	50	1	-668,738
IV/50/50/1d - III	64	50	1	-758,447
IV/50/50/3d - I	4	50	3	464,506
IV/50/50/3d - I	8	50	3	-57,549
IV/50/50/3d - I	16	50	3	-258,973
IV/50/50/3d - I	32	50	3	-345,297
IV/50/50/3d - I	64	50	3	-522,056
IV/50/50/3d - II	4	50	3	143,363
IV/50/50/3d - II	8	50	3	-331,782
IV/50/50/3d - II	16	50	3	-491,529
IV/50/50/3d - II	32	50	3	-552,970
IV/50/50/3d - II	64	50	3	-540,682
IV/50/50/3d - III	4	50	3	154,325
IV/50/50/3d - III	8	50	3	-393,936
IV/50/50/3d - III	16	50	3	-495,466
IV/50/50/3d - III	32	50	3	-661,975
IV/50/50/3d - III	64	50	3	-832,545

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/50/50/7d - I	4	50	7	180,285
IV/50/50/7d - I	8	50	7	-393,349
IV/50/50/7d - I	16	50	7	-438,420
IV/50/50/7d - I	32	50	7	-512,173
IV/50/50/7d - I	64	50	7	-544,952
IV/50/50/7d - II	4	50	7	118,143
IV/50/50/7d - II	8	50	7	-448,127
IV/50/50/7d - II	16	50	7	-525,531
IV/50/50/7d - II	32	50	7	-562,196
IV/50/50/7d - II	64	50	7	-598,861
IV/50/50/7d - III	4	50	7	253,830
IV/50/50/7d - III	8	50	7	-155,573
IV/50/50/7d - III	16	50	7	-417,591
IV/50/50/7d - III	32	50	7	-413,497
IV/50/50/7d - III	64	50	7	-532,224
IV/50/75/1d - I	4	75	1	134,776
IV/50/75/1d - I	8	75	1	-392,077
IV/50/75/1d - I	16	75	1	-449,255
IV/50/75/1d - I	32	75	1	-613,981
IV/50/75/1d - I	64	75	1	-943,435
IV/50/75/1d - II	4	75	1	41,421
IV/50/75/1d - II	8	75	1	-629,606
IV/50/75/1d - II	16	75	1	-596,468
IV/50/75/1d - II	32	75	1	-701,403
IV/50/75/1d - II	64	75	1	-911,271
IV/50/75/1d - III	4	75	1	57,085
IV/50/75/1d - III	8	75	1	-456,682
IV/50/75/1d - III	16	75	1	-366,977
IV/50/75/1d - III	32	75	1	-517,845
IV/50/75/1d - III	64	75	1	-819,582
IV/50/75/3d - I	4	75	3	102,171
IV/50/75/3d - I	8	75	3	-388,248
IV/50/75/3d - I	16	75	3	-449,550
IV/50/75/3d - I	32	75	3	-670,239
IV/50/75/3d - I	64	75	3	-895,014
IV/50/75/3d - II	4	75	3	110,438
IV/50/75/3d - II	8	75	3	-429,479
IV/50/75/3d - II	16	75	3	-531,736
IV/50/75/3d - II	32	75	3	-621,723
IV/50/75/3d - II	64	75	3	-711,709

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/50/75/3d - III	4	75	3	101,277
IV/50/75/3d - III	8	75	3	-405,108
IV/50/75/3d - III	16	75	3	-392,954
IV/50/75/3d - III	32	75	3	-554,997
IV/50/75/3d - III	64	75	3	201,041
IV/50/75/7d - I	4	75	7	324,128
IV/50/75/7d - I	8	75	7	-324,128
IV/50/75/7d - I	16	75	7	-295,408
IV/50/75/7d - I	32	75	7	-439,009
IV/50/75/7d - I	64	75	7	-504,655
IV/50/75/7d - II	4	75	7	423,846
IV/50/75/7d - II	8	75	7	-167,093
IV/50/75/7d - II	16	75	7	-220,074
IV/50/75/7d - II	32	75	7	-305,658
IV/50/75/7d - II	64	75	7	-554,260
IV/50/75/7d - III	4	75	7	40,673
IV/50/75/7d - III	8	75	7	-524,678
IV/50/75/7d - III	16	75	7	-589,755
IV/50/75/7d - III	32	75	7	-707,705
IV/50/75/7d - III	64	75	7	-732,109



Tabela B9 – Deformações devidas à retração por secagem, CP IV RS, cura 28 dias,  $a/c=0,70$ .

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
IV/70/Ref - I	4	0	1	288,476
IV/70/Ref - I	8	0	1	-337,232
IV/70/Ref - I	16	0	1	-406,304
IV/70/Ref - I	32	0	1	-581,015
IV/70/Ref - I	64	0	1	-595,730
IV/70/Ref - II	4	0	1	77,833
IV/70/Ref - II	8	0	1	-245,788
IV/70/Ref - II	16	0	1	-331,814
IV/70/Ref - II	32	0	1	-737,846
IV/70/Ref - II	64	0	1	-728,810
IV/70/Ref - III	4	0	1	183,154
IV/70/Ref - III	8	0	1	-291,510
IV/70/Ref - III	16	0	1	-369,059
IV/70/Ref - III	32	0	1	-669,430
IV/70/Ref - III	64	0	1	-680,876
IV/70/Ref - I	4	0	3	288,476
IV/70/Ref - I	8	0	3	-337,232
IV/70/Ref - I	16	0	3	-406,304
IV/70/Ref - I	32	0	3	-581,015
IV/70/Ref - I	64	0	3	-595,730
IV/70/Ref - II	4	0	3	77,833
IV/70/Ref - II	8	0	3	-245,788
IV/70/Ref - II	16	0	3	-331,814
IV/70/Ref - II	32	0	3	-737,846
IV/70/Ref - II	64	0	3	-728,810
IV/70/Ref - III	4	0	3	183,154
IV/70/Ref - III	8	0	3	-291,510
IV/70/Ref - III	16	0	3	-369,059
IV/70/Ref - III	32	0	3	-669,430
IV/70/Ref - III	64	0	3	-680,876
IV/70/Ref - I	4	0	7	288,476
IV/70/Ref - I	8	0	7	-337,232
IV/70/Ref - I	16	0	7	-406,304
IV/70/Ref - I	32	0	7	-581,015
IV/70/Ref - I	64	0	7	-595,730
IV/70/Ref - II	4	0	7	77,833
IV/70/Ref - II	8	0	7	-245,788
IV/70/Ref - II	16	0	7	-331,814
IV/70/Ref - II	32	0	7	-737,846
IV/70/Ref - II	64	0	7	-728,810

				Cont.
Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/70/Ref - III	4	0	7	183,154
IV/70/Ref - III	4	0	7	183,154
IV/70/Ref - III	8	0	7	-291,510
IV/70/Ref - III	16	0	7	-369,059
IV/70/Ref - III	32	0	7	-669,430
IV/70/Ref - III	64	0	7	-680,876
IV/70/25/1d - I	4	25	1	331,225
IV/70/25/1d - I	8	25	1	-77,695
IV/70/25/1d - I	16	25	1	-314,868
IV/70/25/1d - I	32	25	1	-380,295
IV/70/25/1d - I	64	25	1	-490,703
IV/70/25/1d - II	4	25	1	406,734
IV/70/25/1d - II	8	25	1	-390,465
IV/70/25/1d - II	16	25	1	-601,966
IV/70/25/1d - II	32	25	1	-650,774
IV/70/25/1d - II	64	25	1	-703,650
IV/70/25/1d - III	4	25	1	57,086
IV/70/25/1d - III	8	25	1	-154,948
IV/70/25/1d - III	16	25	1	-371,059
IV/70/25/1d - III	32	25	1	-526,007
IV/70/25/1d - III	64	25	1	-558,627
IV/70/25/3d - I	4	25	3	177,085
IV/70/25/3d - I	8	25	3	-142,483
IV/70/25/3d - I	16	25	3	-476,293
IV/70/25/3d - I	32	25	3	-514,966
IV/70/25/3d - I	64	25	3	-571,958
IV/70/25/3d - II	4	25	3	142,474
IV/70/25/3d - II	8	25	3	-105,838
IV/70/25/3d - II	16	25	3	-504,767
IV/70/25/3d - II	32	25	3	-541,403
IV/70/25/3d - II	64	25	3	-626,888
IV/70/25/3d - III	4	25	3	211,696
IV/70/25/3d - III	8	25	3	-179,128
IV/70/25/3d - III	16	25	3	-447,819
IV/70/25/3d - III	32	25	3	-488,530
IV/70/25/3d - III	64	25	3	-517,027
IV/70/25/7d - I	4	25	7	35,248
IV/70/25/7d - I	8	25	7	-210,667
IV/70/25/7d - I	16	25	7	-222,963
IV/70/25/7d - I	32	25	7	-325,428

				Cont.
Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
IV/70/25/7d - I	64	25	7	-431,991
IV/70/25/7d - II	4	25	7	302,905
IV/70/25/7d - II	8	25	7	-143,266
IV/70/25/7d - II	16	25	7	-233,319
IV/70/25/7d - II	32	25	7	-372,491
IV/70/25/7d - II	64	25	7	-593,530
IV/70/25/7d - III	4	25	7	249,497
IV/70/25/7d - III	8	25	7	102,253
IV/70/25/7d - III	16	25	7	-257,677
IV/70/25/7d - III	32	25	7	-372,200
IV/70/25/7d - III	64	25	7	-490,814
IV/70/50/1d - I	4	50	1	434,198
IV/70/50/1d - I	8	50	1	-327,697
IV/70/50/1d - I	16	50	1	-401,429
IV/70/50/1d - I	32	50	1	-487,449
IV/70/50/1d - I	64	50	1	-573,470
IV/70/50/1d - II	4	50	1	290,943
IV/70/50/1d - II	8	50	1	-483,539
IV/70/50/1d - II	16	50	1	-483,539
IV/70/50/1d - II	32	50	1	-573,691
IV/70/50/1d - II	64	50	1	-663,842
IV/70/50/1d - III	4	50	1	334,475
IV/70/50/1d - III	8	50	1	-371,186
IV/70/50/1d - III	16	50	1	-509,871
IV/70/50/1d - III	32	50	1	-603,687
IV/70/50/1d - III	64	50	1	-697,504
IV/70/50/3d - I	4	50	3	230,511
IV/70/50/3d - I	8	50	3	-218,163
IV/70/50/3d - I	16	50	3	-226,395
IV/70/50/3d - I	32	50	3	-448,674
IV/70/50/3d - I	64	50	3	-675,069
IV/70/50/3d - II	4	50	3	230,511
IV/70/50/3d - II	8	50	3	-218,163
IV/70/50/3d - II	16	50	3	-226,395
IV/70/50/3d - II	32	50	3	-448,674
IV/70/50/3d - II	64	50	3	-675,069
IV/70/50/3d - III	4	50	3	356,527
IV/70/50/3d - III	8	50	3	-406,275
IV/70/50/3d - III	16	50	3	-460,168
IV/70/50/3d - III	32	50	3	-489,188

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/70/50/3d - III	64	50	3	-580,393
IV/70/50/7d - I	4	50	7	243,316
IV/70/50/7d - I	8	50	7	12,166
IV/70/50/7d - I	16	50	7	-133,824
IV/70/50/7d - I	32	50	7	-332,532
IV/70/50/7d - I	64	50	7	-555,571
IV/70/50/7d - II	4	50	7	419,380
IV/70/50/7d - II	8	50	7	90,455
IV/70/50/7d - II	16	50	7	-45,227
IV/70/50/7d - II	32	50	7	-263,141
IV/70/50/7d - II	64	50	7	-456,384
IV/70/50/7d - III	4	50	7	381,532
IV/70/50/7d - III	8	50	7	-150,178
IV/70/50/7d - III	16	50	7	-223,237
IV/70/50/7d - III	32	50	7	-328,767
IV/70/50/7d - III	64	50	7	-641,299
IV/70/75/1d - I	4	75	1	479,770
IV/70/75/1d - I	8	75	1	-126,041
IV/70/75/1d - I	16	75	1	-321,202
IV/70/75/1d - I	32	75	1	-397,098
IV/70/75/1d - I	64	75	1	-548,890
IV/70/75/1d - II	4	75	1	227,564
IV/70/75/1d - II	8	75	1	-371,932
IV/70/75/1d - II	16	75	1	-477,965
IV/70/75/1d - II	32	75	1	-543,216
IV/70/75/1d - II	64	75	1	-673,719
IV/70/75/1d - III	4	75	1	310,543
IV/70/75/1d - III	8	75	1	-167,530
IV/70/75/1d - III	16	75	1	-547,535
IV/70/75/1d - III	32	75	1	-630,619
IV/70/75/1d - III	64	75	1	-796,787
IV/70/75/3d - I	4	75	3	403,177
IV/70/75/3d - I	8	75	3	-146,610
IV/70/75/3d - I	16	75	3	-423,541
IV/70/75/3d - I	32	75	3	-525,353
IV/70/75/3d - I	64	75	3	-580,332
IV/70/75/3d - II	4	75	3	496,840
IV/70/75/3d - II	8	75	3	-171,043
IV/70/75/3d - II	16	75	3	-362,449
IV/70/75/3d - II	32	75	3	-521,275

Cont.

Identificação	Idade (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/70/75/3d - II	64	75	3	-590,506
IV/70/75/3d - III	4	75	3	309,514
IV/70/75/3d - III	8	75	3	-122,177
IV/70/75/3d - III	16	75	3	-484,634
IV/70/75/3d - III	32	75	3	-529,432
IV/70/75/3d - III	64	75	3	-570,158
IV/70/75/7d - I	4	75	7	159,551
IV/70/75/7d - I	8	75	7	-204,161
IV/70/75/7d - I	16	75	7	-317,429
IV/70/75/7d - I	32	75	7	-331,924
IV/70/75/7d - I	64	75	7	-441,440
IV/70/75/7d - II	4	75	7	77,762
IV/70/75/7d - II	8	75	7	-216,915
IV/70/75/7d - II	16	75	7	-356,069
IV/70/75/7d - II	32	75	7	-364,254
IV/70/75/7d - II	64	75	7	-454,294
IV/70/75/7d - III	4	75	7	241,340
IV/70/75/7d - III	8	75	7	-191,407
IV/70/75/7d - III	16	75	7	-278,789
IV/70/75/7d - III	32	75	7	-299,594
IV/70/75/7d - III	64	75	7	-428,586

Tabela B10 – Resultados de retração por secagem, cimento CP IV, cura 7 dias, a/c=0,35.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{\text{sec}} (10^{-6})$
IV/35/Ref - I	1	0	1	402,006
IV/35/Ref - I	4	0	1	52,789
IV/35/Ref - I	8	0	1	-223,337
IV/35/Ref - I	16	0	1	-174,609
IV/35/Ref - I	32	0	1	-353,278
IV/35/Ref - I	64	0	1	-556,323
IV/35/Ref - II	1	0	1	431,835
IV/35/Ref - II	4	0	1	-28,517
IV/35/Ref - II	8	0	1	-256,657
IV/35/Ref - II	16	0	1	-321,839
IV/35/Ref - II	32	0	1	-395,170
IV/35/Ref - II	64	0	1	-529,231
IV/35/Ref - III	1	0	1	325,436
IV/35/Ref - III	4	0	1	-142,378
IV/35/Ref - III	8	0	1	-390,523
IV/35/Ref - III	16	0	1	-370,184
IV/35/Ref - III	32	0	1	-394,591
IV/35/Ref - III	64	0	1	-583,416
IV/35/Ref - I	1	0	3	426,380
IV/35/Ref - I	4	0	3	77,155
IV/35/Ref - I	8	0	3	-198,977
IV/35/Ref - I	16	0	3	-150,248
IV/35/Ref - I	32	0	3	-328,922
IV/35/Ref - I	64	0	3	-377,651
IV/35/Ref - II	1	0	3	431,835
IV/35/Ref - II	4	0	3	-28,517
IV/35/Ref - II	8	0	3	-256,657
IV/35/Ref - II	16	0	3	-321,839
IV/35/Ref - II	32	0	3	-395,170
IV/35/Ref - II	64	0	3	-429,231
IV/35/Ref - III	1	0	3	325,436
IV/35/Ref - III	4	0	3	-142,378
IV/35/Ref - III	8	0	3	-390,523
IV/35/Ref - III	16	0	3	-370,184
IV/35/Ref - III	32	0	3	-394,591
IV/35/Ref - III	64	0	3	-583,416
IV/35/Ref - I	1	0	7	426,380
IV/35/Ref - I	4	0	7	77,155
IV/35/Ref - I	8	0	7	-198,977
IV/35/Ref - I	16	0	7	-150,248

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
IV/35/Ref - I	32	0	7	-328,922
IV/35/Ref - I	64	0	7	-377,651
IV/35/Ref - II	1	0	7	431,835
IV/35/Ref - II	4	0	7	-28,517
IV/35/Ref - II	8	0	7	-256,657
IV/35/Ref - II	16	0	7	-321,839
IV/35/Ref - II	32	0	7	-395,170
IV/35/Ref - II	64	0	7	-429,231
IV/35/Ref - III	1	0	7	325,436
IV/35/Ref - III	4	0	7	-142,378
IV/35/Ref - III	8	0	7	-390,523
IV/35/Ref - III	16	0	7	-370,184
IV/35/Ref - III	32	0	7	-394,591
IV/35/Ref - III	64	0	7	-583,416
IV/35/25/1d - I	1	25	1	142,185
IV/35/25/1d - I	4	25	1	-353,432
IV/35/25/1d - I	8	25	1	-568,740
IV/35/25/1d - I	16	25	1	-613,427
IV/35/25/1d - I	32	25	1	-682,488
IV/35/25/1d - I	64	25	1	-832,798
IV/35/25/1d - II	1	25	1	122,166
IV/35/25/1d - II	4	25	1	-223,971
IV/35/25/1d - II	8	25	1	-447,941
IV/35/25/1d - II	16	25	1	-537,529
IV/35/25/1d - II	32	25	1	-525,313
IV/35/25/1d - II	64	25	1	-655,623
IV/35/25/1d - III	1	25	1	180,821
IV/35/25/1d - III	4	25	1	-287,669
IV/35/25/1d - III	8	25	1	-369,860
IV/35/25/1d - III	16	25	1	-534,243
IV/35/25/1d - III	32	25	1	-563,010
IV/35/25/1d - III	64	25	1	-731,502
IV/35/25/3d - I	1	25	3	89,328
IV/35/25/3d - I	4	25	3	-458,822
IV/35/25/3d - I	8	25	3	-641,538
IV/35/25/3d - I	16	25	3	-552,210
IV/35/25/3d - I	32	25	3	-694,323
IV/35/25/3d - I	64	25	3	-812,074
IV/35/25/3d - I	1	25	3	16,335
IV/35/25/3d - II	4	25	3	-424,719
IV/35/25/3d - II	8	25	3	-588,072

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/35/25/3d - II	16	25	3	-653,413
IV/35/25/3d - II	32	25	3	-784,096
IV/35/25/3d - II	64	25	3	-902,527
IV/35/25/3d - III	1	25	3	16,282
IV/35/25/3d - III	4	25	3	-398,907
IV/35/25/3d - III	8	25	3	-582,079
IV/35/25/3d - III	16	25	3	-561,727
IV/35/25/3d - III	32	25	3	-696,053
IV/35/25/3d - III	64	25	3	-858,872
IV/35/25/7d - II	1	25	7	203,307
IV/35/25/7d - I	4	25	7	-272,432
IV/35/25/7d - I	8	25	7	-371,375
IV/35/25/7d - I	16	25	7	-569,261
IV/35/25/7d - I	32	25	7	-565,195
IV/35/25/7d - I	64	25	7	-552,996
IV/35/25/7d - II	1	25	7	301,574
IV/35/25/7d - II	4	25	7	-268,972
IV/35/25/7d - II	8	25	7	-460,512
IV/35/25/7d - II	16	25	7	-480,889
IV/35/25/7d - II	32	25	7	-513,491
IV/35/25/7d - II	64	25	7	-456,437
IV/35/25/7d - III	1	25	7	252,838
IV/35/25/7d - III	4	25	7	-179,434
IV/35/25/7d - III	8	25	7	-350,711
IV/35/25/7d - III	16	25	7	-399,648
IV/35/25/7d - III	32	25	7	-415,960
IV/35/25/7d - III	64	25	7	-452,662
IV/35/50/1d - I	1	50	1	32,901
IV/35/50/1d - I	4	50	1	-579,872
IV/35/50/1d - I	8	50	1	-727,925
IV/35/50/1d - I	16	50	1	-789,613
IV/35/50/1d - I	32	50	1	-851,302
IV/35/50/1d - I	64	50	1	-921,216
IV/35/50/1d - II	1	50	1	32,901
IV/35/50/1d - II	4	50	1	-579,872
IV/35/50/1d - II	8	50	1	-727,925
IV/35/50/1d - II	16	50	1	-789,613
IV/35/50/1d - II	32	50	1	-851,302
IV/35/50/1d - II	64	50	1	-921,216
IV/35/50/1d - III	1	50	1	0,000
IV/35/50/1d - III	4	50	1	-480,186



Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
IV/35/50/1d - III	8	50	1	-667,377
IV/35/50/1d - III	16	50	1	-683,655
IV/35/50/1d - III	32	50	1	-716,210
IV/35/50/1d - III	64	50	1	-793,528
IV/35/50/3d - I	1	50	3	36,581
IV/35/50/3d - I	4	50	3	-601,548
IV/35/50/3d - I	8	50	3	-719,419
IV/35/50/3d - I	16	50	3	-703,161
IV/35/50/3d - I	32	50	3	-833,225
IV/35/50/3d - I	64	50	3	-1125,870
IV/35/50/3d - II	1	50	3	-24,433
IV/35/50/3d - II	4	50	3	-468,298
IV/35/50/3d - II	8	50	3	-651,545
IV/35/50/3d - II	16	50	3	-610,824
IV/35/50/3d - II	32	50	3	-708,556
IV/35/50/3d - II	64	50	3	-993,607
IV/35/50/3d - III	1	50	3	8,206
IV/35/50/3d - III	4	50	3	-336,427
IV/35/50/3d - III	8	50	3	-615,415
IV/35/50/3d - III	16	50	3	-562,079
IV/35/50/3d - III	32	50	3	-754,909
IV/35/50/3d - III	64	50	3	-968,253
IV/35/50/7d - I	1	50	7	380,989
IV/35/50/7d - I	4	50	7	24,396
IV/35/50/7d - I	8	50	7	-264,293
IV/35/50/7d - I	16	50	7	-333,416
IV/35/50/7d - I	32	50	7	-394,407
IV/35/50/7d - I	64	50	7	-439,133
IV/35/50/7d - II	1	50	7	65,291
IV/35/50/7d - II	4	50	7	-330,538
IV/35/50/7d - II	8	50	7	-493,767
IV/35/50/7d - II	16	50	7	-632,511
IV/35/50/7d - II	32	50	7	-606,667
IV/35/50/7d - II	64	50	7	-554,977
IV/35/50/7d - III	1	50	7	318,409
IV/35/50/7d - III	4	50	7	-240,848
IV/35/50/7d - III	8	50	7	-436,792
IV/35/50/7d - III	16	50	7	-498,024
IV/35/50/7d - III	32	50	7	-572,864
IV/35/50/7d - III	64	50	7	-702,133
IV/35/75/1d - I	1	75	1	174,770

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
IV/35/75/1d - I	4	75	1	-56,902
IV/35/75/1d - I	8	75	1	-329,217
IV/35/75/1d - I	16	75	1	-467,407
IV/35/75/1d - I	32	75	1	-743,788
IV/35/75/1d - I	64	75	1	-764,110
IV/35/75/1d - II	1	75	1	134,790
IV/35/75/1d - II	4	75	1	-404,370
IV/35/75/1d - II	8	75	1	-669,866
IV/35/75/1d - II	16	75	1	-645,359
IV/35/75/1d - II	32	75	1	-800,572
IV/35/75/1d - II	64	75	1	-845,502
IV/35/75/1d - III	1	75	1	203,331
IV/35/75/1d - III	4	75	1	-365,995
IV/35/75/1d - III	8	75	1	-561,192
IV/35/75/1d - III	16	75	1	-654,724
IV/35/75/1d - III	32	75	1	-825,522
IV/35/75/1d - III	64	75	1	-870,255
IV/35/75/3d - I	1	75	3	32,580
IV/35/75/3d - I	4	75	3	-229,417
IV/35/75/3d - I	8	75	3	-435,756
IV/35/75/3d - I	16	75	3	-623,091
IV/35/75/3d - I	32	75	3	-602,729
IV/35/75/3d - I	64	75	3	-737,121
IV/35/75/3d - II	1	75	3	456,288
IV/35/75/3d - II	4	75	3	-69,258
IV/35/75/3d - II	8	75	3	-248,514
IV/35/75/3d - II	16	75	3	-232,218
IV/35/75/3d - II	32	75	3	-309,624
IV/35/75/3d - II	64	75	3	-611,100
IV/35/75/3d - III	1	75	3	427,267
IV/35/75/3d - III	4	75	3	-138,353
IV/35/75/3d - III	8	75	3	-402,852
IV/35/75/3d - III	16	75	3	-394,713
IV/35/75/3d - III	32	75	3	-472,028
IV/35/75/3d - III	64	75	3	-667,350
IV/35/75/7d - I	1	75	7	361,593
IV/35/75/7d - I	4	75	7	-60,943
IV/35/75/7d - I	8	75	7	-117,822
IV/35/75/7d - I	16	75	7	-251,896
IV/35/75/7d - I	32	75	7	-381,907
IV/35/75/7d - I	64	75	7	-528,170

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
IV/35/75/7d - II	1	75	7	460,829
IV/35/75/7d - II	4	75	7	-171,282
IV/35/75/7d - II	8	75	7	-212,063
IV/35/75/7d - II	16	75	7	-338,485
IV/35/75/7d - II	32	75	7	-468,986
IV/35/75/7d - II	64	75	7	-595,408
IV/35/75/7d - III	1	75	7	220,570
IV/35/75/7d - III	4	75	7	-359,448
IV/35/75/7d - III	8	75	7	-334,940
IV/35/75/7d - III	16	75	7	-620,864
IV/35/75/7d - III	32	75	7	-567,764
IV/35/75/7d - III	64	75	7	-714,811

Tabela B11 – Resultados de retração por secagem, cimento CP IV, cura 7 dias, a/c=0,50.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{\text{sec}} (10^{-6})$
IV/50/Ref - I	1	0	1	20,452
IV/50/Ref - I	4	0	1	-128,624
IV/50/Ref - I	8	0	1	-274,063
IV/50/Ref - I	16	0	1	-368,145
IV/50/Ref - I	32	0	1	-566,308
IV/50/Ref - I	64	0	1	-658,552
IV/50/Ref - II	1	0	1	16,445
IV/50/Ref - II	4	0	1	-69,889
IV/50/Ref - II	8	0	1	-324,779
IV/50/Ref - II	16	0	1	-518,003
IV/50/Ref - II	32	0	1	-506,593
IV/50/Ref - II	64	0	1	-673,254
IV/50/Ref - III	1	0	1	91,713
IV/50/Ref - III	4	0	1	-45,276
IV/50/Ref - III	8	0	1	-251,077
IV/50/Ref - III	16	0	1	-325,166
IV/50/Ref - III	32	0	1	-466,878
IV/50/Ref - III	64	0	1	-627,956
IV/50/Ref - I	1	0	3	20,452
IV/50/Ref - I	4	0	3	-128,624
IV/50/Ref - I	8	0	3	-274,063
IV/50/Ref - I	16	0	3	-368,145
IV/50/Ref - I	32	0	3	-566,308
IV/50/Ref - I	64	0	3	-658,552
IV/50/Ref - II	1	0	3	16,445
IV/50/Ref - II	4	0	3	-69,889
IV/50/Ref - II	8	0	3	-324,779
IV/50/Ref - II	16	0	3	-518,003
IV/50/Ref - II	32	0	3	-506,593
IV/50/Ref - II	64	0	3	-673,254
IV/50/Ref - III	1	0	3	91,713
IV/50/Ref - III	4	0	3	-45,276
IV/50/Ref - III	8	0	3	-251,077
IV/50/Ref - III	16	0	3	-325,166
IV/50/Ref - III	32	0	3	-466,878
IV/50/Ref - III	64	0	3	-627,956
IV/50/Ref - I	1	0	7	20,452
IV/50/Ref - I	4	0	7	-128,624
IV/50/Ref - I	8	0	7	-274,063
IV/50/Ref - I	16	0	7	-368,145

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec} (10^{-6})$
IV/50/Ref - I	32	0	7	-566,308
IV/50/Ref - I	64	0	7	-658,552
IV/50/Ref - II	1	0	7	16,445
IV/50/Ref - II	4	0	7	-69,889
IV/50/Ref - II	8	0	7	-324,779
IV/50/Ref - II	16	0	7	-518,003
IV/50/Ref - II	32	0	7	-506,593
IV/50/Ref - II	64	0	7	-673,254
IV/50/Ref - III	1	0	7	91,713
IV/50/Ref - III	4	0	7	-45,276
IV/50/Ref - III	8	0	7	-251,077
IV/50/Ref - III	16	0	7	-325,166
IV/50/Ref - III	32	0	7	-466,878
IV/50/Ref - III	64	0	7	-627,956
IV/50/25/1d - I	1	25	1	143,506
IV/50/25/1d - I	4	25	1	-299,313
IV/50/25/1d - I	8	25	1	-697,030
IV/50/25/1d - I	16	25	1	-746,232
IV/50/25/1d - I	32	25	1	-885,638
IV/50/25/1d - I	64	25	1	-1131,648
IV/50/25/1d - II	1	25	1	49,052
IV/50/25/1d - II	4	25	1	-12,263
IV/50/25/1d - II	8	25	1	-396,507
IV/50/25/1d - II	16	25	1	-494,612
IV/50/25/1d - II	32	25	1	-633,594
IV/50/25/1d - II	64	25	1	-776,664
IV/50/25/1d - III	1	25	1	94,556
IV/50/25/1d - III	4	25	1	-263,112
IV/50/25/1d - III	8	25	1	-559,114
IV/50/25/1d - III	16	25	1	-637,225
IV/50/25/1d - III	32	25	1	-719,448
IV/50/25/1d - III	64	25	1	-937,338
IV/50/25/3d - I	1	25	3	237,044
IV/50/25/3d - I	4	25	3	-134,870
IV/50/25/3d - I	8	25	3	-384,175
IV/50/25/3d - I	16	25	3	-425,045
IV/50/25/3d - I	32	25	3	-576,263
IV/50/25/3d - I	64	25	3	-719,307
IV/50/25/3d - I	1	25	3	-146,887
IV/50/25/3d - II	4	25	3	-293,773
IV/50/25/3d - II	8	25	3	-718,112

Cont.

<b>Identificação</b>	<b>Idade leitura (semanas)</b>	<b>Carregamento (%)</b>	<b>Idade de carregamento (dias)</b>	<b><math>\epsilon_{\text{sec}}</math> (<math>10^{-6}</math>)</b>
IV/50/25/3d - II	16	25	3	-822,837
IV/50/25/3d - II	32	25	3	-1032,286
IV/50/25/3d - II	64	25	3	-999,645
IV/50/25/3d - III	1	25	3	-20,355
IV/50/25/3d - III	4	25	3	-378,611
IV/50/25/3d - III	8	25	3	-557,738
IV/50/25/3d - III	16	25	3	-606,591
IV/50/25/3d - III	32	25	3	-716,510
IV/50/25/3d - III	64	25	3	-826,429
IV/50/25/7d - II	1	25	7	85,833
IV/50/25/7d - I	4	25	7	-114,445
IV/50/25/7d - I	8	25	7	-412,818
IV/50/25/7d - I	16	25	7	-506,826
IV/50/25/7d - I	32	25	7	-592,659
IV/50/25/7d - I	64	25	7	-801,112
IV/50/25/7d - II	1	25	7	49,551
IV/50/25/7d - II	4	25	7	-309,692
IV/50/25/7d - II	8	25	7	-433,569
IV/50/25/7d - II	16	25	7	-578,092
IV/50/25/7d - II	32	25	7	-722,615
IV/50/25/7d - II	64	25	7	-730,873
IV/50/25/7d - III	1	25	7	270,025
IV/50/25/7d - III	4	25	7	16,365
IV/50/25/7d - III	8	25	7	-151,378
IV/50/25/7d - III	16	25	7	-270,025
IV/50/25/7d - III	32	25	7	-462,315
IV/50/25/7d - III	64	25	7	-544,141
IV/50/50/1d - I	1	50	1	301,566
IV/50/50/1d - I	4	50	1	-78,490
IV/50/50/1d - I	8	50	1	-470,938
IV/50/50/1d - I	16	50	1	-512,249
IV/50/50/1d - I	32	50	1	-632,049
IV/50/50/1d - I	64	50	1	-784,897
IV/50/50/1d - II	1	50	1	217,186
IV/50/50/1d - II	4	50	1	-274,556
IV/50/50/1d - II	8	50	1	-737,614
IV/50/50/1d - II	16	50	1	-807,278
IV/50/50/1d - II	32	50	1	-889,235
IV/50/50/1d - II	64	50	1	-1081,834
IV/50/50/1d - III	1	50	1	-65,772
IV/50/50/1d - III	4	50	1	-267,198

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/50/50/1d - III	8	50	1	-1122,233
IV/50/50/1d - III	16	50	1	-1159,230
IV/50/50/1d - III	32	50	1	-1245,555
IV/50/50/1d - III	64	50	1	-1446,982
IV/50/50/3d - I	1	50	3	431,107
IV/50/50/3d - I	4	50	3	-168,337
IV/50/50/3d - I	8	50	3	-435,213
IV/50/50/3d - I	16	50	3	-915,589
IV/50/50/3d - I	32	50	3	-948,435
IV/50/50/3d - I	64	50	3	-1026,445
IV/50/50/3d - II	1	50	3	352,786
IV/50/50/3d - II	4	50	3	0,000
IV/50/50/3d - II	8	50	3	-389,705
IV/50/50/3d - II	16	50	3	-418,420
IV/50/50/3d - II	32	50	3	-561,996
IV/50/50/3d - II	64	50	3	-537,383
IV/50/50/3d - III	1	50	3	391,946
IV/50/50/3d - III	4	50	3	-84,169
IV/50/50/3d - III	8	50	3	-412,459
IV/50/50/3d - III	16	50	3	-667,005
IV/50/50/3d - III	32	50	3	-755,216
IV/50/50/3d - III	64	50	3	-781,914
IV/50/50/7d - I	1	50	7	-16,429
IV/50/50/7d - I	4	50	7	-197,143
IV/50/50/7d - I	8	50	7	-620,179
IV/50/50/7d - I	16	50	7	-685,894
IV/50/50/7d - I	32	50	7	-813,215
IV/50/50/7d - I	64	50	7	-1096,608
IV/50/50/7d - II	1	50	7	186,908
IV/50/50/7d - II	4	50	7	-89,391
IV/50/50/7d - II	8	50	7	-390,068
IV/50/50/7d - II	16	50	7	-459,142
IV/50/50/7d - II	32	50	7	-422,574
IV/50/50/7d - II	64	50	7	-463,206
IV/50/50/7d - III	1	50	7	4,109
IV/50/50/7d - III	4	50	7	-304,085
IV/50/50/7d - III	8	50	7	-604,061
IV/50/50/7d - III	16	50	7	-653,372
IV/50/50/7d - III	32	50	7	-698,574
IV/50/50/7d - III	64	50	7	-788,977
IV/50/75/1d - I	1	75	1	219,723

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/50/75/1d - I	4	75	1	-65,103
IV/50/75/1d - I	8	75	1	-476,066
IV/50/75/1d - I	16	75	1	-524,894
IV/50/75/1d - I	32	75	1	-545,239
IV/50/75/1d - I	64	75	1	-707,996
IV/50/75/1d - II	1	75	1	241,794
IV/50/75/1d - II	4	75	1	-405,723
IV/50/75/1d - II	8	75	1	-803,249
IV/50/75/1d - II	16	75	1	-954,883
IV/50/75/1d - II	32	75	1	-1024,552
IV/50/75/1d - II	64	75	1	-1151,597
IV/50/75/1d - III	1	75	1	309,432
IV/50/75/1d - III	4	75	1	-122,144
IV/50/75/1d - III	8	75	1	-476,363
IV/50/75/1d - III	16	75	1	-545,578
IV/50/75/1d - III	32	75	1	-627,008
IV/50/75/1d - III	64	75	1	-838,725
IV/50/75/3d - I	1	75	3	16,288
IV/50/75/3d - I	4	75	3	-264,682
IV/50/75/3d - I	8	75	3	-427,563
IV/50/75/3d - I	16	75	3	-618,948
IV/50/75/3d - I	32	75	3	-708,533
IV/50/75/3d - I	64	75	3	-928,422
IV/50/75/3d - II	1	75	3	134,115
IV/50/75/3d - II	4	75	3	-373,896
IV/50/75/3d - II	8	75	3	-475,498
IV/50/75/3d - II	16	75	3	-596,065
IV/50/75/3d - II	32	75	3	-837,201
IV/50/75/3d - II	64	75	3	-885,970
IV/50/75/3d - III	1	75	3	28,678
IV/50/75/3d - III	4	75	3	-294,974
IV/50/75/3d - III	8	75	3	-426,074
IV/50/75/3d - III	16	75	3	-569,464
IV/50/75/3d - III	32	75	3	-618,627
IV/50/75/3d - III	64	75	3	-684,177
IV/50/75/7d - I	1	75	7	40,859
IV/50/75/7d - I	4	75	7	-461,709
IV/50/75/7d - I	8	75	7	-494,396
IV/50/75/7d - I	16	75	7	-580,200
IV/50/75/7d - I	32	75	7	-584,286
IV/50/75/7d - I	64	75	7	-739,551



Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{\text{sec}} (10^{-6})$
IV/50/75/7d - II	1	75	7	136,117
IV/50/75/7d - II	4	75	7	-486,722
IV/50/75/7d - II	8	75	7	-519,721
IV/50/75/7d - II	16	75	7	-552,719
IV/50/75/7d - II	32	75	7	-527,970
IV/50/75/7d - II	64	75	7	-692,961
IV/50/75/7d - III	1	75	7	88,488
IV/50/75/7d - III	4	75	7	-474,216
IV/50/75/7d - III	8	75	7	-507,058
IV/50/75/7d - III	16	75	7	-566,460
IV/50/75/7d - III	32	75	7	-556,128
IV/50/75/7d - III	64	75	7	-716,256

Tabela B12 – Resultados de retração por secagem, cimento CP IV, cura 7 dias, a/c=0,70.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{\text{sec}} (10^{-6})$
IV/70/Ref - I	1	0	1	-121,533
IV/70/Ref - I	4	0	1	-283,576
IV/70/Ref - I	8	0	1	-465,876
IV/70/Ref - I	16	0	1	-619,817
IV/70/Ref - I	32	0	1	-623,737
IV/70/Ref - I	64	0	1	-632,883
IV/70/Ref - II	1	0	1	-202,888
IV/70/Ref - II	4	0	1	-442,297
IV/70/Ref - II	8	0	1	-620,838
IV/70/Ref - II	16	0	1	-693,878
IV/70/Ref - II	32	0	1	-701,994
IV/70/Ref - II	64	0	1	-725,748
IV/70/Ref - III	1	0	1	-162,211
IV/70/Ref - III	4	0	1	-362,936
IV/70/Ref - III	8	0	1	-543,357
IV/70/Ref - III	16	0	1	-656,848
IV/70/Ref - III	32	0	1	-662,865
IV/70/Ref - III	64	0	1	-679,316
IV/70/Ref - I	1	0	3	-121,533
IV/70/Ref - I	4	0	3	-283,576
IV/70/Ref - I	8	0	3	-465,876
IV/70/Ref - I	16	0	3	-619,817
IV/70/Ref - I	32	0	3	-623,737
IV/70/Ref - I	64	0	3	-632,883
IV/70/Ref - II	1	0	3	-202,888
IV/70/Ref - II	4	0	3	-442,297
IV/70/Ref - II	8	0	3	-620,838
IV/70/Ref - II	16	0	3	-693,878
IV/70/Ref - II	32	0	3	-701,994
IV/70/Ref - II	64	0	3	-725,748
IV/70/Ref - III	1	0	3	-162,211
IV/70/Ref - III	4	0	3	-362,936
IV/70/Ref - III	8	0	3	-543,357
IV/70/Ref - III	16	0	3	-656,848
IV/70/Ref - III	32	0	3	-662,865
IV/70/Ref - III	64	0	3	-679,316
IV/70/Ref - I	1	0	7	-121,533
IV/70/Ref - I	4	0	7	-283,576
IV/70/Ref - I	8	0	7	-465,876
IV/70/Ref - I	16	0	7	-619,817

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/70/Ref - I	32	0	7	-623,737
IV/70/Ref - I	64	0	7	-632,883
IV/70/Ref - II	1	0	7	-202,888
IV/70/Ref - II	4	0	7	-442,297
IV/70/Ref - II	8	0	7	-620,838
IV/70/Ref - II	16	0	7	-693,878
IV/70/Ref - II	32	0	7	-701,994
IV/70/Ref - II	64	0	7	-725,748
IV/70/Ref - III	1	0	7	-162,211
IV/70/Ref - III	4	0	7	-362,936
IV/70/Ref - III	8	0	7	-543,357
IV/70/Ref - III	16	0	7	-656,848
IV/70/Ref - III	32	0	7	-662,865
IV/70/Ref - III	64	0	7	-679,316
IV/70/25/1d - I	1	25	1	-101,870
IV/70/25/1d - I	4	25	1	-162,991
IV/70/25/1d - I	8	25	1	-220,038
IV/70/25/1d - I	16	25	1	-419,702
IV/70/25/1d - I	32	25	1	-456,375
IV/70/25/1d - I	64	25	1	-664,189
IV/70/25/1d - II	1	25	1	-125,594
IV/70/25/1d - II	4	25	1	-287,651
IV/70/25/1d - II	8	25	1	-433,502
IV/70/25/1d - II	16	25	1	-555,045
IV/70/25/1d - II	32	25	1	-607,713
IV/70/25/1d - II	64	25	1	-826,490
IV/70/25/1d - III	1	25	1	4,046
IV/70/25/1d - III	4	25	1	-347,936
IV/70/25/1d - III	8	25	1	-343,890
IV/70/25/1d - III	16	25	1	-473,355
IV/70/25/1d - III	32	25	1	-538,087
IV/70/25/1d - III	64	25	1	-724,192
IV/70/25/3d - I	1	25	3	48,708
IV/70/25/3d - I	4	25	3	-190,774
IV/70/25/3d - I	8	25	3	-316,603
IV/70/25/3d - I	16	25	3	-462,728
IV/70/25/3d - I	32	25	3	-507,377
IV/70/25/3d - I	64	25	3	-588,558
IV/70/25/3d - I	1	25	3	-255,253
IV/70/25/3d - II	4	25	3	-445,680
IV/70/25/3d - II	8	25	3	-518,609

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{\text{sec}} (10^{-6})$
IV/70/25/3d - II	16	25	3	-806,275
IV/70/25/3d - II	32	25	3	-826,533
IV/70/25/3d - II	64	25	3	-559,775
IV/70/25/3d - III	1	25	3	65,353
IV/70/25/3d - III	4	25	3	-167,467
IV/70/25/3d - III	8	25	3	-306,341
IV/70/25/3d - III	16	25	3	-306,341
IV/70/25/3d - III	32	25	3	-539,161
IV/70/25/3d - III	64	25	3	-530,992
IV/70/25/7d - II	1	25	7	-48,795
IV/70/25/7d - I	4	25	7	-65,060
IV/70/25/7d - I	8	25	7	-268,371
IV/70/25/7d - I	16	25	7	-361,895
IV/70/25/7d - I	32	25	7	-435,087
IV/70/25/7d - I	64	25	7	-544,875
IV/70/25/7d - II	1	25	7	-97,166
IV/70/25/7d - II	4	25	7	-182,187
IV/70/25/7d - II	8	25	7	-481,783
IV/70/25/7d - II	16	25	7	-518,221
IV/70/25/7d - II	32	25	7	-591,096
IV/70/25/7d - II	64	25	7	-704,456
IV/70/25/7d - III	1	25	7	32,475
IV/70/25/7d - III	4	25	7	-466,827
IV/70/25/7d - III	8	25	7	-483,064
IV/70/25/7d - III	16	25	7	-515,539
IV/70/25/7d - III	32	25	7	-430,293
IV/70/25/7d - III	64	25	7	-491,183
IV/70/50/1d - I	1	50	1	-69,315
IV/70/50/1d - I	4	50	1	-224,255
IV/70/50/1d - I	8	50	1	-485,207
IV/70/50/1d - I	16	50	1	-481,130
IV/70/50/1d - I	32	50	1	-566,755
IV/70/50/1d - I	64	50	1	-799,165
IV/70/50/1d - II	1	50	1	-112,363
IV/70/50/1d - II	4	50	1	-345,115
IV/70/50/1d - II	8	50	1	-501,621
IV/70/50/1d - II	16	50	1	-585,894
IV/70/50/1d - II	32	50	1	-682,205
IV/70/50/1d - II	64	50	1	-995,217
IV/70/50/1d - III	1	50	1	-61,159
IV/70/50/1d - III	4	50	1	-207,940

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/70/50/1d - III	8	50	1	-358,799
IV/70/50/1d - III	16	50	1	-680,902
IV/70/50/1d - III	32	50	1	-721,674
IV/70/50/1d - III	64	50	1	-766,524
IV/70/50/3d - I	1	50	3	-159,603
IV/70/50/3d - I	4	50	3	-478,810
IV/70/50/3d - I	8	50	3	-507,456
IV/70/50/3d - I	16	50	3	-564,750
IV/70/50/3d - I	32	50	3	-675,244
IV/70/50/3d - I	64	50	3	-769,369
IV/70/50/3d - II	1	50	3	-216,375
IV/70/50/3d - II	4	50	3	-289,861
IV/70/50/3d - II	8	50	3	-363,347
IV/70/50/3d - II	16	50	3	-502,154
IV/70/50/3d - II	32	50	3	-526,649
IV/70/50/3d - II	64	50	3	-604,217
IV/70/50/3d - III	1	50	3	-20,454
IV/70/50/3d - III	4	50	3	16,363
IV/70/50/3d - III	8	50	3	-94,089
IV/70/50/3d - III	16	50	3	-314,994
IV/70/50/3d - III	32	50	3	-359,993
IV/70/50/3d - III	64	50	3	-454,082
IV/70/50/7d - I	1	50	7	-205,334
IV/70/50/7d - I	4	50	7	-434,825
IV/70/50/7d - I	8	50	7	-499,243
IV/70/50/7d - I	16	50	7	-491,191
IV/70/50/7d - I	32	50	7	-519,374
IV/70/50/7d - I	64	50	7	-664,315
IV/70/50/7d - II	1	50	7	-243,382
IV/70/50/7d - II	4	50	7	-446,200
IV/70/50/7d - II	8	50	7	-640,906
IV/70/50/7d - II	16	50	7	-722,033
IV/70/50/7d - II	32	50	7	-705,808
IV/70/50/7d - II	64	50	7	-928,908
IV/70/50/7d - III	1	50	7	48,757
IV/70/50/7d - III	4	50	7	-264,099
IV/70/50/7d - III	8	50	7	-414,432
IV/70/50/7d - III	16	50	7	-503,819
IV/70/50/7d - III	32	50	7	-524,135
IV/70/50/7d - III	64	50	7	-743,540
IV/70/75/1d - I	1	75	1	-48,664

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{sec}$ ( $10^{-6}$ )
IV/70/75/1d - I	4	75	1	-255,486
IV/70/75/1d - I	8	75	1	-539,359
IV/70/75/1d - I	16	75	1	-575,857
IV/70/75/1d - I	32	75	1	-592,078
IV/70/75/1d - I	64	75	1	-701,572
IV/70/75/1d - II	1	75	1	-32,353
IV/70/75/1d - II	4	75	1	-125,369
IV/70/75/1d - II	8	75	1	-420,591
IV/70/75/1d - II	16	75	1	-400,370
IV/70/75/1d - II	32	75	1	-412,503
IV/70/75/1d - II	64	75	1	-748,167
IV/70/75/1d - III	1	75	1	-32,543
IV/70/75/1d - III	4	75	1	-187,120
IV/70/75/1d - III	8	75	1	-393,222
IV/70/75/1d - III	16	75	1	-805,428
IV/70/75/1d - III	32	75	1	-1216,278
IV/70/75/1d - III	64	75	1	-1277,295
IV/70/75/3d - I	1	75	3	-133,526
IV/70/75/3d - I	4	75	3	-271,099
IV/70/75/3d - I	8	75	3	-436,996
IV/70/75/3d - I	16	75	3	-590,753
IV/70/75/3d - I	32	75	3	-631,216
IV/70/75/3d - I	64	75	3	-776,881
IV/70/75/3d - II	1	75	3	-61,015
IV/70/75/3d - II	4	75	3	-191,181
IV/70/75/3d - II	8	75	3	-248,129
IV/70/75/3d - II	16	75	3	-439,310
IV/70/75/3d - II	32	75	3	-504,393
IV/70/75/3d - II	64	75	3	-683,371
IV/70/75/3d - III	1	75	3	8,073
IV/70/75/3d - III	4	75	3	-266,402
IV/70/75/3d - III	8	75	3	-403,639
IV/70/75/3d - III	16	75	3	-581,240
IV/70/75/3d - III	32	75	3	-609,495
IV/70/75/3d - III	64	75	3	-742,696
IV/70/75/7d - I	1	75	7	-223,597
IV/70/75/7d - I	4	75	7	-203,270
IV/70/75/7d - I	8	75	7	-365,886
IV/70/75/7d - I	16	75	7	-556,960
IV/70/75/7d - I	32	75	7	-536,633
IV/70/75/7d - I	64	75	7	-638,268

Cont.

Identificação	Idade leitura (semanas)	Carregamento (%)	Idade de carregamento (dias)	$\epsilon_{\text{sec}} (10^{-6})$
IV/70/75/7d - II	1	75	7	-123,178
IV/70/75/7d - II	4	75	7	-332,581
IV/70/75/7d - II	8	75	7	-344,898
IV/70/75/7d - II	16	75	7	-414,699
IV/70/75/7d - II	32	75	7	-693,903
IV/70/75/7d - II	64	75	7	-644,631
IV/70/75/7d - III	1	75	7	-127,108
IV/70/75/7d - III	4	75	7	-340,320
IV/70/75/7d - III	8	75	7	-508,430
IV/70/75/7d - III	16	75	7	-844,650
IV/70/75/7d - III	32	75	7	-975,858
IV/70/75/7d - III	64	75	7	-1061,963

## APÊNDICE C –MODELO CEB-FIP MODEL CODE 1990

Retração por secagem de acordo com o CEB (Comitê Euro-Internacional Du Beton, 1990):

$$\varepsilon_s(t, t_s) = \varepsilon_{CSO} \cdot \beta_s(t - t_s) \dots \dots \dots [1]$$

Sendo:

$\varepsilon_s(t, t_s)$  = retração por secagem

t = idade do concreto (dias)

$t_s$  = idade do concreto no início da secagem (dias)

$$\varepsilon_{CSO} = \varepsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \dots \dots \dots [2]$$

Com:

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = [160 + \beta_{SC} \cdot (90 - f_{cm})] \cdot 10^{-6} \dots \dots \dots [3]$$

Onde:

RH = umidade relativa do ambiente, em %

$$\beta_{SC} \begin{cases} 4 & \text{Para cimentos de endurecimento lento} \\ 5 & \text{Para cimentos de endurecimento normal ou rápido} \\ 8 & \text{Para cimentos de endurecimento e de elevada resistência} \end{cases} \dots \dots \dots [4]$$

e

$$\beta_{RH} \begin{cases} -1,55 & 40\% \leq RH < 99\% \\ \cdot \beta_{sRH} & \\ +0,25 & RH \geq 99\% \end{cases} \dots \dots \dots [5]$$

Onde:

$$\beta_{sRH} = 1 - (RH / 100)^3 \dots \dots \dots [6]$$

O desenvolvimento da retração com o tempo é descrito por:

$$\beta_s(t - t_s) = [(t - t_s) / (\beta_{sH} + t - t_s)]^{0,5} \dots \dots \dots [7]$$

Com:

$$\beta_{sH} = 0,035 \cdot h_0^2 \dots \dots \dots [8]$$



Onde:

$$h_0 = 2A_C / u \text{ (mm)} \dots\dots\dots[9]$$

O efeito da temperatura ambiente, considerando-se o tempo de desenvolvimento da retração, pode ser estimado por [8], para temperaturas dentro do intervalo  $5^\circ\text{C} \leq T < 80^\circ\text{C}$ .

$$\beta_{sH,T} = \beta_{sH} \cdot \beta_{sHT} \dots\dots\dots[10]$$

Com:

$$\beta_{sHT} = e^{-0,06(T-20)} \dots\dots\dots[11]$$

Sendo:

T = temperatura em  $^\circ\text{C}$

O efeito da temperatura na magnitude da retração é levado em consideração substituindo-se  $\beta_{RH}$  na equação [2] por  $\beta_{RH,T}$  o qual é calculado por:

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH} \cdot \beta_{sT} \dots\dots\dots[12]$$

Com:

$$\beta_{sT} = 1 + (8 / (103 - RH)) \cdot ((T-20) / 40) \dots\dots\dots[13]$$

Onde:

$\beta_{RH}$  é calculado a partir de [4]. RH e T são dados em % e  $^\circ\text{C}$ , respectivamente.

Tabela C1 – Valores das deformações residuais devidas à retração por secagem, conforme modelo proposto pelo CEB 90 e conforme resultados obtidos nos ensaios realizados

Cimento	Relação água cimento / cura	$\epsilon_{sec448\text{dias}} (10^{-6})$	
		Modelo CEB 90	Ensaio
CP V ARI	0,35 / 7 dias	-693,60	-713,28
	0,35 / 28 dias	-643,60	-556,93
	0,50 / 7 dias	-823,30	-827,37
	0,50 / 28 dias	-749,10	-745,29
	0,70 / 7 dias	-973,50	-978,32
	0,70 / 28 dias	-941,30	-916,27
CP IV RS	0,35 / 7 dias	-490,90	-556,32
	0,35 / 28 dias	-442,90	-504,12
	0,50 / 7 dias	-557,80	-653,25
	0,50 / 28 dias	-499,90	-595,73
	0,70 / 7 dias	-612,30	-679,32
	0,70 / 28 dias	-587,70	-668,47

## APÊNDICE D – PROPRIEDADES MECÂNICAS

Tabela D1 – Resistências à compressão axial (NBR 5739, 2007), resistências à tração por compressão diametral (NBR 7222, 2011), conforme Vieira (2008), e resistências à tração na flexão (NBR 12142, ABNT, 2010)

CP VARI					
Relação a/c	Idade (dias)	Fc (MPa)	Ft (MPa)		
			Ftc,sp (MPa)	Fct,fl (MPa) - cura 28 dias	Fct,fl (MPa) - cura 7 dias
0,35	1			4,43	4,79
	3	40,40	3,11	5,72	5,56
	7	42,60	3,16	6,27	5,77
	28	47,30	3,74	7,63	6,40
0,50	1			2,86	3,06
	3	26,70	2,57	4,37	3,98
	7	30,00	2,60	4,75	4,62
	28	34,10	2,82	5,27	4,78
0,70	1			1,90	1,79
	3	12,20	1,11	3,12	2,65
	7	15,40	1,42	3,76	3,50
	28	18,30	1,58	4,90	4,27
CP IVRS					
Relação a/c	Idade (dias)	Fc (MPa)	Ft (MPa)		
			Ftc,sp (MPa)	Fct,fl (MPa) - cura 28 dias	Fct,fl (MPa) - cura 7 dias
0,35	1	13,60	1,53	1,80	2,76
	3	26,70	2,06	3,30	3,92
	7	34,60	2,48	4,30	5,10
	28	43,70	3,17	5,40	5,29
0,50	1	5,70	0,57	1,15	1,94
	3	14,80	1,14	2,27	2,48
	7	21,60	2,05	3,95	3,94
	28	32,60	2,12	4,40	4,12
0,70	1	2,40	0,12	0,46	0,62
	3	6,60	0,75	2,17	2,13
	7	11,00	1,24	2,84	2,95
	28	15,50	1,56	3,89	2,83

Tabela D2 – Equações de correlação logarítmica relativas às curvas das resistências à tração na flexão em função da idade dos concretos e respectivos coeficientes de determinação.

Cimento	a/c	Equação de correlação logarítmica - cura 7 dias	$r^2$	Equação de correlação logarítmica - cura 28 dias	$r^2$
CP VARI	0,35	$Fct,fl = 0,465 \ln (Idade) + 4,886$	0,97	$Fct,fl = 0,939 \ln (Idade) + 4,512$	0,99
	0,50	$Fct,fl = 0,519 \ln (Idade) + 3,281$	0,88	$Fct,fl = 0,690 \ln (Idade) + 3,211$	0,88
	0,70	$Fct,fl = 0,755 \ln (Idade) + 1,846$	0,99	$Fct,fl = 0,885 \ln (Idade) + 2,007$	0,99
CP IVRS	0,35	$Fct,fl = 0,783 \ln (Idade) + 3,019$	0,88	$Fct,fl = 1,077 \ln (Idade) + 1,982$	0,98
	0,50	$Fct,fl = 0,711 \ln (Idade) + 1,984$	0,87	$Fct,fl = 1,024 \ln (Idade) + 1,308$	0,92
	0,70	$Fct,fl = 0,660 \ln (Idade) + 1,078$	0,75	$Fct,fl = 1,003 \ln (Idade) + 0,740$	0,96

## APÊNDICE E –COMPORTAMENTO FRENTE À RETRAÇÃO POR SECAGEM DOS CONCRETOS - TABELAS

Tabela E1 – Equações de correlação logarítmica das curvas de deformação devidas à retração por secagem ( $\mathcal{E}_{\text{sec}}$ ), em função do tempo de secagem (TS) e respectivos coeficientes de determinação.

a/c	<i>Cura 28 dias</i>			
	CP V ARI		CP IV RS	
	REF	75%	REF	75%
0,35	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-194\ln(\text{TS})+223$ $R^2 = 0,97$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-172\ln(\text{TS})+252$ $R^2 = 0,80$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-270\ln(\text{TS})+619$ $R^2 = 0,99$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-230\ln(\text{TS})+437$ $R^2 = 0,94$
0,50	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-321\ln(\text{TS})+540$ $R^2 = 0,95$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-174\ln(\text{TS})+159$ $R^2 = 0,79$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-279\ln(\text{TS})+499$ $R^2 = 0,93$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-262\ln(\text{TS})+368$ $R^2 = 0,80$
0,70	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-380\ln(\text{TS})+569$ $R^2 = 0,96$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-213\ln(\text{TS})+470$ $R^2 = 0,92$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-299\ln(\text{TS})+468$ $R^2 = 0,88$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-285\ln(\text{TS})+532$ $R^2 = 0,88$
a/c	<i>Cura 7 dias</i>			
	CP V ARI		CP IV RS	
	REF	75%	REF	75%
0,35	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-211\ln(\text{TS})+141$ $R^2 = 0,95$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-201\ln(\text{TS})+51$ $R^2 = 0,98$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-213\ln(\text{TS})+298$ $R^2 = 0,94$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-209\ln(\text{TS})+62$ $R^2 = 0,93$
0,50	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-186\ln(\text{TS})+61$ $R^2 = 0,93$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-188\ln(\text{TS})+21$ $R^2 = 0,94$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-173\ln(\text{TS})+86$ $R^2 = 0,98$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-238\ln(\text{TS})+84$ $R^2 = 0,97$
0,70	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-223\ln(\text{TS})+83$ $R^2 = 0,99$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-120\ln(\text{TS})+79$ $R^2 = 0,94$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-132\ln(\text{TS})+204$ $R^2 = 0,91$	$\mathcal{E}_{\text{sec}}=-156\ln(\text{TS})+75$ $R^2 = 0,99$

## APÊNDICE F – VOLUME DOS CONSTITUINTES DO CONCRETO

### POROSIDADE

Apresenta-se, a seguir, o desenvolvimento do cálculo do volume dos constituintes do concreto com cimento CP V ARI, relação  $a/c=0,50$  e grau de hidratação  $\alpha=100\%$ . Os volumes dos constituintes (resistentes e não resistentes) dos demais concretos foram determinados adotando-se a mesma sequência de passos. A partir do traço unitário e das massas específicas dos materiais utilizados, foram definidos os volumes ocupados por cada constituinte. A Tabela F1 apresenta o traço utilizado para o concreto com CP V ARI,  $a/c=0,50$  e as massas específicas dos materiais.

Tabela F1: Traço utilizado para o concreto com CP V ARI,  $a/c=0,50$   
e as massas específicas dos materiais

CP V ARI; $a/c=0,35$	<i>cimento</i>	<i>ag. miúdo</i>	<i>ag. graúdo</i>	<i>água</i>
Traço unitário	1	2,09	2,74	0,50
Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	3,12	2,62	2,73	1,00

Foram adotados para o volume de água necessário para as reações de hidratação, o valor  $V_{\text{hid}}=0,22 \text{ dm}^3$  e, como contração química,  $C_q=25\%$ . A Tabela F2 apresenta os volumes absolutos e percentuais do concreto no estado fresco.

Tabela F2: Volume dos constituintes do concreto com CP V ARI,  
 $a/c=0,50$  no estado fresco.

<i>Volume concreto fresco</i>	<i>absoluto</i>	<i>%</i>
Volume ocupado pelo cimento: $V_c=1/3,12$	0,32	12,1
Volume ocupado pelo agregado miúdo: $V_a=2,09/2,62$	0,80	30,0
Volume ocupado pelo agregado graúdo: $V_b=2,74/2,73$	1,00	37,7
Volume ocupado pela água: $V_h=0,50/1,00$	0,50	18,8
Volume de ar aprisionado: $V_{ar}=1,4\%$	0,04	1,4
<i>Volume total adensado <math>V_t=(V_c+V_a+V_b)/(1-V_{ar})</math></i>	2,66	100,0

A Tabela F3 apresenta os volumes absolutos e percentuais do concreto no estado endurecido e a Tabela F4 apresenta a síntese dos volumes calculados, identificando o volume total.

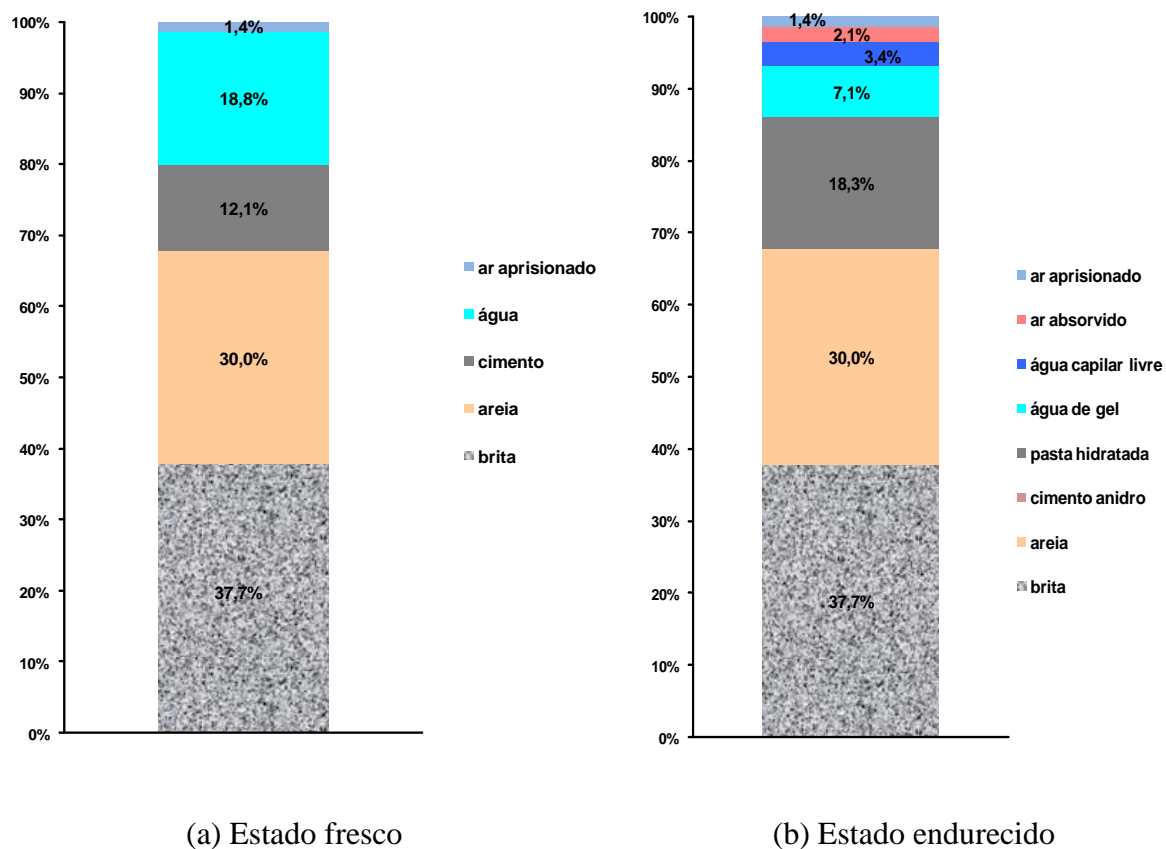
Tabela F3: Volume dos constituintes do concreto com CP V ARI,  $a/c=0,50$  no estado endurecido.

<i>Volume concreto endurecido</i>	<i>absoluto</i>	<i>%</i>
Volume do cimento anidro:	0,00	0,0
Volume da pasta hidratada: $V_{ph}= 0,32 \times 1,0 + 0,22 \times 1,0 \times (1-0,25)$	0,49	18,3
Volume de água adsorvida (ág.de gel): $V_{gel}=(0,28 \times 0,49)/(1-0,28)$	0,19	7,1
Volume da água capilar (água livre): $V_{hc}=0,50-0,22 \times 1,0-0,19$	0,09	3,4
Volume de vazios devido à $C_q$ : $V_v= 0,22 \times 1,0 \times 0,25$	0,06	2,1

Tabela F4 – Volumes dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos com CP V ARI e relação  $a/c=0,50$ , para diferentes graus de hidratação  $\alpha=100\%$ .

<i>Concreto endurecido</i>		<i>Volume absoluto (dm<sup>3</sup>)</i>	<i>Volume (%)</i>		
<i>Compostos resistentes</i>	Cimento anidro	0,00	0,0	93,1	
	Pasta hidratada	Produtos de hidratação	0,49		18,3
		Poros de gel	0,19		7,1
	Areia	0,80	30,0		
	Brita	1,00	37,7		
<i>Porosidade</i>	Ar aprisionado	0,04	1,4	6,9	
	Retração química	0,06	2,1		
	Água capilar (livre)	0,09	3,4		
<i>Total</i>		2,66	100,0	100,0	

Figura F1 – Volumes dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos produzidos com cimento CP V ARI e relação  $a/c=0,50$ , para diferentes o grau de hidratação  $\alpha=100\%$ , sendo (a) estado fresco e (b) estado endurecido



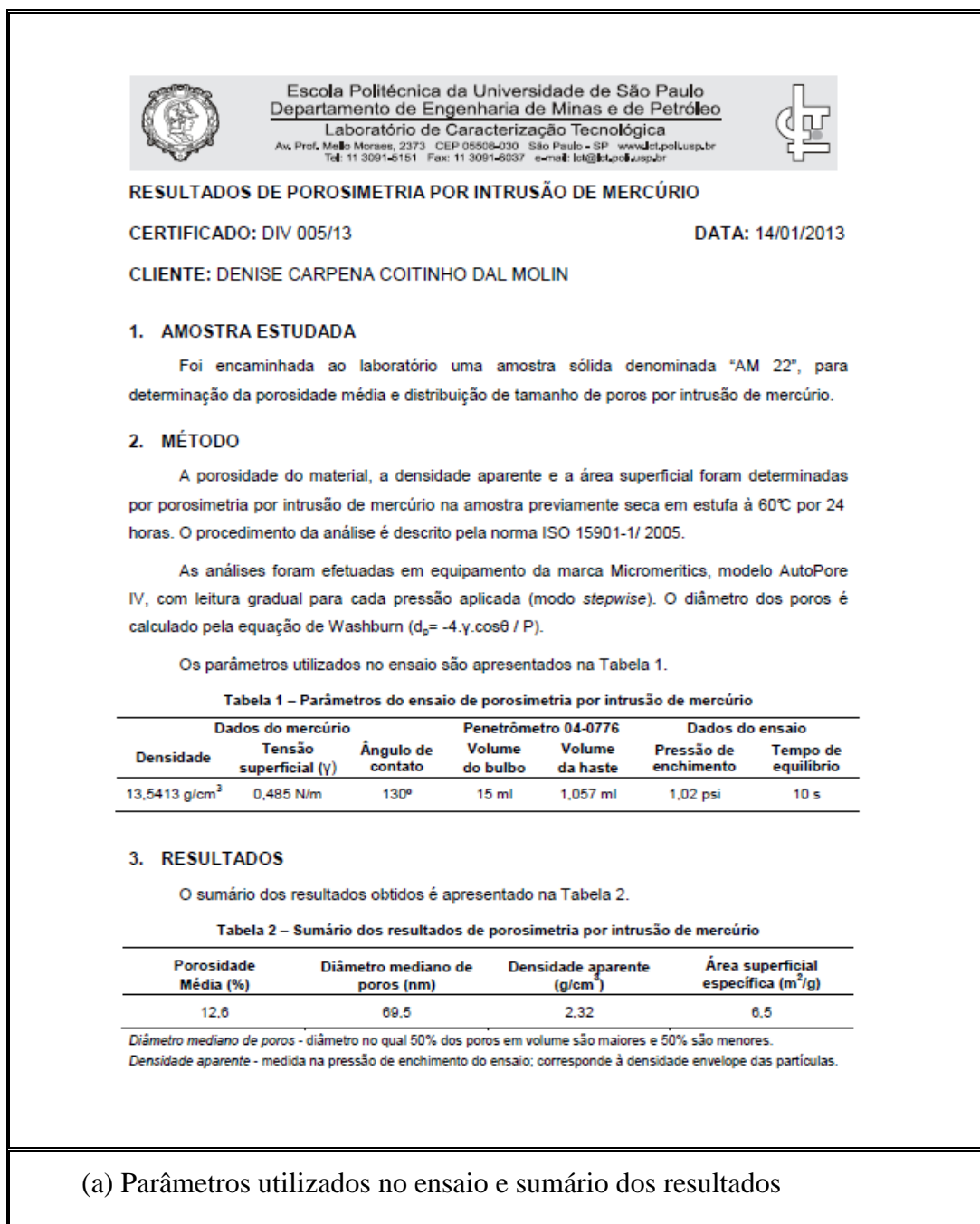
## APÊNDICE G

### RESULTADOS DO ENSAIO DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

Tabela G1 - Posição das amostras para o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio nos corpos de prova

<i>Amostra</i>	<i>Idade de cura</i>	<i>Pré-carregamento</i>	<i>Posição da retirada da amostra</i>
Amostra 22	3 dias	0%	Centro do corpo de prova
Amostra 23		75%	Superior: aplicação da carga
Amostra 24		75%	Inferior: meio do vão
Amostra 28	28 dias	0%	Centro do corpo de prova
Amostra 29		75%	Superior: aplicação da carga
Amostra 30		75%	Inferior: meio do vão

Figura G1 - Amostra 22: (a) parâmetros utilizados no ensaio e sumário dos resultados; (b) distribuição do tamanho dos poros







Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.pol.usp.br  
Tel: 11 3091-6151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.pol.usp.br



Tabela 3 – Distribuição de tamanho de poros

Pressão (psi)	Diâmetro de poros (nm)	Hg introduzido (ml/g)	Pressão (psi)	Diâmetro de poros (nm)	Hg introduzido (ml/g)
1,02	176917,1	0,0000	244,08	830,0	0,0003
1,53	131699,9	0,0001	302,68	669,3	0,0003
1,88	107283,1	0,0001	374,36	540,3	0,0005
2,32	87144,1	0,0000	462,94	436,9	0,0007
2,87	70452,3	0,0000	575,18	352,6	0,0008
3,55	56941,9	0,0000	711,22	284,4	0,0009
4,39	46045,2	0,0001	877,76	230,2	0,0009
5,44	37213,4	0,0000	1085,04	186,4	0,0011
6,72	30081,5	0,0000	1345,67	150,5	0,0018
8,31	24340,0	0,0000	1662,28	121,6	0,0030
10,26	19698,9	0,0000	2053,21	98,4	0,0054
12,68	15942,0	0,0000	2539,07	79,7	0,0076
15,73	12877,1	0,0000	3138,18	64,4	0,0075
19,44	10400,6	0,0000	3880,24	52,1	0,0043
24,00	8421,7	0,0000	4786,89	42,2	0,0023
29,64	6819,3	0,0000	5919,68	34,2	0,0027
33,50	5750,0	0,0000	7321,59	27,6	0,0024
42,37	4833,8	0,0000	9037,87	22,4	0,0023
52,83	3846,2	0,0000	11187,90	18,1	0,0020
66,02	3081,5	0,0001	13832,24	14,6	0,0016
82,77	2462,3	0,0000	17105,59	11,8	0,0013
102,85	1971,9	0,0002	21155,49	9,6	0,0014
128,30	1584,1	0,0001	26169,25	7,7	0,0009
158,58	1275,1	0,0002	32352,59	6,3	0,0009
196,81	1029,8	0,0004	39951,76	5,1	0,0007

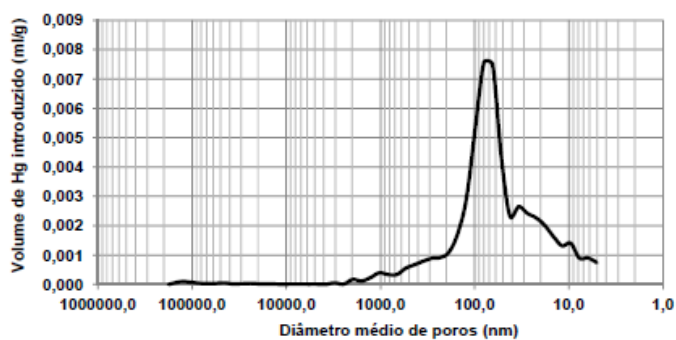


Figura 1 - Distribuição de tamanho de poros

(b) Distribuição do tamanho dos poros



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
 Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
 Laboratório de Caracterização Tecnológica  
 Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05506-030 São Paulo - SP www.lct.pol.usp.br  
 Tel: 11 3091-5151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.pol.usp.br



## RESULTADOS DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

CERTIFICADO: DIV 006/13

DATA: 14/01/2013

CLIENTE: DENISE CARPENA COITINHO DAL MOLIN

### 1. AMOSTRA ESTUDADA

Foi encaminhada ao laboratório uma amostra sólida denominada "AM 23", para determinação da porosidade média e distribuição de tamanho de poros por intrusão de mercúrio.

### 2. MÉTODO

A porosidade do material, a densidade aparente e a área superficial foram determinadas por porosimetria por intrusão de mercúrio na amostra previamente seca em estufa à 60°C por 24 horas. O procedimento da análise é descrito pela norma ISO 15901-1/ 2005.

As análises foram efetuadas em equipamento da marca Micromeritics, modelo AutoPore IV, com leitura gradual para cada pressão aplicada (modo *stepwise*). O diâmetro dos poros é calculado pela equação de Washburn ( $d_p = -4 \cdot \gamma \cdot \cos\theta / P$ ).

Os parâmetros utilizados no ensaio são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Densidade	Dados do mercúrio		Penetrômetro 04-0776		Dados do ensaio	
	Tensão superficial ( $\gamma$ )	Ângulo de contato	Volume do bulbo	Volume da haste	Pressão de enchimento	Tempo de equilíbrio
13,5413 g/cm <sup>3</sup>	0,485 N/m	130°	15 ml	1,057 ml	1,02 psi	10 s

### 3. RESULTADOS

O sumário dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Sumário dos resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio

Porosidade Média (%)	Diâmetro mediano de poros (nm)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)
9,2	74,5	2,48	4,4

Diâmetro mediano de poros - diâmetro no qual 50% dos poros em volume são maiores e 50% são menores.

Densidade aparente - medida na pressão de enchimento de mercúrio correspondendo à densidade aparente do material.

(a) Parâmetros utilizados no ensaio e sumário dos resultados



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
 Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
 Laboratório de Caracterização Tecnológica  
 Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.polusp.br  
 Tel: 11 3091-6151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.polusp.br



Tabela 3 – Distribuição de tamanho de poros

Pressão (psi)	Diâmetro de poros (nm)	Hg introduzido (ml/g)	Pressão (psi)	Diâmetro de poros (nm)	Hg introduzido (ml/g)
1,02	176917,1	0,0000	244,08	830,0	0,0004
1,53	131699,9	0,0001	302,68	669,3	0,0004
1,88	107283,1	0,0000	374,36	540,3	0,0005
2,32	87144,1	0,0000	462,94	436,9	0,0005
2,87	70452,3	0,0000	575,18	352,6	0,0005
3,55	56941,9	0,0000	711,22	284,4	0,0005
4,39	46045,2	0,0000	877,76	230,2	0,0006
5,44	37213,4	0,0000	1085,04	185,4	0,0007
6,72	30081,5	0,0000	1345,67	150,5	0,0013
8,31	24340,0	0,0000	1662,28	121,6	0,0027
10,26	19698,9	0,0000	2053,21	98,4	0,0046
12,68	15942,0	0,0000	2539,07	79,7	0,0049
15,73	12877,1	0,0000	3138,18	64,4	0,0036
19,44	10400,6	0,0000	3880,24	52,1	0,0023
24,00	8421,7	0,0000	4786,89	42,2	0,0015
29,64	6819,3	0,0000	5919,68	34,2	0,0018
33,50	5750,0	0,0000	7321,59	27,6	0,0016
42,37	4833,8	0,0000	9037,87	22,4	0,0015
52,83	3846,2	0,0000	11187,90	18,1	0,0013
66,02	3081,5	0,0001	13832,24	14,6	0,0011
82,77	2462,3	0,0001	17105,59	11,8	0,0008
102,85	1971,9	0,0002	21155,49	9,6	0,0007
128,30	1584,1	0,0003	26169,25	7,7	0,0007
158,58	1275,1	0,0003	32352,59	6,3	0,0006
196,81	1029,8	0,0003	39951,76	5,1	0,0008

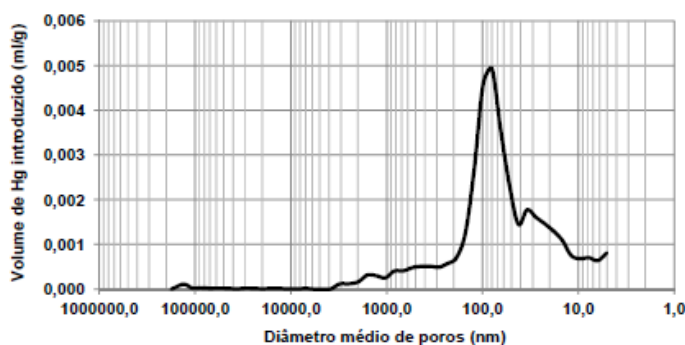


Figura 1 - Distribuição de tamanho de poros

(b) Distribuição do tamanho dos poros



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
 Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
 Laboratório de Caracterização Tecnológica  
 Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.pol.usp.br  
 Tel: 11 3091-6151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.pol.usp.br



## RESULTADOS DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

CERTIFICADO: DIV 007/13

DATA: 14/01/2013

CLIENTE: DENISE CARPENA COITINHO DAL MOLIN

### 1. AMOSTRA ESTUDADA

Foi encaminhada ao laboratório uma amostra sólida denominada "AM 24", para determinação da porosidade média e distribuição de tamanho de poros por intrusão de mercúrio.

### 2. MÉTODO

A porosidade do material, a densidade aparente e a área superficial foram determinadas por porosimetria por intrusão de mercúrio na amostra previamente seca em estufa à 60°C por 24 horas. O procedimento da análise é descrito pela norma ISO 15901-1/ 2005.

As análises foram efetuadas em equipamento da marca Micromeritics, modelo AutoPore IV, com leitura gradual para cada pressão aplicada (modo *stepwise*). O diâmetro dos poros é calculado pela equação de Washburn ( $d_p = -4 \cdot \gamma \cdot \cos \theta / P$ ).

Os parâmetros utilizados no ensaio são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Densidade	Dados do mercúrio		Penetrômetro 04-0776		Dados do ensaio	
	Tensão superficial ( $\gamma$ )	Ângulo de contato	Volume do bulbo	Volume da haste	Pressão de enchimento	Tempo de equilíbrio
13,5413 g/cm <sup>3</sup>	0,485 N/m	130°	15 ml	1,057 ml	1,02 psi	10 s

### 3. RESULTADOS

O sumário dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Sumário dos resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio

Porosidade Média (%)	Diâmetro mediano de poros (nm)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)
12,5	80,6	2,35	5,9

Diâmetro mediano de poros - diâmetro no qual 50% dos poros em volume são maiores e 50% são menores.

Densidade aparente - medida na pressão de enchimento do ensaio; corresponde à densidade envelope das partículas.

(a) Parâmetros utilizados no ensaio e sumário dos resultados



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.pol.usp.br  
Tel: 11 3091-5151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.pol.usp.br



Tabela 3 – Distribuição de tamanho de poros

Pressão (psi)	Diâmetro de poros (nm)	Hg introduzido (ml/g)	Pressão (psi)	Diâmetro de poros (nm)	Hg introduzido (ml/g)
1,02	176917,1	0,0000	244,08	830,0	0,0004
1,53	131699,9	0,0003	302,68	669,3	0,0004
1,88	107283,1	0,0001	374,36	540,3	0,0006
2,32	87144,1	0,0001	462,94	436,9	0,0009
2,87	70452,3	0,0001	575,18	352,6	0,0012
3,55	56941,9	0,0001	711,22	284,4	0,0006
4,39	46045,2	0,0001	877,76	230,2	0,0007
5,44	37213,4	0,0000	1085,04	186,4	0,0009
6,72	30081,5	0,0000	1345,67	150,5	0,0015
8,31	24340,0	0,0000	1662,28	121,6	0,0032
10,26	19698,9	0,0000	2053,21	98,4	0,0062
12,68	15942,0	0,0000	2539,07	79,7	0,0085
15,73	12877,1	0,0000	3138,18	64,4	0,0056
19,44	10400,6	0,0016	3880,24	52,1	0,0030
24,00	8421,7	0,0004	4786,89	42,2	0,0019
29,64	6819,3	0,0001	5919,68	34,2	0,0023
33,50	5750,0	0,0000	7321,59	27,6	0,0022
42,37	4833,8	0,0001	9037,87	22,4	0,0020
52,83	3846,2	0,0000	11187,90	18,1	0,0018
66,02	3081,5	0,0002	13832,24	14,6	0,0014
82,77	2462,3	0,0001	17105,59	11,8	0,0012
102,85	1971,9	0,0001	21155,49	9,6	0,0010
128,30	1584,1	0,0002	26169,25	7,7	0,0010
158,58	1275,1	0,0002	32352,59	6,3	0,0010
196,81	1029,8	0,0002	39951,76	5,1	0,0007

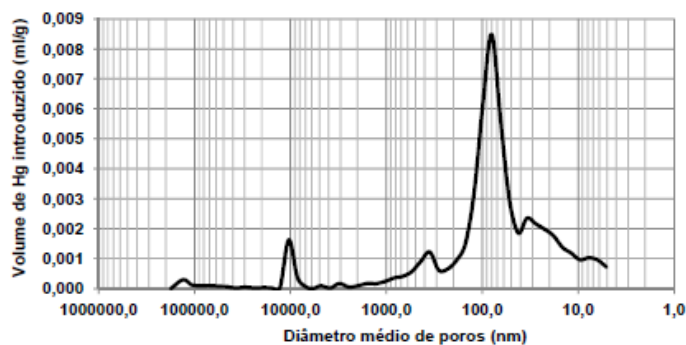


Figura 1 - Distribuição de tamanho de poros

(b) Distribuição do tamanho dos poros



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 - CEP 05508-030 - São Paulo - SP - www.lct.pol.usp.br  
Tel: 11 3091-6151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.pol.usp.br



## RESULTADOS DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

CERTIFICADO: DIV 008/13

DATA: 14/01/2013

CLIENTE: DENISE CARPENA COITINHO DAL MOLIN

### 1. AMOSTRA ESTUDADA

Foi encaminhada ao laboratório uma amostra sólida denominada "AM 28", para determinação da porosidade média e distribuição de tamanho de poros por intrusão de mercúrio.

### 2. MÉTODO

A porosidade do material, a densidade aparente e a área superficial foram determinadas por porosimetria por intrusão de mercúrio na amostra previamente seca em estufa à 60°C por 24 horas. O procedimento da análise é descrito pela norma ISO 15901-1/ 2005.

As análises foram efetuadas em equipamento da marca Micromeritics, modelo AutoPore IV, com leitura gradual para cada pressão aplicada (modo *stepwise*). O diâmetro dos poros é calculado pela equação de Washburn ( $d_p = -4 \cdot \gamma \cdot \cos\theta / P$ ).

Os parâmetros utilizados no ensaio são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Densidade	Dados do mercúrio		Penetrômetro 04-0776		Dados do ensaio	
	Tensão superficial ( $\gamma$ )	Ângulo de contato	Volume do bulbo	Volume da haste	Pressão de enchimento	Tempo de equilíbrio
13,5413 g/cm <sup>3</sup>	0,485 N/m	130°	15 ml	1,057 ml	1,02 psi	10 s

### 3. RESULTADOS

O sumário dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Sumário dos resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio

Porosidade Média (%)	Diâmetro mediano de poros (nm)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)
10,4	62,3	2,35	6,1

*Diâmetro mediano de poros* - diâmetro no qual 50% dos poros em volume são maiores e 50% são menores.

*Densidade aparente* - medida na pressão de enchimento do ensaio; corresponde à densidade envelope das partículas.

(a) Parâmetros utilizados no ensaio e sumário dos resultados



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.polusp.br  
Tel: 11 3091-6151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.polusp.br



Tabela 3 – Distribuição de tamanho de poros

Pressão (psi)	Diâmetro de poros (nm)	Hg introduzido (ml/g)	Pressão (psi)	Diâmetro de poros (nm)	Hg introduzido (ml/g)
1,02	176917,1	0,0000	244,08	830,0	0,0002
1,53	131699,9	0,0005	302,68	669,3	0,0003
1,88	107283,1	0,0003	374,36	540,3	0,0003
2,32	87144,1	0,0002	462,94	436,9	0,0003
2,87	70452,3	0,0002	575,18	352,6	0,0003
3,55	56941,9	0,0001	711,22	284,4	0,0004
4,39	46045,2	0,0001	877,76	230,2	0,0004
5,44	37213,4	0,0001	1085,04	186,4	0,0005
6,72	30081,5	0,0001	1345,67	150,5	0,0007
8,31	24340,0	0,0001	1662,28	121,6	0,0012
10,26	19698,9	0,0001	2053,21	98,4	0,0025
12,68	15942,0	0,0000	2539,07	79,7	0,0039
15,73	12877,1	0,0000	3138,18	64,4	0,0052
19,44	10400,6	0,0000	3880,24	52,1	0,0073
24,00	8421,7	0,0000	4786,89	42,2	0,0041
29,64	6819,3	0,0000	5919,68	34,2	0,0023
33,50	5750,0	0,0000	7321,59	27,6	0,0020
42,37	4833,8	0,0000	9037,87	22,4	0,0019
52,83	3846,2	0,0001	11187,90	18,1	0,0020
66,02	3081,5	0,0003	13832,24	14,6	0,0010
82,77	2462,3	0,0001	17105,59	11,8	0,0014
102,85	1971,9	0,0001	21155,49	9,6	0,0010
128,30	1584,1	0,0001	26169,25	7,7	0,0009
158,58	1275,1	0,0001	32352,59	6,3	0,0009
196,81	1029,8	0,0001	39951,76	5,1	0,0012

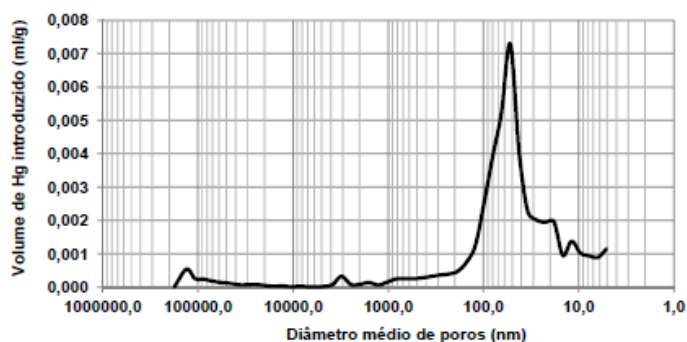


Figura 1 - Distribuição de tamanho de poros

(b) Distribuição do tamanho dos poros



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
 Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
 Laboratório de Caracterização Tecnológica  
 Av. Prof. Mello Moraes, 2373 - CEP 05508-030 - São Paulo - SP - www.lct.polusp.br  
 Tel: 11 3091-5151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.polusp.br



## RESULTADOS DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

CERTIFICADO: DIV 009/13

DATA: 14/01/2013

CLIENTE: DENISE CARPENA COITINHO DAL MOLIN

### 1. AMOSTRA ESTUDADA

Foi encaminhada ao laboratório uma amostra sólida denominada "AM 29", para determinação da porosidade média e distribuição de tamanho de poros por intrusão de mercúrio.

### 2. MÉTODO

A porosidade do material, a densidade aparente e a área superficial foram determinadas por porosimetria por intrusão de mercúrio na amostra previamente seca em estufa à 60°C por 24 horas. O procedimento da análise é descrito pela norma ISO 15901-1/ 2005.

As análises foram efetuadas em equipamento da marca Micromeritics, modelo AutoPore IV, com leitura gradual para cada pressão aplicada (modo *stepwise*). O diâmetro dos poros é calculado pela equação de Washburn ( $d_p = -4 \cdot \gamma \cdot \cos\theta / P$ ).

Os parâmetros utilizados no ensaio são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Densidade	Dados do mercúrio		Penetrômetro 04-0776		Dados do ensaio	
	Tensão superficial ( $\gamma$ )	Ângulo de contato	Volume do bulbo	Volume da haste	Pressão de enchimento	Tempo de equilíbrio
13,5413 g/cm <sup>3</sup>	0,485 N/m	130°	15 ml	1,057 ml	1,02 psi	10 s

### 3. RESULTADOS

O sumário dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Sumário dos resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio

Porosidade Média (%)	Diâmetro mediano de poros (nm)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)
10,3	57,8	2,37	6,1

Diâmetro mediano de poros - diâmetro no qual 50% dos poros em volume são maiores e 50% são menores.

Densidade aparente - medida na pressão de enchimento do ensaio; corresponde à densidade envelope das partículas.

(a) Parâmetros utilizados no ensaio e sumário dos resultados





Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.pol.usp.br  
Tel: 11 3091-6151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.pol.usp.br



Tabela 3 – Distribuição de tamanho de poros

Pressão (psi)	Diâmetro de poros (nm)	Hg introduzido (ml/g)	Pressão (psi)	Diâmetro de poros (nm)	Hg introduzido (ml/g)
1,02	176917,1	0,0000	244,08	830,0	0,0004
1,53	131699,9	0,0000	302,68	669,3	0,0005
1,88	107283,1	0,0000	374,36	540,3	0,0007
2,32	87144,1	0,0000	462,94	436,9	0,0005
2,87	70452,3	0,0000	575,18	352,6	0,0005
3,55	56941,9	0,0000	711,22	284,4	0,0005
4,39	46045,2	0,0000	877,76	230,2	0,0006
5,44	37213,4	0,0000	1085,04	186,4	0,0006
6,72	30081,5	0,0000	1345,67	150,5	0,0006
8,31	24340,0	0,0000	1662,28	121,6	0,0008
10,26	19698,9	0,0000	2053,21	98,4	0,0020
12,68	15942,0	0,0000	2539,07	79,7	0,0034
15,73	12877,1	0,0000	3138,18	64,4	0,0051
19,44	10400,6	0,0000	3880,24	52,1	0,0076
24,00	8421,7	0,0000	4786,89	42,2	0,0057
29,64	6819,3	0,0000	5919,68	34,2	0,0025
33,50	5750,0	0,0000	7321,59	27,6	0,0016
42,37	4833,8	0,0000	9037,87	22,4	0,0020
52,83	3846,2	0,0000	11187,90	18,1	0,0019
66,02	3081,5	0,0000	13832,24	14,6	0,0013
82,77	2462,3	0,0000	17105,59	11,8	0,0011
102,85	1971,9	0,0000	21155,49	9,6	0,0010
128,30	1584,1	0,0001	26169,25	7,7	0,0009
158,58	1275,1	0,0002	32352,59	6,3	0,0009
196,81	1029,8	0,0003	39951,76	5,1	0,0010

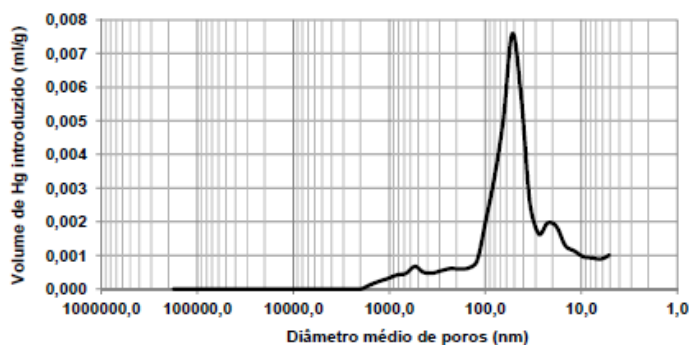


Figura 1 - Distribuição de tamanho de poros

(b) Distribuição do tamanho dos poros



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.polusp.br  
Tel: 11 3091-6151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.polusp.br



## RESULTADOS DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

CERTIFICADO: DIV 010/13

DATA: 14/01/2013

CLIENTE: DENISE CARPENA COITINHO DAL MOLIN

### 1. AMOSTRA ESTUDADA

Foi encaminhada ao laboratório uma amostra sólida denominada "AM 30", para determinação da porosidade média e distribuição de tamanho de poros por intrusão de mercúrio.

### 2. MÉTODO

A porosidade do material, a densidade aparente e a área superficial foram determinadas por porosimetria por intrusão de mercúrio na amostra previamente seca em estufa à 60°C por 24 horas. O procedimento da análise é descrito pela norma ISO 15901-1/ 2005.

As análises foram efetuadas em equipamento da marca Micromeritics, modelo AutoPore IV, com leitura gradual para cada pressão aplicada (modo *stepwise*). O diâmetro dos poros é calculado pela equação de Washburn ( $d_p = -4 \cdot \gamma \cdot \cos\theta / P$ ).

Os parâmetros utilizados no ensaio são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Dados do mercúrio			Penetrômetro 04-0776		Dados do ensaio	
Densidade	Tensão superficial ( $\gamma$ )	Ângulo de contato	Volume do bulbo	Volume da haste	Pressão de enchimento	Tempo de equilíbrio
13,5413 g/cm <sup>3</sup>	0,485 N/m	130°	15 ml	1,057 ml	1,02 psi	10 s

### 3. RESULTADOS

O sumário dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Sumário dos resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio

Porosidade Média (%)	Diâmetro mediano de poros (nm)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)
8,2	57,6	2,53	4,8

*Diâmetro mediano de poros* - diâmetro no qual 50% dos poros em volume são maiores e 50% são menores.

*Densidade aparente* - medida na pressão de enchimento do ensaio; corresponde à densidade envelope das partículas.

(a) Parâmetros utilizados no ensaio e sumário dos resultados



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
 Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
 Laboratório de Caracterização Tecnológica  
 Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.polusp.br  
 Tel: 11 3091-6151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.polusp.br



Tabela 3 – Distribuição de tamanho de poros

Pressão (psi)	Diâmetro de poros (nm)	Hg introduzido (ml/g)	Pressão (psi)	Diâmetro de poros (nm)	Hg introduzido (ml/g)
1,02	176917,1	0,0000	244,08	830,0	0,0005
1,53	131699,9	0,0004	302,68	669,3	0,0004
1,88	107283,1	0,0001	374,36	540,3	0,0005
2,32	87144,1	0,0001	462,94	436,9	0,0005
2,87	70452,3	0,0001	575,18	352,6	0,0004
3,55	56941,9	0,0001	711,22	284,4	0,0004
4,39	46045,2	0,0001	877,76	230,2	0,0004
5,44	37213,4	0,0000	1085,04	186,4	0,0004
6,72	30081,5	0,0001	1345,67	150,5	0,0004
8,31	24340,0	0,0000	1662,28	121,6	0,0005
10,26	19698,9	0,0000	2053,21	98,4	0,0013
12,68	15942,0	0,0000	2539,07	79,7	0,0023
15,73	12877,1	0,0000	3138,18	64,4	0,0038
19,44	10400,6	0,0000	3880,24	52,1	0,0049
24,00	8421,7	0,0000	4786,89	42,2	0,0019
29,64	6819,3	0,0000	5919,68	34,2	0,0016
33,50	5750,0	0,0000	7321,59	27,6	0,0014
42,37	4833,8	0,0000	9037,87	22,4	0,0014
52,83	3846,2	0,0000	11187,90	18,1	0,0012
66,02	3081,5	0,0002	13832,24	14,6	0,0011
82,77	2462,3	0,0001	17105,59	11,8	0,0010
102,85	1971,9	0,0003	21155,49	9,6	0,0009
128,30	1584,1	0,0002	26169,25	7,7	0,0009
158,58	1275,1	0,0005	32352,59	6,3	0,0008
196,81	1029,8	0,0003	39951,76	5,1	0,0011

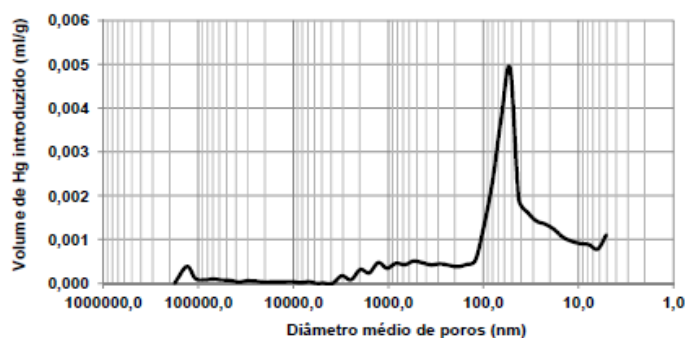


Figura 1 - Distribuição de tamanho de poros

(b) Distribuição do tamanho dos poros

## APÊNDICE H

### RESULTADOS DE MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X – PARAMETROS DE AQUISIÇÃO - COMUM A TODAS AS AMOSTRAS ANALISADAS.

[System]

Scanner=Skyscan1172

Instrument S/N=09H01130

Hardware version=F

Software=Version 1. 5 (build 14)

Home directory=C:\SkyScan1172

Source Type=Hamamatsu 100/250

Camera=Hamamatsu C9300 11Mp camera

Camera Pixel Size (um)= 8.76

CameraXYRatio=0.9900

Incl.in lifting (um/mm)=0.0080

[Acquisition]

Data directory=C:\RESULTADOS 2013\430\_13 Lucilia Bernardino - UFRGS\430\_13 A - Amostra 22

Filename Prefix=Amostra 22\_

Number of Files= 4

Source Voltage (kV)= 100

Source Current (uA)= 100

Number of Rows= 1336

Number of Columns= 2000

Image crop origin X= 0

Image crop origin Y=0

Camera binning=2x2

Image Rotation=0.0000

Gantry direction=CC

Image Pixel Size (um)= 7.99

Object to Source (mm)=99.830

Camera to Source (mm)=218.821

Vertical Object Position (mm)=32.633

Optical Axis (line)= 756

Filter=Al+Cu

Image Format=TIFF

Depth (bits)=16

Screen LUT=0

Exposure (ms)= 1300

Rotation Step (deg)=44.800

Frame Averaging=ON (3)  
 Random Movement=ON (10)  
 Use 360 Rotation=NO  
 Geometrical Correction=ON  
 Camera Offset=OFF  
 Median Filtering=ON  
 Flat Field Correction=ON  
 Rotation Direction=CC  
 Scanning Trajectory=ROUND  
 Type Of Motion=STEP AND SHOOT  
 Study Date and Time=Aug 29, 2013 12:36:10  
 Scan duration=00:53:31

Tabela H1 - Posição das amostras para a análise de microtomografia de raios X nos corpos de prova

<i>Amostra</i>	<i>Idade de cura</i>	<i>Pré-carregamento</i>	<i>Posição da retirada da amostra</i>
Amostra 22	3 dias	0%	Centro do corpo de prova
Amostra 24		75%	Inferior: meio do vão
Amostra 28	28 dias	0%	Centro do corpo de prova
Amostra 30		75%	Inferior: meio do vão

## RESULTADOS SOFTWARE CTAN

### AMOSTRA 22

[ 06/17/16 18:39:56 ] 3D analysis

-----  
 Loaded dataset:, C:\RESULTADOS 2015\Lucilia\430\_13 A - Amostra  
 22\VOI(1)\VOI\amostra 22\_\_rec\_voi\_\_voi\_  
 -----

-----  
 [ 06/17/16 19:50:53 ] Thresholding  
 Mode, Global  
 Lower grey threshold, 36  
 Upper grey threshold, 255  
 [ 06/17/16 19:53:07 ] Thresholding done  
 -----

-----  
 [ 06/17/16 19:53:32 ] 3D analysis

Date and time,17.06.2016 19:53  
 Operator identity,SkyScan  
 Computer name,SCAN1172\_130  
 Computation time,00:08:09  
 Dataset,amostra 22\_\_rec\_voi\_\_voi\_  
 Location,C:\RESULTADOS 2015\Lucilia\430\_13 A - Amostra 22\VOI(1)\VOI\  
 -----

Description,Abbreviation,Value,Unit

Number of layers,,615  
 Lower vertical position,,0.47970,mm  
 Upper vertical position,,10.29749,mm  
 Pixel size,,15.98989,um  
 Lower grey threshold,,36  
 Upper grey threshold,,255

Total VOI volume,TV,631.47551,mm<sup>3</sup>  
 Object volume,Obj.V,588.89213,mm<sup>3</sup>  
 Percent object volume,Obj.V/TV,93.25653,%  
 Total VOI surface,TS,726.58980,mm<sup>2</sup>  
 Object surface,Obj.S,4929.89280,mm<sup>2</sup>  
 Intersection surface,i.S,376.82283,mm<sup>2</sup>  
 Object surface / volume ratio,Obj.S/Obj.V,8.37147,1/mm  
 Object surface density,Obj.S/TV,7.80694,1/mm  
 Surface convexity index,SCv.I,-120.87270,1/mm  
 Centroid (x),Crd.X,4.99747,mm  
 Centroid (y),Crd.Y,5.52320,mm  
 Centroid (z),Crd.Z,6.13926,mm

**AMOSTRA 24**

```
-----
Loaded dataset:, C:\RESULTADOS 2015\Lucilia\430_13 B - Amostra
24\VOI\amostra 24__rec_voi_
-----
```

```
-----
[ 06/17/16 19:14:42 ] Thresholding
Mode, Global
Lower grey threshold, 36
Upper grey threshold, 255
[ 06/17/16 19:14:56 ] Thresholding done
-----
```

```
-----
[ 06/17/16 19:15:06 ] 3D analysis
-----
```

```
Date and time,17.06.2016 19:15
Operator identity,SkyScan
Computer name,SCAN1172_130
Computation time,00:00:59
Dataset,amostra 24__rec_voi_
Location,C:\RESULTADOS 2015\Lucilia\430_13 B - Amostra 24\VOI\
```

```
Description,Abbreviation,Value,Unit
```

```
Number of layers,,615
Lower vertical position,,0.47970,mm
Upper vertical position,,10.29749,mm
Pixel size,,15.98989,um
Lower grey threshold,,36
Upper grey threshold,,255
```

```
Total VOI volume,TV,828.42894,mm^3
Object volume,Obj.V,737.03011,mm^3
Percent object volume,Obj.V/TV,88.96721,%
Total VOI surface,TS,886.85510,mm^2
Object surface,Obj.S,10867.59846,mm^2
Intersection surface,i.S,467.63298,mm^2
Object surface / volume ratio,Obj.S/Obj.V,14.74512,1/mm
Object surface density,Obj.S/TV,13.11832,1/mm
Surface convexity index,SCv.I,-125.67051,1/mm
Centroid (x),Crd.X,6.15230,mm
Centroid (y),Crd.Y,7.20269,mm
Centroid (z),Crd.Z,4.84707,mm
```

**AMOSTRA 28**

```
-----
Loaded dataset:, C:\RESULTADOS 2015\Lucilia\430_13 D - Amostra
28\VOI\VOI\amostra 28__rec_voi__voi_
-----
```

```
-----
[ 06/17/16 18:57:47 ] Thresholding
Mode, Global
Lower grey threshold, 36
Upper grey threshold, 255
[ 06/17/16 18:57:51 ] Thresholding done
-----
```

```
-----
[ 06/17/16 18:57:58 ] 3D analysis

Date and time,17.06.2016 18:57
Operator identity,SkyScan
Computer name,SCAN1172_130
Computation time,00:00:14
Dataset,amostra 28__rec_voi__voi_
Location,C:\RESULTADOS 2015\Lucilia\430_13 D - Amostra 28\VOI\VOI\
-----
```

Description,Abbreviation,Value,Unit

```
Number of layers,,615
Lower vertical position,,0.47970,mm
Upper vertical position,,10.29749,mm
Pixel size,,15.98989,um
Lower grey threshold,,36
Upper grey threshold,,255

Total VOI volume,TV,414.47257,mm^3
Object volume,Obj.V,371.57316,mm^3
Percent object volume,Obj.V/TV,89.64964,%
Total VOI surface,TS,711.21724,mm^2
Object surface,Obj.S,4261.49890,mm^2
Intersection surface,i.S,346.21896,mm^2
Object surface / volume ratio,Obj.S/Obj.V,11.46880,1/mm
Object surface density,Obj.S/TV,10.28174,1/mm
Surface convexity index,SCv.I,-103.90543,1/mm
Centroid (x),Crd.X,6.91055,mm
Centroid (y),Crd.Y,5.74698,mm
Centroid (z),Crd.Z,4.56413,mm
```



**AMOSTRA 30**

```
-----
Loaded dataset:, C:\RESULTADOS 2015\Lucilia\430_13 E - Amostra
30\VOI\amostra 30__rec_voi_
-----
```

```
-----
[ 06/17/16 19:23:16 ] Thresholding
Mode, Global
Lower grey threshold, 36
Upper grey threshold, 255
[ 06/17/16 19:23:45 ] Thresholding done
-----
```

```
-----
[ 06/17/16 19:23:52 ] 3D analysis
-----
```

```
Date and time,17.06.2016 19:23
Operator identity,SkyScan
Computer name,SCAN1172_130
Computation time,00:00:20
Dataset,amostra 30__rec_voi_
Location,C:\RESULTADOS 2015\Lucilia\430_13 E - Amostra 30\VOI\
```

```
Description,Abbreviation,Value,Unit
```

```
Number of layers,,615
Lower vertical position,,0.47970,mm
Upper vertical position,,10.29749,mm
Pixel size,,15.98989,um
Lower grey threshold,,36
Upper grey threshold,,255
```

```
Total VOI volume,TV,1028.71381,mm^3
Object volume,Obj.V,962.83451,mm^3
Percent object volume,Obj.V/TV,93.59595,%
Total VOI surface,TS,927.68769,mm^2
Object surface,Obj.S,7176.95558,mm^2
Intersection surface,i.S,520.91138,mm^2
Object surface / volume ratio,Obj.S/Obj.V,7.45399,1/mm
Object surface density,Obj.S/TV,6.97663,1/mm
Surface convexity index,SCv.I,-116.93518,1/mm
Centroid (x),Crd.X,6.73386,mm
Centroid (y),Crd.Y,6.94953,mm
Centroid (z),Crd.Z,4.31202,mm
```