

**MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM CONCRETOS
DE ALTA RESISTÊNCIA CONTENDO ADITIVO REDUTOR
DE RETRAÇÃO E SEUS EFEITOS NA MACRO E
MICROESTRUTURA**

Anne Neiry de Mendonça Lopes

Porto Alegre

Julho 2011

ANNE NEIRY DE MENDONÇA LOPES

**MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM CONCRETOS
DE ALTA RESISTÊNCIA CONTENDO ADITIVO REDUTOR
DE RETRAÇÃO E SEUS EFEITOS NA MACRO E
MICROESTRUTURA**

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.

Porto Alegre

Julho 2011

L864m Lopes, Anne Neiry de Mendonça

Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura / Anne Neiry de Mendonça Lopes. – 2011.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2011.

Orientadora: Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Coorientador: Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho

1. Concreto de alta resistência. 2. Retração autógena. 3. Aditivo redutor de retração. 4. Propriedades mecânicas. 5. Durabilidade. 6. Microestrutura. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Toledo Filho, Romildo Dias, coorient. III. Título.

CDU-691.32(043)

ANNE NEIRY DE MENDONÇA LOPES

**MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM CONCRETOS
DE ALTA RESISTÊNCIA CONTENDO ADITIVO REDUTOR
DE RETRAÇÃO E SEUS EFEITOS NA MACRO E
MICROESTRUTURA**

Esta Tese de Doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 05 de julho de 2011

Prof^ª. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra. pela USP
Orientadora

Prof. Romildo Dias Toledo Filho
Dr. pela PUC/RJ
Coorientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Vladimir Antônio Paulon (UNICAMP)
Dr. pela USP

Prof^ª. Eugênia Fonseca Silva (UNB)
Dra. pela COPPE/UFRJ

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
Dr. pela *University of Leeds*

Não sei... Se a vida é curta
Ou longa demais pra nós,
Mas sei que nada do que vivemos
Tem sentido, se não tocamos o coração das pessoas.

Muitas vezes basta ser:
Colo que acolhe,
Braço que envolve,
Palavra que conforta,
Silêncio que respeita,
Alegria que contagia,
Lágrima que corre,
Olhar que acaricia,
Desejo que sacia,
Amor que promove.

E isso não é coisa de outro mundo,
É o que dá sentido à vida.
É o que faz com que ela
Não seja nem curta,
Nem longa demais,
Mas que seja intensa,
Verdadeira, pura... Enquanto durar.

Cora Coralina

*A meu Emídio, à minha Larissa,
ao Eduardo que está por vir
e à minha mãe Leonídia.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo seu imenso amor. Pela vida.

A meu amado Emídio, meu companheiro, meu amigo, pelo apoio incondicional.

À Larissa, minha florzinha amada, com quem eu aprendo continuamente a viver.

A meus pais, Nonato e Leondina e meus irmãos por tudo o que significam para mim, em especial à minha mãe que me ensinou a lutar pelos meus sonhos, e à minha irmã e amiga Magnólia, pela eterna cumplicidade.

À minha amiga Eugênia Fonseca, pelo estímulo e força à conclusão deste doutorado, mas principalmente, pela amorosidade, desprendimento, dignidade e pela troca de interiores. A você, a minha gratidão e meus aplausos!!!

A toda equipe de professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial aos professores Denise Dal Molin e Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, pelo grande incentivo e empenho que tornaram possível este doutorado.

À Denise Dal Molin, o meu muito obrigada também, por disponibilizar-se para minha orientação, pelas valiosas contribuições à pesquisa, pela simplicidade, pelas palavras encorajadoras e pelo carinho.

Ao Romildo Toledo, além da orientação objetiva, agradeço pelo convívio, que me fez admirá-lo pelo conhecimento, agilidade e competência.

Ao Dudu Fairbairn, pela sabedoria, desprendimento e simplicidade.

Ao meu amigo Élcio Guerra, pelo inestimável contribuição no programa experimental.

Ao Rubens Bittencourt, que proporcionou à equipe do Departamento de Apoio e Controle Técnico - DCT.C/FURNAS a realização de pós graduação pela UFRGS.

Ao engenheiro Walton Pacelli de Andrade, que como meu primeiro gerente em FURNAS, soube reconhecer e valorizar meu trabalho, estimulando-me na minha vida profissional.

À Beth, pela amizade, incentivo e por me ouvir; à amiga Luciana (a Lulu), pelos “helps” e papos que me aliviaram; à Heloísa, pela presteza, objetividade e dedicação; ao Alexandre de

Castro, pela hombridade, sabedoria, doação e pelas aulas de estatística; ao Gambale, pelas análises do risco de fissuração; à Nicole, pelas contribuições com o MEV; ao amigo Sérgio Botassi, pela caminhada lado a lado, pela força e pelas contribuições a esta pesquisa.

A todos os colegas do DCT.C/FURNAS, onde cada um à sua maneira contribuiu para a conclusão deste trabalho. O meu muito obrigada em especial ao Renato Batista, Renato Cabral, Cláudia, Newton Goulart, Maurice, Ricardo André, Adão, Joílson, Álvaro, Cristiane, Marco Aurélio, Alfredo, Ziza, Vanessa, Flávio de Lima, Laila, Wellington, Adriano, Vilmar, Jason e ao prestativo e atencioso Aloísio, pela formatação do trabalho.

Aos técnicos do DCT.C/FURNAS, sem os quais o programa experimental não seria desenvolvido. Abraço e agradeço a todos nas pessoas do José Bonifácio Balthazar - o Zito, do Jésus, do Cícero e dos admiráveis Tizzo e Luiz Antônio.

Aos competentes estagiários de engenharia civil, Max Lany Stival, Lara Christina Braga Oliveira, Bruno da Silva Borges e Andressa Belo, que com entusiasmo e vigor juvenil contribuíram imensamente para este trabalho.

À Liliani Gaerversen, do PPGEC/UFRGS, pela simpatia, generosidade e alegria.

Aos colegas da COPPE/UFRJ que me apoiaram no programa experimental. O meu agradecimento à Rosângela e Clodoaldo. O meu muito obrigada ao Guilherme e Camila Abelha pela doação às minhas análises de termogravimetria. À gentileza e dedicação da Sandra e Luzidelle.

Aos fornecedores Holcim, Redimix, BASF Chemicals e Sika pela doação dos materiais a esta pesquisa.

Ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento de FURNAS, sob gestão da Agência de Energia Elétrica – ANEEL, pelo apoio financeiro que permitiu o desenvolvimento desta pesquisa.

Anne.

RESUMO

LOPES, A. N. M. **Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O desenvolvimento do concreto de alta resistência - CAR foi um importante avanço na tecnologia de concreto, entretanto, a despeito de suas inúmeras vantagens como material estrutural, o seu emprego tem sido limitado, por ter se revelado mais susceptível à fissuração nas primeiras idades. Isto se deve à ocorrência do fenômeno da retração autógena, particularmente mais intenso nestes concretos que nos de resistência normal, uma vez que no CAR, há significativamente maior quantidade de material cimentício e menor quantidade de água, o que dá origem a uma estrutura porosa muito refinada logo nas primeiras idades, gerando altas magnitudes de tensões capilares. Além do estudo sobre o entendimento do fenômeno, as pesquisas atualmente têm buscado formas de mitigá-lo a fim de contribuir para estruturas mais duráveis. Diante do exposto, esta pesquisa investigou o comportamento do CAR, no tocante às propriedades mecânicas, elásticas e viscoelásticas e à durabilidade, quando empregado um aditivo redutor de retração - ARR que pode se configurar como estratégia mitigadora para a redução da retração autógena, bem como verificar a sua influência sobre a microestrutura e hidratação da pasta de cimento. Os resultados indicam que o ARR é eficaz na redução da retração autógena e retração por secagem, sem alterar de forma relevante as propriedades mecânicas e elásticas: a resistência à compressão sofre uma pequena queda de 5% com o uso de 2% de ARR em relação ao concreto referência, contudo, as demais propriedades não são alteradas com o uso do ARR. Quanto ao efeito sobre a fluência, não se obtiveram resultados conclusivos. A durabilidade, medida pelos ensaios de penetrabilidade a íons cloretos, permeabilidade à água, carbonatação natural e absorção capilar e por imersão, não é comprometida com a incorporação do aditivo redutor de retração. Do ponto de vista microestrutural, observou-se que o ARR altera o volume total de poros, embora de uma forma não muito expressiva; e ainda constatou-se que este aditivo afeta a velocidade de hidratação das pastas de cimento, e que possivelmente interage com compostos de hidratados da pasta, sem, no entanto, alterar as características macroestruturais do material.

Palavras-chave: concreto de alta resistência; retração autógena; aditivo redutor de retração; propriedades mecânicas; durabilidade; microestrutura.

ABSTRACT

LOPES, A. N. M. **Mitigation of autogenous shrinkage in high strength concrete using shrinkage-reducing admixture and its macro and microstructural effects.** 2011. Thesis (Doctorate in Engineering) – Post-Graduation Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre, Brazil.

The development of high strength concrete - HSC represented an important advance in concrete technology. However, even knowing that this kind of concrete has several advantages as a structural material, its application is limited by the early ages cracking. This occurrence is due to the autogenous shrinkage phenomenon, once HSC has a greater amount of cementitious material and a lower amount of water in relation to a normal-strength concrete. This condition implies in a greatly refinement of pore structure at early ages which lead to a higher magnitudes of capillary tension than the one observed in a normal-strength concrete. Beyond to study the phenomenon, much research has been conducted in many countries in order to reduce autogenous shrinkage and contribute to more durable structures. So, this research aims to investigate the effectiveness of shrinkage-reducing admixtures – SRA in decreasing the autogenous shrinkage of HSC, and mainly, verify its influence on viscoelastic, elastic and mechanicals properties and durability. The effect of SRA on microstructure and on the cement paste hydration was also investigated. The results show that SRA is effective in reducing the autogenous shrinkage and drying shrinkage without remarkable changes in elastic and mechanical properties. There were not conclusive results related to the creep property. The concrete durability under the action of aggressive agents (such as water, CO₂ and chloride) was not influenced by the SRA, information provided by the results of chloride penetration, natural carbonation, water permeability, capillary absorption and absorption of water tests. In a microstructural point of view, it was observed that the addition of SRA results in a small rise in total pore volume. Besides, the results suggest that the SRA affects the rate of cement hydration and it can interact to the hydrated products of paste without implying in great influences on the macrostructural characteristics of the material.

Keywords: high-strength concrete; autogenous shrinkage; shrinkage-reducing admixture; mechanical properties; durability; microstructure.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA	25
1.2	ORIGINALIDADE	28
1.3	OBJETIVOS	29
1.3.1	Objetivo geral	29
1.3.2	Objetivos específicos	29
1.4	ESTRUTURA DA TESE	29
2	DA HIDRATAÇÃO À FORMAÇÃO DA MICROESTRUTURA	31
2.1	INTRODUÇÃO	31
2.2	HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	31
2.2.1	Sílica Ativa	34
2.2.2	Hidratos formados	35
2.2.3	Grau de hidratação (ξ)	36
2.3	PROCESSO DE FORMAÇÃO DA PASTA	37
2.3.1	Pasta de cimento – de suspensão a sólido poroso	37
2.3.2	Patamar de percolação: importância da determinação	39
2.3.2.1	Ensaio com medidas de velocidade do pulso-ultrassônico	41
2.3.3	Evolução da porosidade da pasta com a hidratação	43
2.4	ESTADO DA ÁGUA	44
2.4.1	Água quimicamente combinada	45
2.4.2	Água adsorvida	45
2.4.3	Água capilar	47
2.4.4	Água livre	47
3	RETRAÇÃO AUTÓGENA	48
3.1	BREVE HISTÓRICO	48
3.2	TERMINOLOGIA	50
3.3	MECANISMOS DA RETRAÇÃO AUTÓGENA	65
3.3.1	Variação da depressão capilar	66
3.3.2	Variação de tensão de superfície de partículas coloidais	69
3.3.3	Variação da pressão de disjunção	71
3.3.4	Autodessecação	72
3.4	FATORES QUE INFLUENCIAM A RETRAÇÃO AUTÓGENA	74

3.5	MEDIDA DE UMIDADE RELATIVA INTERNA	76
3.6	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA	77
3.7	SOLUÇÕES PARA MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA	81
3.8	ADITIVO REDUTOR DE RETRAÇÃO – ARR	84
3.8.1	Efeitos do ARR nas propriedades de pastas, argamassas e concretos	86
3.8.1.1	Propriedades reológicas	86
3.8.1.2	Abatimento, teor de ar e tempo de pega	86
3.8.1.3	Retração por secagem	87
3.8.1.4	Retração autógena e umidade relativa interna	88
3.8.1.5	Propriedades mecânicas, elásticas e viscoelásticas	89
3.8.1.6	Efeitos na microestrutura e na durabilidade	90
3.8.1.7	Efeito nas propriedades térmicas	91
3.9	A CONTRIBUIÇÃO DESTA PESQUISA	91
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	93
4.1	INTRODUÇÃO.....	93
4.2	VARIÁVEIS INDEPENDENTES	93
4.2.1	Classes de concreto.....	93
4.2.2	Pastas estudadas	94
4.2.3	Teor do aditivo redutor de retração	94
4.2.4	Apresentação geral do experimento	94
4.3	MATERIAIS	95
4.3.1	Cimento	96
4.3.2	Sílica ativa	97
4.3.3	Agregados.....	98
4.3.4	Aditivos.....	100
4.4	CONCRETOS ESTUDADOS.....	101
4.4.1	Identificação dos concretos.....	103
4.4.2	Composição e parâmetros dos concretos	103
4.4.3	Mistura	104
4.4.4	Moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova.....	105
4.5	PASTAS ESTUDADAS	106
4.6	PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO	107
4.7	DETERMINAÇÃO DO PATAMAR DE PERCOLAÇÃO	108
4.8	RETRAÇÃO AUTÓGENA	110
4.8.1	Método de ensaio	111

4.8.1.1	Extensômetro elétrico de resistência tipo Carlson.....	112
4.9	UMIDADE RELATIVA INTERNA.....	114
4.10	RETRAÇÃO POR SECAGEM.....	116
4.11	PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO	117
4.11.1	Resistência à compressão.....	117
4.11.2	Resistência à tração por compressão diametral	118
4.11.3	Resistência à tração na flexão.....	118
4.11.4	Módulo de elasticidade.....	119
4.11.5	Fluência	120
4.12	PROPRIEDADES LIGADAS À DURABILIDADE DOS CONCRETOS	121
4.12.1	Penetrabilidade a íons cloretos.....	121
4.12.2	Permeabilidade à água.....	123
4.12.3	Ensaio de carbonatação do concreto ao natural.....	124
4.12.4	Absorção por Capilaridade	125
4.12.5	Absorção por Imersão.....	126
4.13	ESTUDO DA MICROESTRUTURA	127
4.13.1	Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	127
4.13.2	Análise termogravimétrica - ATG	129
4.13.3	Difração de raios X.....	131
4.13.4	Microscopia eletrônica de varredura	132
4.14	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	133
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	136
5.1	ADITIVO REDUTOR DE RETRAÇÃO NOS CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND.....	136
5.1.1	Abatimento e Ar incorporado	137
5.1.2	Patamar de percolação ou tempo-zero (t_0).....	139
5.1.2.1	Velocidade de onda ultrassônica	139
5.1.2.2	Comparação entre velocidade de onda ultrassônica e método de Vicat.....	141
5.1.3	Retração Autógena	142
5.1.3.1	Influência da classe (relação a/agl).....	145
5.1.3.2	Influência da idade e teor de ARR.....	146
5.1.3.3	A expansão nas primeiras idades.....	149
5.1.3.4	Comparação com outros pesquisadores.....	150
5.1.3.5	Predição da retração autógena	152
5.1.3.6	Custo.....	154

5.1.4	Umidade relativa interna	155
5.1.5	Retração por secagem	158
5.1.5.1	Resultados com 28 dias de cura submersa.....	159
5.1.5.2	Resultados de retração por secagem e perda de massa.....	160
5.1.5.3	Retração total (autógena + secagem).....	165
5.1.6	Resistência à compressão	166
5.1.6.1	Evolução da resistência à compressão em relação à idade de 28 dias.....	170
5.1.7	Resistência à tração	171
5.1.7.1	Resistência à tração por compressão diametral	172
5.1.7.2	Resistência à tração na flexão.....	174
5.1.8	Relação entre resistência à tração na compressão diametral e resistência à compressão	177
5.1.8.1	Relação entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão.....	180
5.1.9	Módulo de elasticidade	181
5.1.9.1	Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão	185
5.1.10	Fluência básica dos concretos	186
5.1.11	Análise do risco de fissuração	190
5.1.12	Propriedades ligadas à durabilidade	194
5.1.12.1	Resistência à penetrabilidade de íons cloretos	195
5.1.12.2	Permeabilidade à água	198
5.1.12.3	Carbonatação natural	200
5.1.12.4	Absorção de água por capilaridade.....	203
5.1.12.5	Absorção por imersão.....	206
5.2	ADITIVO REDUTOR DE RETRAÇÃO EM PASTAS DE CIMENTO PORTLAND: ESTUDO DA MICROESTRUTURA	209
5.2.1	Porosimetria por intrusão de mercúrio	209
5.2.1.1	Intrusão total	209
5.2.1.2	Distribuição de diâmetro de poros.....	212
5.2.2	Análise Termogravimétrica - ATG	217
5.2.3	Difração de Raios-X	224
5.2.4	Microscopia eletrônica de varredura - MEV	229
5.2.5	Resumo sobre a hidratação e microestrutura	237
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	240
6.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	240
6.1.1	Quanto à retração autógena e retração por secagem.....	240
6.1.2	Quanto ao concreto fresco	242

6.1.3	Quanto às propriedades mecânicas, elástica e viscoelástica.....	243
6.1.4	Quanto à durabilidade	244
6.1.5	Quanto à hidratação e microestrutura das pastas de cimento Portland.....	245
6.1.6	Consideração final sobre o uso do ARR.....	245
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	246
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	248
	APÊNDICE A – Resultados Individuais: Ensaios em Concreto.....	258
	APÊNDICE B – Resultados Individuais: Ensaios em Pastas.....	270

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização física e mecânica do cimento realizada nos Laboratórios de FURNAS	96
Tabela 2 – Caracterização química do cimento realizada nos Laboratórios de FURNAS	97
Tabela 3 – Características físicas e químicas da sílica ativa realizadas nos Laboratórios de FURNAS	98
Tabela 4 – Caracterização dos agregados miúdo e graúdo realizada nos Laboratórios de FURNAS	99
Tabela 5 – Caracterização dos aditivos realizada nos Laboratórios de FURNAS	101
Tabela 6 – Identificação usada nessa pesquisa para os concretos	103
Tabela 7 – Composição e parâmetros de misturas dos concretos.....	104
Tabela 8 – Seqüência de colocação dos materiais na betoneira	105
Tabela 9 – Composição das pastas (kg/m^3).....	106
Tabela 10 – Frequência natural do transdutor de acordo com as dimensões da peça a ser ensaiada (RILEM NDT1, 1972).	108
Tabela 11 – Propriedades mecânicas, elásticas e viscoelásticas: planejamento dos ensaios .	117
Tabela 12 – Verificação da durabilidade: planejamento dos ensaios.....	121
Tabela 13 – Tempo de início de pega determinado pelo método da agulha de Vicat e velocidade de onda ultrassônica	141
Tabela 14 – Análise de variância dos resultados de retração autógena.....	144
Tabela 15 – Resultados médios da retração autógena em várias idades e o efeito do ARR ..	148
Tabela 16 – Análise de variância dos resultados de retração por secagem	162
Tabela 17 – Resultados médios da retração por secagem em várias idades e o efeito do ARR	164
Tabela 18 – Estimativa da retração autógena + retração por secagem dos concretos, com 130 dias, a partir dos resultados experimentais, $\times 10^{-6}$	165
Tabela 19 – Resistência à compressão nas várias idades e a influência do teor de ARR para todas as classes de concreto estudadas.	166
Tabela 20 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão.....	167
Tabela 21 – Evolução da resistência à compressão em relação aos 28 dias (f_c/f_{c28})	171
Tabela 22 - Resistência à tração na compressão diametral dos concretos nas várias idades .	172
Tabela 23 – Análise de variância dos resultados de resistência à tração por compressão diametral	173
Tabela 24 – Resistência à tração na flexão nas várias idades e a influência do teor de ARR para todas as classes de concreto estudadas	175
Tabela 25 – Análise de variância dos resultados de resistência à tração na flexão.....	175
Tabela 26 – Módulo de elasticidade nas várias idades e a influência do teor de ARR para todas as classes de concreto estudadas	182

Tabela 27 – Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade	183
Tabela 28 – Resultados médios de fluência básica – F_j (10^{-6} / MPa)	188
Tabela 29 – Critérios de avaliação dos valores de penetrabilidade de íons cloretos de acordo com ASTM C 1202:1992 (ASTM, 2000).....	195
Tabela 30 – Análise de variância dos resultados de penetrabilidade a íons cloretos	196
Tabela 31 – Resultados individuais e médios de coeficiente de permeabilidade (k) dos concretos estudados	199
Tabela 32 – Critérios de avaliação da permeabilidade à água do concreto segundo CEB-192 (MENDES, 2007)	200
Tabela 33 – Análise de variância dos resultados de absorção por capilaridade	203
Tabela 34 – Resultados médios obtidos do ensaio de absorção total por imersão	206
Tabela 35 – Análise de variância dos resultados de absorção total por imersão.....	206
Tabela 36 – Critérios de avaliação da absorção de água do concreto segundo CEB-192 (MENDES, 2007)	209
Tabela 37 – Análise de variância dos resultados de volume total intrudido de Hg.....	210
Tabela 38 – Classificação do tamanho de poros em pastas de cimento hidratadas e propriedades afetadas da pasta (adaptado de SILVA, 2001).....	212
Tabela 39 – Análise de variâncias dos resultados de volume intrudido de Hg por faixa de poros e por pasta.....	213
Tabela 40 – Resultados individuais de retração autógena e retração por secagem do C80 ...	259
Tabela 41 – Resultados individuais de retração autógena e retração por secagem do C60 ...	260
Tabela 42 – Resultados individuais de retração autógena e retração por secagem do C40 ...	261
Tabela 43 – Valores de retração autógena determinados em ensaios e os preditos pelo modelo matemático (Equação 12) considerando as três classes de concreto estudadas.	262
Tabela 44 – Valores de retração autógena determinados em ensaios e os preditos pelo modelo matemático (Equação 13) considerando somente as classes de concreto C60 e C80.	263
Tabela 45 – Resultados individuais de resistência à compressão.....	264
Tabela 46 – Resultados individuais de módulo de elasticidade	265
Tabela 47 – Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral	266
Tabela 48 – Resultados individuais de resistência à tração na flexão	267
Tabela 49 – Resultados individuais da fluência básica	267
Tabela 50 – Resultados individuais das propriedades de durabilidade – Penetrabilidade a cloretos e coeficiente de carbonatação natural	268
Tabela 51 – Resultados individuais das propriedades de durabilidade – Absorção por capilaridade e absorção por imersão.....	269
Tabela 52 – Resultados individuais de porosimetria por intrusão de mercúrio – Intrusão total	271
Tabela 53 – Resultados individuais de porosimetria por intrusão de mercúrio – Volume de Hg por faixa de diâmetro de poro	272

Tabela 54 – Perdas de massa de água e por decomposição do carbonato de cálcio e teores de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio obtidas por análise termogravimétrica.....274

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento da microestrutura durante a hidratação do cimento Portland (SCRIVENER <i>apud</i> BAUER, 1995).....	33
Figura 2 - Representação esquemática dos produtos das reações e microestrutura que se desenvolvem durante a hidratação do cimento Portland (YOUNG et al., 1998 adaptado por CORDEIRO, 2006).	34
Figura 3 - Representação esquemática das noções de teoria da percolação	38
Figura 4 - Aparato para determinação da pega usando pulso ultrassônico, criado por REINHARDT et al. (2000).....	42
Figura 5 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus idade da argamassa (REINHARDT et al., 2000).....	42
Figura 6 - Desenho esquemático da repartição de água dentro de uma unidade estrutural de C-S-H, onde A e B são dois exemplos possíveis (SIERRA, 1974 <i>apud</i> BAROGHEL-BOUNY, 1994).....	46
Figura 7 - Modelo esquemático dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados (FELDMAN & SEREDA, 1968).	47
Figura 8 - Ilustração da definição de volume aparente e volume absoluto (BOIVIN et al., 1998 adaptado por FONSECA SILVA, 2007).....	53
Figura 9 - Evolução esquemática da retração autógena como função do grau de hidratação (ACKER, 1988).....	54
Figura 10 - Representação gráfica da terminologia empregada por Jensen & Hansen (2001a).	55
Figura 11 - Sumário fenomenológico de alteração de volume nas primeiras idades, segundo LANGE (2002).....	56
Figura 12 - Resumo esquemático da possibilidade de ocorrência das deformações autógenas e não autógena no tipos de sistemas proposto por FONSECA SILVA (2007).....	58
Figura 13 - Organograma com a classificação proposta por FONSECA SILVA para as deformações autógenas e não autógenas	61
Figura 14 - $t = 1$ hora. Os grãos de clínquer começam a se hidratar formando o C-S-H. Os íons sulfato, provenientes da dissolução da gipsita, se difundem pela água de amassamento (VERNET et al., 1992 <i>apud</i> BAROGHEL-BOUNY, 1994).....	62
Figura 15 - $t = 2$ horas. Uma quantidade não desprezível de etringita é formada na periferia dos grãos de clínquer (segundo VERNET et al., 1992 <i>apud</i> BAROGHEL-BOUNY, 1994). .	62
Figura 16 - $t = 5$ horas. As camadas de C-S-H na superfície dos grãos de clínquer, assim como os cristais de Portlandita e de etringita começam a se interpenetrar. O material se enrijece: é o início da pega (VERNET et al., 1992 <i>apud</i> BAROGHEL-BOUNY, 1994).....	62
Figura 17 - $t = 9$ horas. Após o consumo da gipsita, ocorre a dissolução da etringita (VERNET et al., 1992 <i>apud</i> BAROGHEL-BOUNY, 1994).....	62
Figura 18 - $t = 28$ dias. A hidratação conduz à autodessecação. Os poros capilares se esvaziam pouco a pouco (VERNET et al., 1992 <i>apud</i> BAROGHEL-BOUNY, 1994).	63

Figura 19 - Curva calorimétrica de hidratação de um material cimentício, (VERNET et al., 1992 <i>apud</i> BAROGHEL-BOUNY, 1994).....	63
Figura 20 - Ilustração da equação de Kelvin-Laplace para o caso de um menisco esférico dentro de um capilar cilíndrico, não saturado (GENNES et al., 2002)	66
Figura 21 - Representação esquemática da adsorção da água em um capilar de pasta de cimento (BAZANT, 1972 adaptado por MELO NETO, 2008).....	70
Figura 22 - Pressão de disjunção: (a) material seco e (b) material com água adsorvida, segundo VISSER (1998) <i>apud</i> KOVLER e ZHUTOVSKY (2006).	71
Figura 23 - Representação esquemática de uma seção de uma pasta de cimento em hidratação. Esquerda: baixo grau de hidratação. Direita: alto grau de hidratação.	73
Figura 24 - Correlação entre retração autógena do concreto e o teor de sílica ativa aos 40 dias de idade (BROOKS et al., 1999).	75
Figura 25 - À esquerda, dispositivo de medida unidirecional e horizontal, desenvolvido por JENSEN e HANSEN (1995a). À direita, detalhe do tubo corrugado.	80
Figura 26 - Moldes e corpos de prova para os ensaios de retração realizados por KOJIMA et al. (2001).....	80
Figura 27 - Visão geral do programa experimental.....	95
Figura 28 - Curva granulométrica da areia natural.....	99
Figura 29 - Curva granulométrica da brita.	100
Figura 30 - Análises petrográficas dos agregados: a) areia natural, b) brita 19 mm.....	100
Figura 31 - Curvas de dosagem dos concretos estudados.	102
Figura 32 - Moldagem de corpos de prova: a) formas cilíndricas; b) ensaios de retração, e c) ensaios de fluência.....	105
Figura 33 - Ensaios realizados no concreto fresco: a) abatimento do tronco de cone; b) teor de ar incorporado e c) massa específica.	107
Figura 34 - Procedimento para determinação do patamar de percolação, usando método ultrassônico. (a) calibração do aparelho; (b) gel nos transdutores para garantia do contato com o concreto; (c) detalhe da forma revestida com chapa de poliestireno 2 mm e do transdutor acoplado à forma; (d) moldagem do corpo de prova; (e) corpo de prova moldado e selado com filme plástico e (f) equipamento de ultrassom utilizado.	110
Figura 35 - Forma para ensaio de retração autógena.....	111
Figura 36 - Seqüência de preparação do corpo de prova para determinação da retração autógena: a) desmoldagem do corpo de prova, b) corpo de prova desmoldado, c) selagem com filme plástico em 03 camadas, d) corpo de prova selado com o filme plástico, e) envolvimento com a fita de alumínio e f) corpo de prova completamente selado pronto para a continuação do ensaio de retração autógena.	112
Figura 37 - Extensômetro elétrico tipo Carlson: a) representação esquemática, b) extensômetro modelo M4 e a ponte de leitura.....	113
Figura 38 - (a) Sistema para aquisição automática da UR com <i>datalogger</i> e (b) detalhe dos sensores de umidade (capacitivo) e de temperatura (NTC).....	115
Figura 39 - Sensores introduzidos nos concretos selados com filme plástico e fita de alumínio.....	116

Figura 40 - Sensores acoplados ao sistema de aquisição de temperatura e umidade.	116
Figura 41 - Retração por secagem: a) corpos de prova em água saturada com cal e b) corpos de prova estocados em sala climatizada.	116
Figura 42 - Resistência à compressão: preparação dos corpos de prova – a) retífica, b) topos retificados e c) envoltos com filme plástico.	118
Figura 43 - Ensaio de resistência à tração na flexão: a) ensaio e b) ruptura.	119
Figura 44 - Ensaio de módulo de elasticidade.	120
Figura 45 - Ensaio de penetrabilidade a íons cloretos: a) amostras, b) selagem com epóxi, c) saturação à vácuo, d) colagem com silicone, e) célula pronta e f) vista geral do ensaio.	122
Figura 46 - Ensaio de permeabilidade á água sob pressão: a) corpos de prova na campânula, b) Seixo colocado sobre o filtro, de modo a distribuir e orientar o fluxo de água, c) fechamento da campânula e d) disposição geral dos permeâmetros.	124
Figura 47 – Determinação da profundidade de carbonatação com paquímetro digital, após aplicação do indicador de fenolftaleína no concreto.	125
Figura 48 - Ensaio de absorção por capilaridade: a) secagem em estufa, b) corpos de prova sobre lâmina d'água, c) pesagem e d) corpo de prova rompido, mostrando a ascensão capilar da água.	126
Figura 49 - Ensaio de absorção por imersão: a) corpos de prova imersos, b) secagem do corpo de prova para pesagem em condição sss e c) pesagem imersa.	127
Figura 50 – Influência do ARR no concreto fresco.	137
Figura 51 - Aspecto do concreto C80 após abatimento: a) C80_0 e b) C80_2.	138
Figura 52 – Determinação do patamar de percolação com ultrassom para os concretos: a) C80 e b) C60.	140
Figura 53 - Retração autógena livre dos concretos estudados em função do tempo (a, b e c) e resultados médios de variação de massa de água em relação à massa inicial, em corpos de prova prismáticos, selados, para os concretos estudados (d).	143
Figura 54 – Efeito da classe na retração autógena dos concretos: (a) valores médios globais de retração autógena em função da classe (relação a/agl) (b) valores médios por teor de ARR em função da classe.	145
Figura 55 – Variação da retração autógena em função do teor de aditivo, nas diversas idades, para as classes de concreto estudadas.	146
Figura 56 – Efeito do teor de ARR na retração autógena dos concretos: (a) valores médios globais de retração autógena em função do teor de ARR e (b) valores médios por classe função do teor do ARR.	148
Figura 57 – Retração autógena determinada por métodos de medição distintos: com extensômetros elétricos (C) e relógios comparadores (R) – a) concreto classe C80 e b) concreto classe C60.	151
Figura 58 – Comparação entre os valores de retração autógena determinado em ensaio (observado) e os preditos pelo modelo considerando todas as classes de resistência C40, C60 e C80.	153
Figura 59 – Comparação entre os valores de retração autógena determinado em ensaio (observado) e os preditos pelo modelo considerando os concretos C60 e C80.	154

Figura 60 - Umidade relativa interna do concreto em função do tempo para os concretos C60_0 (sem ARR) e C60_2 (com 2% ARR) sob condições seladas: (a) ao longo de 150 dias e (b) nos primeiros 10 dias.	155
Figura 61 - Umidade relativa interna do concreto em várias idades e o efeito do ARR.	157
Figura 62 - Comparação entre a umidade relativa interna e a retração autógena do concreto C60 com e sem ARR, até a idade de 140 dias; (a) umidade relativa interna e (b) retração autógena.....	158
Figura 63 - Resultados médios de retração por secagem determinados em corpos de prova prismáticos de 10mm x 10mm x 30mm, após 28 dias de cura submersa: (a) C80, (b) C60 e (c)C40 e (d) resultados médios de variação de massa de água em relação à água inicial, determinados em corpos de prova prismáticos curados ao ar.	160
Figura 64 – Efeito da classe de resistência e do teor de ARR na retração por secagem dos concretos: (a) valores médios globais em função da classe de resistência e (b) valores médios globais em função do teor do ARR.	163
Figura 65 – Efeito da interação entre classe de resistência e teor de ARR na retração por secagem dos concretos estudados.....	163
Figura 66 - Efeito do teor de ARR na resistência à compressão dos concretos: (a) valores médios globais em função do teor de ARR e (b) valores médios por classe em função do teor do ARR.	168
Figura 67 - Efeito da interação entre teor de ARR, classe de resistência e idade (dias) para os concretos investigados.	169
Figura 68 – Evolução do crescimento da resistência relativa aos 28 dias de idade: (a) nas diversas idades e (b) até 28 dias.	171
Figura 69 – Influência da classe (a) e da idade (b) na resistência à tração por compressão diametral dos concretos	174
Figura 70 – Influência da classe (a) e a interação dos 03 fatores (b) na resistência à tração na flexão dos concretos	176
Figura 71 – Correlação entre os valores de $f_{t_{sp}}$ e f_c obtidos experimentalmente e a equação	178
Figura 72 – Comparação entre os modelos de predição de resistência à tração por compressão diametral ($f_{t_{sp}}$) a partir da resistência à compressão (f_c)	179
Figura 73 – Variação da relação $f_{t_{sp}}/f_c$ em função da idade para os concretos estudados....	179
Figura 74 - Correlação entre os valores de f_r e f_c obtidos experimentalmente.....	180
Figura 75 – Comparação entre os modelos de predição de resistência à tração na flexão (f_r) a partir da resistência à compressão (f_c)	181
Figura 76 – Variação da relação f_r/f_c em função da idade para os concretos estudados.	181
Figura 77 – Influência do ARR (a) e a interação dos 03 fatores – ARR, idade (dias) e classe de resistência (b) no módulo de elasticidade dos concretos	184
Figura 78 – Correlação entre o módulo de elasticidade (E_c) e a resistência à compressão (f_c) obtidos experimentalmente e a comparação com outros pesquisadores e a NBR 6118.....	186
Figura 79 – Representação da fluência básica a partir dos resultados dos ensaios (SANTOS, 2010).....	187

Figura 80 – Taxa de fluência básica (F_j) dos concretos C80 e C60, com e sem ARR, e os respectivos desvios padrão.	188
Figura 81 – Evolução da tensão instalada em um ponto de estrutura comparada com as evoluções das resistências à tração direta e à flexão para o concreto C80 referência (C80_0) e C80 com 2% de ARR (C80_2).	193
Figura 82 – Valores médios de penetrabilidade de íons cloreto para cada classe em função do teor de ARR, na idade 90 dias.	196
Figura 83 – Valores médios globais em função da classe (a) e em função do teor de ARR(b)	197
Figura 84 – Correlação entre resistência à compressão dos concretos estudados e a carga passante do ensaio de penetrabilidade de cloretos.....	197
Figura 85 – Concretos, após aplicação do indicador fenolftaleína, submetidos a 03 anos de carbonatação natural	201
Figura 86 – Valores médios dos coeficientes de carbonatação natural e os respectivos desvios padrão.	202
Figura 87 - Influência dos fatores isolados e da interação entre os dois fatores na absorção por capilaridade.....	205
Figura 88 – Efeito da classe (a) e do teor de ARR (b) na absorção total por imersão dos concretos estudados	207
Figura 89 – Efeito da interação entre classe e teor de ARR na absorção total dos concretos	208
Figura 90 – Efeito da presença do ARR (a) e da interação entre o ARR, a idade e as pastas no volume total de mercúrio intrudido nas pastas (b)	210
Figura 91 - Efeitos de dois e três fatores no volume de mercúrio intrudido para as pastas (P60 e P80) de cimento.	216
Figura 92 – Curvas TG e DTG (a) da P60 e (b) P80	218
Figura 93 – Gráfico com curvas TG e DTG, esquemático dos pontos considerados para determinação das perdas de massa.	219
Figura 94 – Evolução da água combinada do C-S-H, etringita, aluminatos e monossulfato (a) e (b) e da água total quimicamente combinada (c) e (d) em função da idade e teor de ARR das pastas estudadas.	220
Figura 95 – Efeito da idade e da presença do ARR no CH das pastas estudadas: (a) P60 e (b) P80	221
Figura 96 – Efeito da idade e da presença do ARR no CaCO ₃ das pastas estudadas: (a) P60 e (b) P80	223
Figura 97 – Efeito do aditivo redutor de retração – ARR na difração de raios X: (a) P60 e (b) P80, com 1 dia de idade.....	226
Figura 98 – Efeito do ARR na intensidade do pico principal do hidróxido de cálcio – CH nas pastas P60, (a) com 1 dia de idade e (b) com 28 dias de idade.	227
Figura 99 – Efeito do ARR na intensidade do pico principal do hidróxido de cálcio – CH nas pastas P80, (a) com 1 dia de idade e (b) com 28 dias de idade.	227

Figura 100 – (a) Aspecto da superfície da pasta P60_2, com 1 dia de idade, apresentando elevada pulverulência e (b) espectro da microanálise realizada no centro da imagem, em X, região com grande concentração de sílica ativa e grãos anidros de cimento.	229
Figura 101 – (a) Região da pasta P60_1, aos 3 dias, com maior pulverulência, em meio a hidratos - C-S-H e (b) ampliação da região de pulverulência, com indícios de formação de C-S-H.....	230
Figura 102 – Aspecto geral da P80_0, aos 7 dias, mostrando (a) poros tamponados e (b) com aglomerações de sílica ativa.	231
Figura 103 – Aspecto geral da P80_2, aos 7 dias, mostrando (a) poros tamponados e (b) com precipitações de sílica ativa.	231
Figura 104 – Aspecto geral da P60_0, aos 28 dias, mostrando (a) muitos poros tamponados e (b) com aglomerações de sílica ativa.....	231
Figura 105 – Aspecto geral da P60_1, aos 28 dias, mostrando (a) poros tamponados e (b) com aglomerações de sílica ativa, em processo de tamponamento.....	231
Figura 106 – Aglomerações de cristais nos poros das pastas aos 07 dias de hidratação, em meio às partículas de sílica ativa em reação: (a) P60_0, (b) P60_2, (c) P80_0 e (d) P80_2.	232
Figura 107 – Espectros das microanálises realizadas (a) no centro da Figura 108a e (b) à esquerda da Figura 108d.....	232
Figura 108 – Regiões com hidróxido de cálcio (CH), em placas, em meio a hidratos (C-S-H), aos 03 dias de idade: (a) pasta P60 sem ARR e (b) pasta P60 com 1% de ARR.	233
Figura 109 – (a) Aspecto do hidróxido de cálcio na pasta P60 com 1% de ARR, aos 7 dias, em placas delgadas e (b) aos 28 dias, com morfologia hexagonal no interior de um poro.....	233
Figura 110 –Aspecto dos cristais de hidróxido de cálcio na pasta P80, com 1 dia de idade: (a) sem morfologia definida na pasta sem ARR e (b) hexagonal típica na pasta com 1% de ARR.	234
Figura 111 – Regiões de hidróxido de cálcio: (a) organizado em estruturas curvas na pasta P80 com 1% de ARR, aos 7 dias e (b) em placas mais robustas na pasta P80 sem ARR, aos 28 dias.....	234
Figura 112 – Cristais de etringita (a) na pasta P80, aos 3 dias de idade, com 1% de ARR e (b) na pasta P80 referência, aos 7 dias.	235
Figura 113 – Cristais de etringita (a) na pasta P80, aos 7 dias de idade, com 2% de ARR e (b) na pasta P80 referência, aos 28 dias.	235
Figura 114 – (a) Formação diferenciada na pasta P60, com 1% de ARR, aos 3 dias de idade, em meio a grãos de sílica ativa, com ampliação no canto superior direito e (b) espectro da análise química, no centro da amostra, como indicado.	236
Figura 115 – (a) Formação diferenciada na pasta P60, com 2% de ARR, aos 3 dias de idade, incrustada em hidratos, com ampliação no canto superior esquerdo e (b) espectro da análise química no centro da amostra, como indicado.	237
Figura 116 – (a) Formação diferenciada na pasta P80, com 1% de ARR, aos 28 dias de idade e (b) espectro da análise química.	237
Figura 117 – Curvas TG e DTG da pasta P80, com 0, 1 e 2% de ARR, nas idades de 3 dias (a), 7 dias (b), 28 dias (c) e 90 dias (d).....	273

Figura 118 – Curvas TG e DTG da pasta P60, com 0, 1 e 2% de ARR, nas idades de 3 dias (a), 7 dias (b).....	273
Figura 119 – Curvas TG e DTG da pasta P60, com 0, 1 e 2% de ARR, na idade de 28 dias	274
Figura 120 – Difratoograma da pasta P60 aos 3 dias de idade: efeito do aditivo redutor de retração – ARR.....	275
Figura 121 – Difratoograma da pasta P60 aos 7 dias de idade: efeito do aditivo redutor de retração – ARR.....	275
Figura 122 – Difratoograma da pasta P60 aos 28 dias de idade: efeito do aditivo redutor de retração – ARR.....	276
Figura 123 – Difratoograma da pasta P80 aos 3 dias de idade: efeito do aditivo redutor de retração – ARR.....	276
Figura 124 – Difratoograma da pasta P80 aos 7 dias de idade: efeito do aditivo redutor de retração – ARR.....	277
Figura 125 – Difratoograma da pasta P80 aos 28 dias de idade: efeito do aditivo redutor de retração – ARR.....	277

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CAR	Concreto de alta resistência
Å	angstrom
a/agl	Relação água/aglomerante
a/c	Relação Água Cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARR	Aditivo Redutor de Retração
ASTM	American Society for Tests and Materials
C	Coulomb
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C40	Classe de concreto com $f_{ck} \approx 40$ MPa
C ₄ AF	Aluminatoferrita tetracálcico
C60	Classe de concreto com $f_{ck} \approx 60$ MPa
C80	Classe de concreto com $f_{ck} \approx 80$ MPa
CH ou Ca (OH) ₂	Hidróxido de cálcio
C-S-H ou CSH	Silicato de cálcio hidratado
f_{ck}_{28}	Resistência à compressão característica, aos 28 dias
FURNAS	A empresa concessionária de energia elétrica FURNAS Centrais Elétricas S.A.
GPa	Gigapascal
IT.DCT.C.TC	Instrução de Trabalho do Departamento de Apoio e Controle Técnico da área de Tecnologia do Concreto
JCI	Japan Concrete Institute
k	Coefficiente de permeabilidade

kHz	quilohertz
MPa	Megapascal
N	Normal
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
sss	Saturado superfície seca
SiO ₂	Óxido de silício
SO ₄	Sulfato
UR	Umidade relativa
V	Volts

1 INTRODUÇÃO

Esta tese teve origem em um Projeto integrado de Pesquisa e Desenvolvimento aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, com base na Lei 9.991/2000, intitulado “*Fissuração do concreto a poucas idades: modelagem mecânica, numérica e análise experimental*”, proposto por FURNAS Centrais Elétricas S.A., em parceria com a COPPE/UFRJ e UFRGS, tendo como tema central o estudo da retração autógena dos concretos de alta resistência.

O projeto em referência corresponde a duas teses de doutorado que englobam a influência do aditivo redutor de retração nas propriedades mecânicas, elásticas e térmicas e reologia do concreto (FONSECA SILVA, 2007), e a presente pesquisa com o complemento da influência do aditivo redutor de retração nas propriedades mecânicas, elásticas, viscoelásticas, na durabilidade do concreto e ainda no processo de hidratação e microestrutura de pastas.

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

O desenvolvimento do concreto de alta resistência - CAR foi um importante avanço na tecnologia de concreto. Este concreto possui características vantajosas em relação ao concreto tradicional, como maiores resistências, aumento da durabilidade e possibilidade da redução de peso em elementos que trabalham à compressão. Muitas destas características se devem à elevada compacidade e à descontinuidade da estrutura de poros da pasta de cimento, consequência da incorporação de adições minerais, em especial a superpozolanas (sílica ativa, metacaulim, entre outras) e à baixa relação água/cimento alcançada com o emprego de superplastificantes. Justamente por essas propriedades melhoradas este concreto tem sido denominado por um termo mais abrangente, como concreto de alto desempenho – CAD.

Entretanto, a despeito de suas inúmeras vantagens como material estrutural, o CAR tem se revelado mais susceptível à fissuração nas primeiras idades (para efeito desta pesquisa, significam os primeiros 07 dias), limitando o seu uso de forma mais ampla.

Normalmente, a ocorrência de fissuras nas primeiras idades é consequência das alterações volumétricas, que se originam a partir da existência de gradientes térmicos, resultado do

desenvolvimento do calor de hidratação, da retração autógena e da retração por secagem, devido à movimentação hídrica. Se a estrutura não estiver vinculada, o concreto retrai e expande livremente, com poucas conseqüências. Entretanto, as fissuras podem ocorrer se as deformações forem restringidas externamente, por exemplo, por uma estrutura contígua, ou internamente, pela armadura ou até pelo próprio agregado. Em havendo restrição, o que é o comum, as tensões de tração geradas podem desencadear a formação de microfissuras, que tendem a se conectar e formar fissuras, constituindo um sério problema com relação à resistência, durabilidade e estética.

No concreto de alta resistência, o fenômeno da retração autógena é o principal responsável pelas mudanças volumétricas nas primeiras idades e, conseqüentemente, pela geração de fissuras (TAZAWA, 1999), e ocorre de forma mais intensa que nos concretos de resistência normal, uma vez que no CAR há significativamente maior quantidade de material cimentício e menor quantidade de água, o que dá origem a uma estrutura porosa muito refinada logo nas primeiras idades e acarreta uma grande demanda de água, gerando altas magnitudes de tensões capilares.

A retração autógena, causada pela saída de água dos poros capilares devido às reações de hidratação, sem qualquer perda para o meio, é um fenômeno discutido pelo meio técnico desde o início do século XX (LYNAM, 1934 *apud* AİTCIN, 1999b), mas apenas no início da década de 90 foi demonstrado, por meio de investigações laboratoriais, que o surgimento de fissuras em concretos de alta resistência devia-se às deformações autógenas. Entretanto, só a partir de meados dos anos 90 é que intensificaram os estudos sobre retração autógena (TAZAWA et al., 1995; TAZAWA & MIYAZAUA, 1995; HUA et al., 1997; PERSSON, 1998).

É possível perceber, em razão do crescente uso do concreto de alto desempenho e o conseqüente problema de fissuração nas primeiras idades, um amplo esforço da comunidade científica em se aprofundar no assunto, o que se reflete na expressiva quantidade de artigos publicados (HUA et al., 1995, 1996; JENSEN, 1995; TAZAWA & MIYAZAUA, 1995; JENSEN & HANSEN, 1996; SATO et al., 1997; WEISS, 1999; LURA, 2003; BENTZ & JENSEN, 2004; JENSEN & LURA, 2006; entre tantos outros) sobre retração autógena e nos eventos internacionais totalmente dedicados ao debate deste tema, como o *International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete (Autoshrink 98)*, ocorrido em Hiroshima em

1998, os Seminários *Self-Desiccation in Concrete* ocorridos em 1997, 1999, 2002 e 2004, entre outros.

Apesar do grande interesse nas deformações autógenas, ainda não há consenso no meio científico sobre as técnicas de medição e terminologia, embora algumas iniciativas nesse sentido tenham sido feitas pelo Instituto Japonês de Concreto - *Japan Concrete Institute (JCI)*. Ademais, os mecanismos precisos que levam a tal fenômeno não são completamente entendidos, o que dificulta uma abordagem confiável de predição do comportamento das estruturas de concreto.

Apesar da complexidade do fenômeno, várias possíveis soluções para o problema de fissuração nas primeiras idades devida à retração autógenas são apontadas. São elas: o emprego de aditivo redutor de retração, mais comumente utilizado para combater a retração por secagem, controle da distribuição do tamanho das partículas de cimento, modificação da composição mineralógica do cimento, a adição de agregado miúdo leve saturado, o novo conceito de “água incorporada” (polímeros superabsorventes), uso de fibras, emprego de aditivos expansivos e até a combinação de duas ou mais estratégias apresentadas (BENTZ & JENSEN, 2004; KOVLER & ZHUTOVSKY, 2006). Entretanto, alertam os pesquisadores, como qualquer remédio, novos problemas podem ser criados pela aplicação dessas “estratégias mitigadoras”. Assim, devem ser avaliadas em termos de efetividade, facilidade de implementação e efeitos nas propriedades mecânicas e principalmente na durabilidade.

Dentre as soluções mitigadoras da retração autógena, as que apresentam maior aplicação prática são a utilização de materiais que funcionam como reservatórios de água, para ser liberada à medida que evolui a hidratação, dentro do conceito de “cura interna” e o emprego de aditivos redutores de retração - ARR, que agem diminuindo a tensão superficial da água nos poros parcialmente saturados da pasta de cimento. Esta afirmativa encontra sustentação ao se constatar que parte significativa dos estudos de retração autógena dedica-se a essas duas formas de mitigação do fenômeno. Notadamente quanto ao emprego do ARR, originalmente criado para minimizar a retração por secagem, constitui-se numa solução com perspectiva de sucesso no combate ao fenômeno objeto de estudo desta pesquisa.

Dessa forma, a presente pesquisa justifica-se por contribuir para um melhor entendimento do fenômeno da retração autógena e avaliar o comportamento do concreto quando empregado o aditivo redutor de retração (ARR), que segundo pesquisadores, pode minimizar sobremaneira

a retração autógena, e, ainda, verificar sua influência na hidratação e nas propriedades do concreto. Por fim, vislumbra-se que estudos dessa natureza, por proporcionar respostas quanto ao comportamento do concreto de alta resistência, possam colaborar para um emprego mais seguro e confiável do material, além de fornecer subsídios para o estabelecimento de modelos numéricos para a predição do fenômeno e ainda incentivar a elaboração/revisão de normas técnicas que considerem o efeito deste fenômeno nos cálculos de estruturas com CAR, tornando-as mais duráveis.

1.2 ORIGINALIDADE

Em nível nacional, foram encontrados estudos em retração autógena desenvolvidos por Formagini (2005), em concreto, e por Balthar (2005), em pastas, no Laboratório de Estruturas do PEC/COPPE/UFRJ, além do trabalho de Tavares (2008), em concreto, na UFMG. Já com o foco na mitigação das deformações devidas à retração autógena, identificaram-se as pesquisas desenvolvidas por Fonseca Silva (2007), em concretos, na COPPE/UFRJ e por Melo Neto (2008), em pastas e argamassas, na USP. Ambos utilizaram o aditivo redutor de retração como possível solução. No meio internacional, os estudos sobre o fenômeno são vastos, e têm se tornado frequente aqueles devotados ao combate do fenômeno, por meio da incorporação de diferentes materiais (RONGBING & JIAN, 2005; RIBEIRO et al., 2006; QUANGPHU et al., 2008; SCHAFFEL, 2009; SUZUKI et al., 2009; MECHTCHERINE et al., 2009; entre outros) .

Como se vê, no Brasil os estudos sobre o tema ainda são incipientes e a pesquisa apresentada nesta tese propôs-se a investigar a influência do aditivo redutor de retração nas propriedades mecânicas, elásticas e viscoelásticas, e particularmente na durabilidade e na microestrutura de pastas de cimento, linhas muito pouca exploradas na literatura.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é investigar o comportamento do concreto de alta resistência, no tocante a propriedades mecânicas e elásticas nas primeiras idades e à durabilidade, e ainda analisar o impacto no processo de hidratação e microestrutura de pastas quando empregado aditivo redutor de retração.

1.3.2 Objetivos específicos

Investigar a eficácia do aditivo redutor de retração – ARR na redução da retração autógena e na retração por secagem.

Avaliar a influência do ARR no concreto fresco (ar incorporado, abatimento e na transição suspensão-sólido), nas propriedades mecânicas e elásticas (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e na flexão e módulo de elasticidade) do concreto de alta resistência, sobretudo nas idades mais jovens, e na fluência.

Verificar o impacto do ARR sobre a durabilidade dos concretos de alta resistência, no tocante à penetrabilidade de íons cloretos, permeabilidade à água sob pressão, carbonatação, absorção por capilaridade e total.

Utilizar técnicas analíticas para investigar a influência do ARR na hidratação e na formação da matriz porosa.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Esta proposta de tese está dividida em 6 capítulos e 2 apêndices. No capítulo 2, que dá seqüência a este capítulo 1 introdutório, trata-se de todo o processo de hidratação do cimento, da formação da microestrutura, com sua porosidade e água em diferentes estados, indispensáveis para o estudo da retração. Destaca-se também a importância de definição do

patamar de percolação – momento que o material deixa de ser um fluido e passa a comportar-se como sólido.

O capítulo 3 expõe o estado da arte sobre a retração autógena, apresentando a falta de consenso sobre a terminologia adotada para as variações volumétricas nas primeiras idades e a falta de padronização quanto aos métodos de medição da retração autógena, o que torna difícil a comparação de resultados. São mostrados também os diversos mecanismos que podem explicar o fenômeno, além das várias formas de mitigá-lo. Apresenta-se o ARR, com sua influência nas propriedades dos materiais cimentícios e por fim, a contribuição desta pesquisa.

No capítulo 4 é mostrado o programa experimental, onde são apresentados os materiais utilizados e sua caracterização, os concretos estudados e os procedimentos empregados para a realização dos ensaios.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e as discussões sobre a influência do ARR no ar incorporado, abatimento e tempo de pega (ultrassom e Vicat), na retração autógena, na resistência à compressão, na resistência à tração na flexão, na resistência à tração por compressão, no módulo de elasticidade e na fluência. São mostrados também os resultados de penetrabilidade de cloretos, carbonatação ao natural, permeabilidade à água e absorção capilar e por imersão dos concretos contendo ARR. O resultado obtido com a determinação da umidade relativa interna dos concretos com e sem ARR, mas principalmente as observações obtidas com o estudo da microestrutura, a partir das técnicas de porosimetria por intrusão de mercúrio – Hg, análise termogravimétrica, difração de raios x e microscopia eletrônica de varredura, são mostradas neste capítulo.

Por fim, no último capítulo – Capítulo 6 - são apresentadas as principais conclusões e as recomendações para estudos futuros. Na sequência deste capítulo estão as referências bibliográficas.

No Apêndice A, constam os resultados individuais dos ensaios realizados em concreto e no Apêndice B, os resultados individuais dos ensaios realizados em pastas.

2 DA HIDRATAÇÃO À FORMAÇÃO DA MICROESTRUTURA

2.1 INTRODUÇÃO

Uma abordagem sobre a hidratação do cimento e a formação da microestrutura da pasta de cimento é essencial para se compreender os mecanismos que dão origem às alterações volumétricas nas primeiras idades do concreto. Com este objetivo, neste capítulo, apresenta-se uma discussão sobre as reações químicas de hidratação, sobre o processo de endurecimento, a formação da microestrutura, a porosidade da pasta de cimento Portland e os estados da água.

2.2 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

A hidratação é uma reação exotérmica irreversível que ocorre quando os compostos anidros do cimento Portland (sólido) entram em contato com a água, formando um novo sólido – os hidratos. O processo da hidratação acontece por dissolução-precipitação que, de acordo com Boivin (2001), pode ser descrito em três fases:

- em contato com a água, o cimento anidro se dissolve em íons que se acumulam na fase aquosa;
- desse ponto em diante, a evolução do sistema é regida pelo fato de o cimento anidro ser mais solúvel que os hidratos formados. Esta diferença de solubilidade entre os sólidos anidros e os hidratos constitui o mecanismo motor da hidratação. Durante a dissolução do cimento, a composição da solução evolui de tal forma que se enquadra entre o limite da solubilidade do sólido em fase de dissolução e aquele em curso de formação. A fase aquosa é então dita supersaturada tendendo aos hidratos. Esta solução supersaturada se espalha e leva à precipitação dos hidratos;
- a precipitação dos hidratos conduz a uma redução da concentração de partículas em solução e permite uma nova passagem em solução do cimento.

Além do processo dissolução-precipitação que, segundo Mehta e Monteiro (2008), é o preponderante nos estágios iniciais da hidratação do cimento, os autores apresentam o

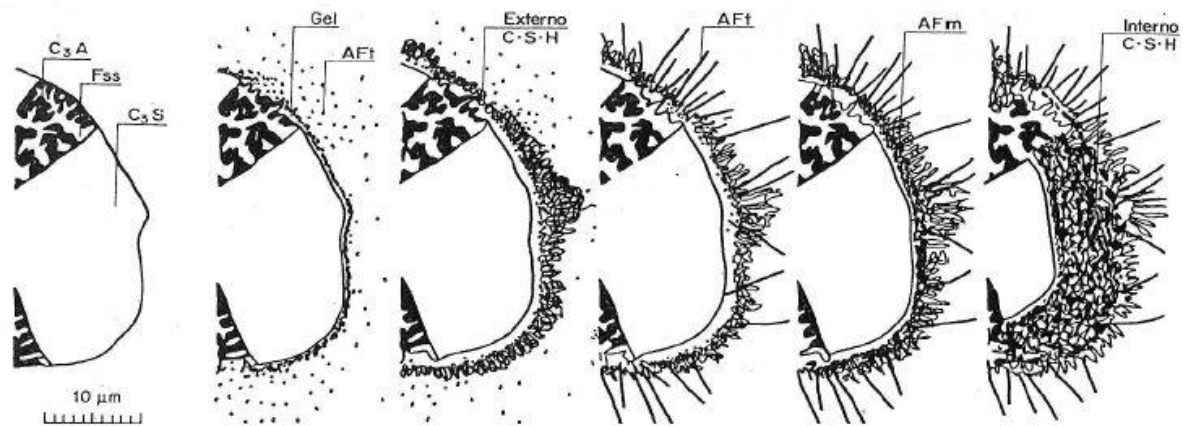
mecanismo de hidratação no estado sólido ou topoquímico, no qual as reações ocorrem diretamente na superfície dos componentes do cimento anidro sem entrarem em solução, em estágios posteriores, em razão de a mobilidade iônica estar restrita.

Como todas as reações de hidratação são exotérmicas é possível monitorar as taxas de reação através da quantidade de calor liberado em função do tempo de reação. Assim, o processo de hidratação pode ser dividido em três estágios (UCHIKAWA,1986), e discutidos a seguir:

Estágio I (pré-indução e indução) – é o período inicial da hidratação. Logo após a mistura, uma camada gelatinosa é formada sobre a superfície dos grãos, sendo esta possivelmente amorfa, coloidal e rica em Al e Si, contendo expressivas quantidades de Ca e SO₄. Após 10 minutos, agulhas de etringita (AFt) são formadas a alguma distância do grão do cimento (Figuras 1a e 1b). Este estágio, segundo Lura (2003), corresponde ao primeiro pico da liberação de calor medida em calorímetro isotérmico, devido principalmente à reação do C₃A com o gesso, formando a etringita.

Estágio II – período entre 3 a 24 horas, no qual 30% dos grãos de cimento reagem, formando rapidamente C-S-H (silicato de cálcio) e CH (hidróxido de cálcio). O C-S-H forma uma fina camada em torno do grão de cimento, envolvendo-o, ocorrendo nucleação de forma ocasional das agulhas de AFt (Figura 1c). Forma-se um espaço entre a camada externa e o grão anidro, contendo uma solução altamente concentrada ou coloidal. A existência de espaços demonstra que a reação de hidratação ocorre por dissolução-precipitação. Os silicatos anidros são dissolvidos e precipitam-se na camada externa envolvente ao grão. Ao final desse estágio, constata-se nova germinação de cristais de AFt de forma mais acicular do que inicialmente (Figura 1d).

Estágio III – período final da hidratação. O C-S-H fica depositado internamente ao grão por causa do decréscimo da permeabilidade da camada envolvente do grão. Em grãos maiores, os espaços são preenchidos completamente em 7 dias (Figuras 2.1e e 2.1f). A concentração de sulfatos cai rapidamente na região interna devido à reação da fase aluminato (AFt se transforma em AFm). Os produtos formam uma densa camada em volta da partícula original que age como uma barreira para a difusão de íons. Após preenchimento do espaço entre a camada externa e o grão anidro, as reações são lentas, ocorrendo por mecanismo topoquímico. (Figura 1e).



a. Seção de um grão polimineral anidro

b. 10 minutos

Parte do C_3A reage com sulfato de cálcio em solução. Forma-se um gel amorfo sobre a superfície, rico em aluminato, ocorrendo nucleação de pequenas agulhas de AFt.

c. 10 horas

Reação do C_3S produzindo C-S-H externo à superfície do grão ocorrendo nucleação a partir das agulhas de AFt.

d. 18 horas

Hidratação secundária do C_3A produzindo longas agulhas de AFt. Início da formação de C-S-H interno, através da continuidade da hidratação do C_3S .

e. 1 a 3 dias

C_3A reage com algum AFt da região interna formando placas hexagonais de AFm. A contínua formação dos produtos internos reduz a separação entre a região anidra e a camada externa hidratada.

f. 14 dias em diante

Suficiente C-S-H interno foi formado para preencher o espaço entre o grão e a camada externa. O C-S-H externo torna-se mais fibroso.

Figura 1 - Desenvolvimento da microestrutura durante a hidratação do cimento Portland (SCRIVENER *apud* BAUER, 1995).

Outra forma de se visualizar o processo de hidratação é mostrada na Figura 2 (YOUNG *et al.*, 1998), com a descrição esquemática dos produtos de hidratação do cimento Portland formados e sua microestrutura. À medida que se forma uma matriz contínua de C-S-H, na qual estão incorporados grãos de cimento anidros, monosulfoaluminatos de cálcio e cristais de hidróxido de cálcio, ocorre a redução da porosidade da pasta. É mostrado, também, o intervalo concernente à pega, que se refere à mudança progressiva do estado fluido para o sólido, tratada mais detalhadamente em itens posteriores. O início do endurecimento acontece quando a mistura deixa de ser deformável (fim de pega) e se transforma em massa rígida.

É importante também mencionar que no concreto de alta resistência (ou de alto desempenho) por seu baixo teor de água (baixas relações a/agl) para hidratar as partículas do cimento Portland, ainda em idades avançadas é possível encontrar expressivas quantidades de compostos anidros, comparativamente ao concreto de resistência normal.

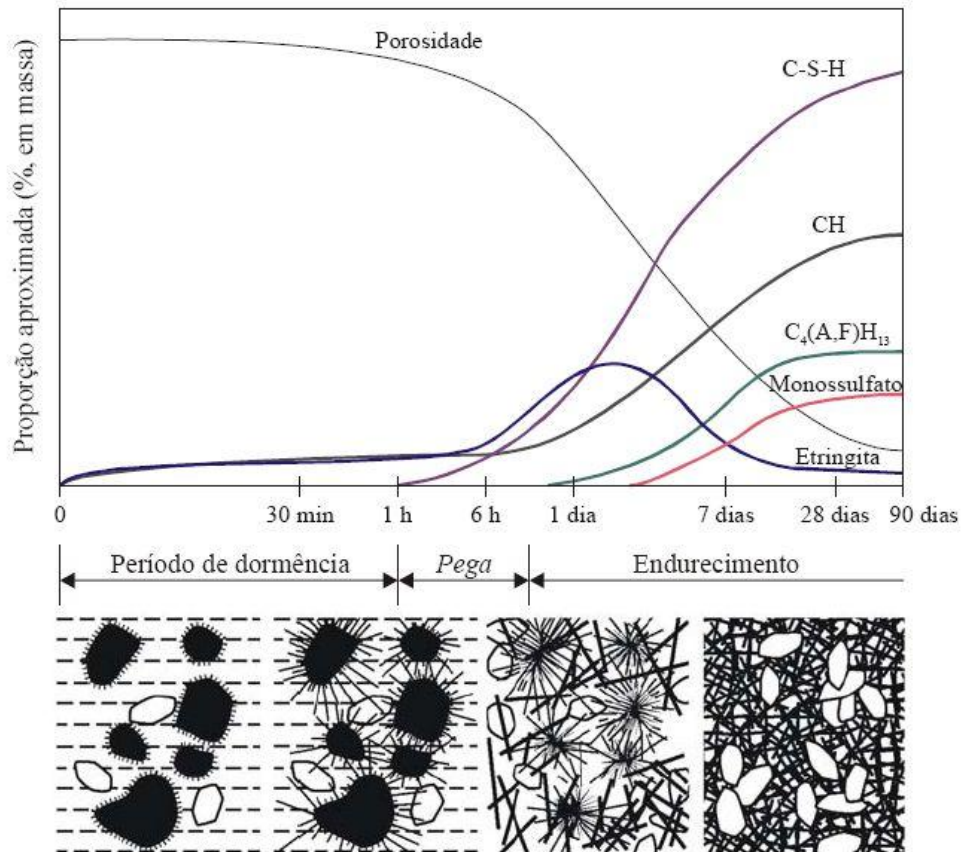


Figura 2 - Representação esquemática dos produtos das reações e microestrutura que se desenvolvem durante a hidratação do cimento Portland (YOUNG et al., 1998 adaptado por CORDEIRO, 2006).

2.2.1 Sílica Ativa

Com a incorporação da sílica ativa à pasta de cimento, sua característica química e a forma dos produtos de hidratação são modificadas. A sílica ativa possui uma ação química, efeito pozolânico, na qual as partículas de SiO₂ amorfas e de elevada superfície específica, por serem altamente reativas, reagem com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento, dando origem ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, principal responsável pelas resistências das pastas de cimento hidratado.

De acordo com Uchikawa (1986), no processo de hidratação do cimento-sílica ativa, a adição se dissolve rapidamente, entre 5 e 15 minutos, em solução saturada de Ca(OH)₂. Forma-se C-S-H na superfície das partículas de sílica ativa, tão logo uma quantidade suficiente de

cimento Portland tenha se hidratado para saturar a água dos poros com hidróxido de cálcio. Esse C-S-H tem uma relação Ca/Si menor do que o C-S-H resultante da hidratação do cimento Portland.

2.2.2 Hidratos formados

Os principais produtos de hidratação formados são divididos em 03 classes, de acordo com Bauroghel-Bouny (1994):

a) Hidratos simples ou hidróxidos

- Portlandita (ou hidróxido de cálcio): **Ca(OH)₂** ou CH
- Hidróxido de alumínio: 2 Al(OH)₃ ou AH₃
- Ácido silício (ou silício hidratado): Si(OH)₄ ou SH₂

b) Hidratos binários

- Silicatos de cálcio hidratado: **C-S-H**
- Aluminatos de cálcio hidratados:
 - C₄AH₁₃: aluminato tetracálcico hidratado
 - C₃AH₆: aluminato tricálcico hidratado
 - C₂AH₈: aluminato bicálcico hidratado

c) Hidratos ternários

- Gelenita ou alumino-silicato de cálcio hidratado: C₂ASH₈ ou C-A-S-H
- Sulfoaluminato de cálcio hidratado:
 - Etringita (trissulfoaluminato de cálcio hidratado): **C₃A, 3 C S, H₃₂** (ou 3 CaO, Al₂O₃, 3 CaSO₄, 32 H₂O)
 - Monossulfoaluminato de cálcio hidratado: C₃A, C S, H₁₂ (ou 3 CaO, Al₂O₃, CaSO₄, 12 H₂O)

2.2.3 Grau de hidratação (ξ)

O grau de hidratação, α , conforme van Breugel (1991), é definido como a relação entre a quantidade de cimento hidratado e a quantidade total de cimento disponível na reação, conforme Equação 1:

$$\xi(t) = \frac{\text{Quantidade cimento hidratado}}{\text{Quantidade total de cimento}} = 1 - \frac{\text{Quantidade cimento não hidratado}}{\text{Quantidade total de cimento}} \quad \text{Equação 1}$$

Para: $\xi \in [0,1]$

Sob o ponto de vista teórico, a determinação de um único grau de hidratação, num instante “t”, não é uma tarefa fácil, considerando que as reações de hidratação dos diversos constituintes do cimento possuem cinéticas diferentes e interdependência entre elas. Entretanto, segundo Laplante (1993) *apud* Fairbairn et al. (2003), do ponto de vista prático, o conceito de grau de hidratação demonstra de uma forma global o avanço dessas reações por apresentar uma razoável correlação com as características mecânicas do material, em razão de os C_3S e C_2S - compostos predominantes para o aumento da resistência - contribuírem na reação com os mesmos produtos e por consumirem a mesma quantidade de água.

Embora a determinação da massa de cimento hidratado seja a maior dificuldade associada à definição do grau de hidratação, alguns fatores que envolvem as reações de hidratação podem ser usados como indicadores dessa grandeza. É o caso da liberação de calor e da água combinada: a quantidade de calor gerado num instante “t” dividido pelo calor total gerado para uma hidratação completa, determinada em um calorímetro isotérmico, e a quantidade de água combinada no tempo “t”, determinada por análise termogravimétrica, em relação à quantidade de água combinada para uma hidratação completa (determinada por cálculo estequiométrico sugerido por Powers & Brownyard (1948) *apud* Lura (2003)) são parâmetros que descrevem a evolução do grau de hidratação.

Fonseca Silva (2007) determinou o grau de hidratação do concreto C80_0 (referência) e C80_2 (com 2% de ARR) e verificou que o comportamento de ambos são próximos. Para um mesmo grau de hidratação, de aproximadamente 0,3, o concreto de referência alcança com 25 horas desde o início do ensaio e a mistura com ARR só atinge com 30 h, isto é, houve um retardamento de 5 horas.

2.3 PROCESSO DE FORMAÇÃO DA PASTA

A hidratação do material cimentício é responsável pela transformação de uma suspensão viscosa, no caso do concreto, composta de cimento, agregados e água, em um elemento sólido durável e rígido com capacidade para suportar altas cargas. Essa mudança física é consequência da evolução dos processos químicos da hidratação, que dentro da prática da construção em concreto é caracterizada como enrijecimento, pega e endurecimento.

O *enrijecimento* é a perda de consistência da pasta plástica ou a perda de água livre do sistema e está associado à formação dos produtos de hidratação, à adsorção superficial dos produtos pouco cristalinos (etringita e C-S-H) e à evaporação (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Neville (1997) comenta que *pega* é o termo que faz referência ao enrijecimento da pasta de cimento, mas que em termos gerais, a pega se refere à mudança do estado fluido para um estado rígido. O início da pega corresponde ao ponto que a pasta torna-se não trabalhável; como a pasta não se solidifica repentinamente, um tempo considerável é necessário para que se torne completamente rígida. Este tempo marca o tempo de fim de pega, que não deve ser muito longo para não prejudicar as atividades construtivas (MEHTA & MONTEIRO, 2008). *Os termos início e fim de pega, na prática, são usados para descrever arbitrariamente estados escolhidos de pega* (NEVILLE, 1997). Ao fim da pega, segundo os autores, a pasta de cimento tem pouca ou nenhuma resistência, então é a partir daí que inicia o *endurecimento* - o fenômeno do ganho de resistência com o tempo.

No âmbito da tecnologia do concreto, os termos anteriormente descritos são amplamente empregados e úteis, entretanto, sob a ótica da retração autógena, é indispensável: (i) ter uma compreensão clara dos fenômenos físico-químicos envolvidos na evolução da pasta de cimento, da passagem de suspensão para sólido poroso e a partir daí, (ii) definir a idade adequada a partir da qual as deformações que ocorrem já não são mais devidas ao estado plástico.

2.3.1 Pasta de cimento – de suspensão a sólido poroso

Do ponto de vista físico, Boivin (2001) apresenta as principais fases de formação da pasta de cimento como suspensão, pega e endurecimento, descritas a seguir:

Suspensão: os grãos sólidos do cimento apresentam-se suspensos em uma fase líquida contínua. A floculação é o primeiro fenômeno observado que ocorre em virtude de os grãos de cimento apresentarem cargas positivas e negativas e tenderem a flocular em presença da água. Outros fenômenos como a segregação dos constituintes da mistura e a exsudação podem ocorrer também nesta fase. Uma variação dimensional ocorre quando o material cimentício está fluido – Contração *Le Chatelier*, que pode ser explicada pelo fato de o volume dos hidratos formados ser inferior à soma dos volumes iniciais de cimento anidro e de água. Esta contração plástica não é tão preocupante na prática, pois o material se deforma sem gerar tensões. Quanto à duração, esta fase pode acontecer entre 2 e 24 h, dependendo do tipo de cimento, adições, aditivos e temperatura ambiente.

Pega: a teoria da percolação, proposta por ACKER (1988), permite simular a hidratação do cimento e descrever o fenômeno da pega. Os grãos de cimento, antes isolados na fase de suspensão, começam a ter contato entre si, a partir do desenvolvimento dos hidratos ao redor destes grãos; o estabelecimento das ligações mecânicas entre os grãos aparece de forma aleatória e isolada no volume; as *amas* (subconjuntos contínuos de grãos ligados mecanicamente) se formam em seguida. O aparecimento do primeiro caminho contínuo de grãos ligados mecanicamente atravessando o conjunto constitui o patamar de percolação, que é o primeiro caminho contínuo de grãos mecanicamente ligado, unindo uma face do volume à face oposta. Em teoria, neste momento o material deixa de ser um líquido e passa a ser um sólido. A Figura 3 apresenta um esquema da teoria da percolação.

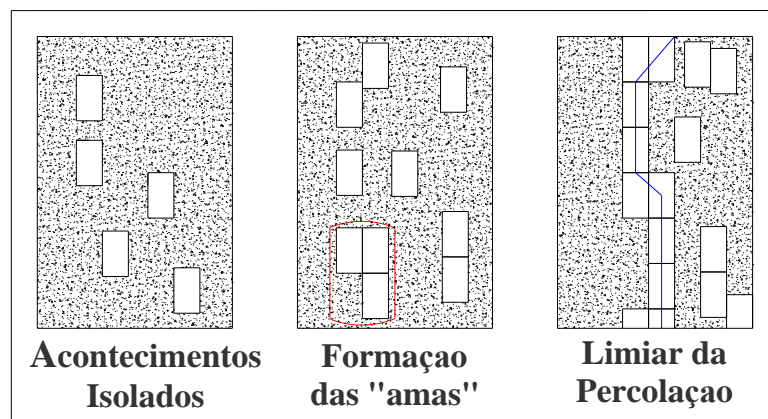


Figura 3 - Representação esquemática das noções de teoria da percolação

Endurecimento: nesta fase, a camada de hidratos que se forma em torno dos grãos de cimento vai se tornando mais e mais densa e menos permeável, o que atrasa a reação sem nunca realmente cessá-la (em concretos centenários encontram-se grãos de cimento anidro). A hidratação continua se processando tendo como consequência (ACKER, 1988):

- i) o crescimento da fase sólida (ou de volume de sólidos), que se traduz por um preenchimento progressivo dos poros capilares pelo hidratos e portanto,
- ii) a diminuição do conteúdo de água no espaço dos poros (este fenômeno, denominado *autodessecação*, é tratado detalhadamente no próximo capítulo).

2.3.2 Patamar de percolação: importância da determinação

No estudo de variações volumétricas dos concretos nas primeiras idades, um aspecto de grande relevância é a distinção entre deformações no estado plástico e aquelas no estado endurecido, o que só é possível com a determinação do tempo exato que o material deixa de ser um fluido e passa a ser um sólido. Este patamar pode ser descrito pela teoria da percolação defendida por Acker (1988), mencionada no item 2.3.1. Isto é particularmente importante para uma análise adequada do comportamento mecânico do concreto em suas idades iniciais, uma vez que irá caracterizar o início do ganho de rigidez e resistência do material e definir o momento a partir do qual pode fissurar.

O Instituto Japonês do Concreto (TAZAWA, 1999), em evento técnico realizado em 1998 (*Autoshrink '98*), já manifestava a necessidade de se medir o início de pega (patamar de percolação, ou mesmo transição suspensão-sólido), e utilizá-lo como t_0 (tempo zero) para a determinação das deformações ocasionadas pela retração autógena. É uma das primeiras iniciativas em se estabelecer um padrão para o ensaio de retração autógena, notadamente quanto à idade inicial de leituras de deformação, para ser considerado em projetos e modelos numéricos. Embora haja muitas pesquisas sobre o assunto em todo o mundo, percebe-se, no entanto, certa lentidão quanto à normalização neste aspecto. A ausência de padronização em todo o meio técnico, nacional e internacional, para um procedimento experimental restringe a comparação de resultados entre diferentes materiais cimentícios e compromete a comparação de modelos teóricos, encontrados na literatura técnica.

A ASTM C 157, que trata da determinação da retração por secagem para cimentos, argamassas e concretos, recomenda que a primeira leitura deva ocorrer decorridas as 24 horas da moldagem. Observou-se ainda que, em vários trabalhos da literatura (LIM & WEE, 2000; BROOKS et al., 1999; entre outros) o início da determinação da retração autógena ocorre em 24 h ou mais. Aïtcin (1999) critica enfaticamente este procedimento, justificando que dessa forma é ignorada a retração autógena de um concreto de baixa relação *a/c*, desenvolvida nas primeiras 24 horas, destacando também que a magnitude da retração autógena desenvolvida nas primeiras 24 horas é função não só da relação *a/c*, mas é também dependente do momento de início das reações de hidratação. Os estudos realizados pelo autor mostram que se uma atenção especial não for dispensada para assegurar que a determinação experimental dessa propriedade comece no ‘tempo zero’, os resultados podem ser substancialmente subestimados. Os resultados de retração autógena obtidos por Fonseca Silva (2007), iniciados a partir do patamar de percolação, mostraram que com 24 h, as deformações por retração autógena representam 30% da retração autógena aos 28 dias, constatação esta que indica a importância da determinação do início da pega, e não após 24 h.

Se a determinação do início de pega é crucial para o progresso no estudo de retração autógena do concreto, cabe então, a pesquisadores e engenheiros, definir os procedimentos mais adequados para isso. Com os ensaios utilizando a Agulha de Vicat - NBR NM 65 (2002) – para pastas e Agulha de Proctor - NBR NM 09 (2002) – para argamassas e concretos (com algumas restrições), a pega e o endurecimento dos materiais nas idades iniciais são investigados por meio da resistência do material à penetração. Com o avanço tecnológico dos últimos anos, segundo Trtnik *et al* (2008), muitos métodos existentes hoje permitem monitorar, de forma relativamente fácil, o início e fim de pega da pasta de cimento, seja na própria pasta, em argamassas ou concretos. São eles: impacto-eco, pulso-eco, velocidade do pulso-ultrassônico, reflexão de ondas, frequência ressonância, emissão acústica, adsorção de microondas, entre outras. Muitos destes ensaios são completamente não destrutivos, o que representa outra grande vantagem sobre os métodos clássicos, mencionados acima.

Em que se pesem as várias alternativas de métodos avançados e não destrutivo para a determinação da transição suspensão-sólido, especial atenção tem sido dada para a utilização do método ultrassônico, com tal fim. Vários pesquisadores (TRTNIK et al., 2008; ROBEYST et al., 2008; FONSECA SILVA, 2007; REINHARDT et al., 2000) demonstraram que o

emprego de uma técnica moderna como o monitoramento ultrassônico da pega e endurecimento de materiais com pastas de cimento Portland é confiável e extremamente prático.

2.3.2.1 Ensaio com medidas de velocidade do pulso-ultrassônico

A mudança de velocidade das ondas ultrassônica com o tempo durante a pega e endurecimento de materiais cimentícios é apresentada em vários trabalhos na literatura (REINHARDT *et al.*, 2000; FONSECA SILVA, 2007; TRTNIK *et al.*, 2008; ROBEYST *et al.*, 2008). Em geral, nas curvas de velocidade x tempo distinguem-se as seguintes fases: na primeira, o período de dormência, caracterizada por valores baixos e constantes de velocidade; após este período, a velocidade aumenta rapidamente no início (segundo estágio) e então mais gradualmente (terceiro estágio) para finalmente alcançar um valor assintótico. Imediatamente após a mistura, a velocidade de ondas em pastas de cimento, argamassas e concretos alcança valores inferiores a 600 m/s, enquanto ondas ultrassônicas podem se propagar na água com a velocidade de 1500 m/s, aproximadamente.

REINHARDT *et al.* (2000) determinaram a pega de argamassas monitorada por ondas ultrassônicas, de maneira automatizada, usando um dispositivo de ensaio desenvolvido pelos autores (Figura 4). As curvas velocidade do pulso ultrassônico versus idade para as três argamassas normal (1:3, em massa), com diferentes relações a/c (0,5, 0,55 e 0,60) estão apresentadas nas Figura 5.

A argamassa é colocada numa espécie de esponja de borracha, em formato de ‘U’, contida por duas chapas de polimetacrilato, unidas por parafusos metálicos. O aparato é adensado numa mesa vibratória. As paredes de polimetacrilato têm sua espessura reduzida de 14 mm para 1,5 mm, no local onde o receptor e o transmissor se encaixam. Isso assegura que a onda atravesse a argamassa tão diretamente quanto possível. A esponja de borracha, capaz de absorver muita umidade, garante a manutenção de uma camada de água entre a argamassa e a parede da forma, assegurando o contato quando a argamassa reduz de volume devido à hidratação.

Os autores mencionam que é necessário realizar mais estudos para correlacionar alguns pontos da curva com o início e o fim de pega do cimento. Considerando a transição de fluido para sólido (t_0), no instante em que ocorreu uma mudança brusca na velocidade de propagação

do pulso ultrassônico, o resultado correspondeu a aproximadamente 2h, nas três misturas. No intervalo de a/c estudado, o tempo t_0 não sofreu alteração.

Essa técnica é adotada neste trabalho para determinação do patamar de percolação. Mais pesquisas são necessárias para determinar como as propriedades se relacionam com o início da capacidade do concreto de transferir tensões.

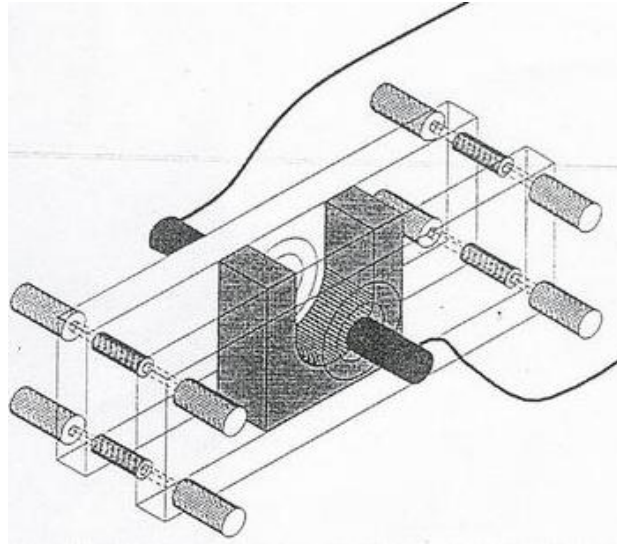


Figura 4 - Aparato para determinação da pega usando pulso ultrassônico, criado por REINHARDT et al. (2000).

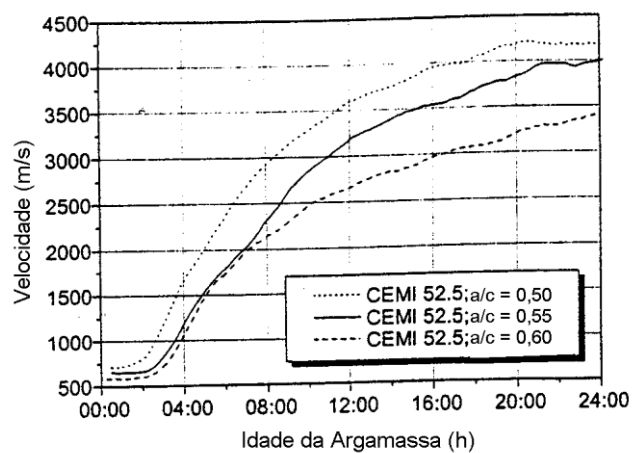


Figura 5 - Curva velocidade do pulso ultrassônico versus idade da argamassa (REINHARDT et al., 2000).

2.3.3 Evolução da porosidade da pasta com a hidratação

À medida que avança a hidratação, concomitantemente à formação dos hidratos, vai se constituindo uma rede de poros, com diferentes características, que além de ter forte influência sobre as propriedades do material, está intrinsecamente relacionada a fenômenos como a retração e a fluência. A saída de água dos poros, dependendo de como estiver ligada ao sólido, pode gerar maiores ou menores deformações devidas a estes fenômenos.

A evolução da porosidade da pasta é relatada neste trabalho baseada nos estudos de Baroghel-Bouny (1994), que utilizou diferentes técnicas experimentais para definir as características relativas à porosidade e à superfície específica da microestrutura da pasta. Os resultados de conclusão da autora estão apresentados a seguir:

Primeiro modo poroso: com poros de raios da ordem de 1000 Å, situados inicialmente entre os grãos de cimento, denominados *poros capilares*. Com a hidratação este primeiro modo poroso dá origem a um segundo modo poroso, com vazios menores (a formação dos hidratos vai progressivamente preenchendo os espaços originalmente ocupados pela água). Esta transição se processa mais ou menos rápido, dependendo da relação a/c da pasta. Para uma a/c elevada, o primeiro modo poroso pode permanecer por vários meses de hidratação, já para uma baixa relação a/c, pode desaparecer a partir do primeiro dia.

Segundo modo poroso: com poros da ordem de 100 a 200 Å, representando a rede porosa remanescente após a formação dos hidratos externos ao grão, situa-se entre as *amas* (conjunto contínuo de grãos interligados mecanicamente) destes hidratos. A porosidade diminui com a hidratação, na medida em que o C-S-H preenche os espaços iniciais intergrãos. Este modo é caracterizado pela união das *amas* dos hidratos, assim, pode ter sua dimensão característica afetada pela distribuição granulométrica inicial.

Terceiro modo poroso: característico dos poros de C-S-H, com poros da ordem de 20 a 50 Å. A porosidade do C-S-H parece ser dependente do tipo de material considerado. A experiência de Baroghel-Bouny (1994) em pastas de alto desempenho, contendo sílica ativa e relação água/sólido = 0,17, apresentou a distribuição de tamanho de poros bem estreita, com um pico em 16,5 Å (C-S-H densos). Para as pastas qualificadas como ordinárias (nas experiências de Baroghel-Bouny, com a/c=0,35), a zona porosa é bem larga, compreendida entre 20 e 50 Å, com pico em 30 Å (C-S-H bem desenvolvidos e fibrosos). A porosidade volumétrica total

intrínseca ao C-S-H (calculada a partir das isotermas de sorção de vapor de água sobre os materiais com idade de um ano e meio) é da ordem de 28% para pastas ordinárias e é menor para pastas ditas de alto desempenho, sendo da ordem de 20%.

De acordo Boivin (2001), podem ser considerados dois extremos destes três modos: i) a porosidade associada a defeitos do material (bolhas de ar, p.ex.), cuja dimensão característica pode variar de micrômetros a milímetros, e ii) porosidade interna do gel de C-S-H (poros inter folhas), cujo pico se situa a alguns Å. A autora destaca, ainda, que a microestrutura da pasta de cimento desenvolve uma grande superfície interna devido ao fato da extrema divisão dos produtos de hidratação e de sua forte porosidade.

2.4 ESTADO DA ÁGUA

Os fenômenos que ocasionam as deformações nas primeiras idades são essencialmente relacionados à remoção de água dos poros da pasta de cimento. Conhecer as diversas formas que a água apresenta na pasta de cimento hidratada é condição indispensável para entendê-los.

Embora se fale em “vazios” na matriz da pasta de cimento hidratada, estes estão sempre com uma determinada quantidade de água. O estado hídrico da pasta depende essencialmente do grau de hidratação do material, da umidade relativa na rede porosa e do tamanho dos poros considerados.

A classificação da água em diferentes tipos é função da maior ou menor facilidade que pode ser removida da pasta. Na literatura encontram-se várias classificações, todavia neste trabalho é apresentada a classificação proposta por Baroghel-Bouny (1994).

- água quimicamente combinada;
- água adsorvida;

o água externa ou interlamelar ($< 20 \text{ \AA}$) - adsorvida sobre a superfície externa das partículas (lamelas);

o água inter folhas (de alguns Angstroms) - fixada nos pequenos espaços entre as folhas das partículas;

- água capilar;
- água livre.

2.4.1 Água quimicamente combinada

A água quimicamente combinada é aquela consumida no curso das reações de hidratação do cimento e que está combinada com os compostos dos hidratos. Segundo Jensen & Hansen (2001b), é também chamada de água não evaporável e somente pode ser expulsa em temperaturas superiores a 105° C. Divide-se em:

- a água de hidroxila: são as hidroxilas OH que fazem parte da estrutura dos hidratos, ligadas quimicamente aos átomos Si e aos átomos Ca;
- a água molecular: é a água de cristalização (REGOURD, 1985 *apud* BAROGHEL-BOUNY, 1994).

2.4.2 Água adsorvida

É a água adsorvida em camadas moleculares sobre a superfície sólida dos poros, submetida à ação de forças intermoleculares de van der Waals (adsorção física) e de forças eletrostáticas (ligações de hidrogênio). Essa água adsorvida está submetida ao campo de forças superficiais que emanam do sólido. Essas forças decrescem à medida que se afastam da parede do sólido. A distinção de fisi- e quimisorção não é muito clara e depende da grandeza das energias da adsorção. A água adsorvida compreende, por exemplo:

- a água ligada por ligações de hidrogênio às hidroxilas dos hidratos, de energia intermediária entre elas de fisi- e quimisorção;
- a água de solvatação dos cátions situados à superfície dos sólidos (REGOURD, 1985 *apud* BAROGHEL-BOUNY, 1994).

A água adsorvida sobre o gel do C-S-H é ligada por meio das ligações de hidrogênio às hidroxilas dos hidratos situadas sobre as faces internas e externas das folhas:

- a água externa (ou interlamelar) é adsorvida sobre a superfície externa das partículas (lamelas). É uma água simplesmente ou duplamente ligada, que possui uma estruturação resultante de ligações de hidrogênio. A dimensão dos espaços inter-partículas (inter-lamelares) é inferior à 20 Å. O espaço médio de uma camada de água adsorvida é de 3 Å, portanto, a água adsorvida externa possui no máximo 6 camadas (PROST, 1987 *apud* BAROGHEL-BOUNY, 1994);
- a água interfolhas é fixada entre as folhas das partículas. Nesses espaços extremamente pequenos (de alguns Angstroms de largura), se aloja uma a duas moléculas de H₂O (POWERS *apud* BAROGHEL-BOUNY, 1994). Parece que somente uma secagem muito forte pode desalojar essas moléculas de água que seriam arrancadas de maneira irreversível (MEHTA, 1986 *apud* BAROGHEL-BOUNY, 1994).

A Figura 6 ilustra a repartição da água adsorvida dentro de uma unidade estrutural de C-S-H com três folhas (SIERRA, 1974 *apud* BAROGHEL-BOUNY, 1994). Representou-se somente a metade das figuras A e B, simétricas em relação ao eixo.

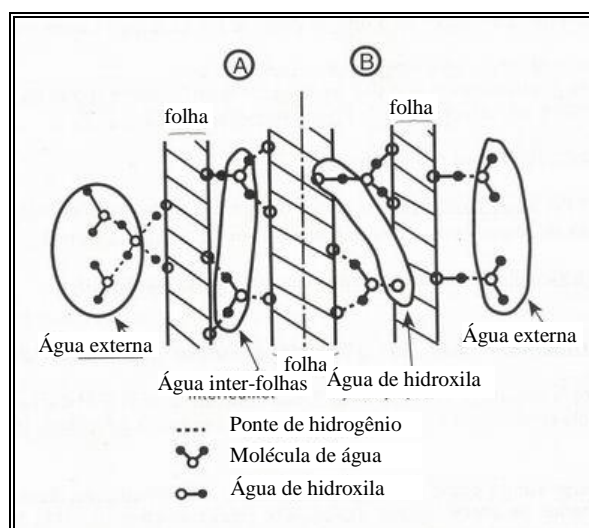


Figura 6 - Desenho esquemático da repartição de água dentro de uma unidade estrutural de C-S-H, onde A e B são dois exemplos possíveis (SIERRA, 1974 *apud* BAROGHEL-BOUNY, 1994).

2.4.3 Água capilar

A água capilar é constituída da fase condensada preenchendo (por condensação capilar) o volume poroso ao lado da camada adsorvida e separada da fase gasosa pelos meniscos. A movimentação da água capilar, quando bem ligada ao sólido por forças de tensão superficial, pode conduzir a deformações da matriz (retração ou expansão). De acordo com Mehta & Monteiro (2008), a água capilar está presente em vazios maiores que 50 Å, e pode ser descrita como o volume de água livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida, além disso, está disponível para a hidratação do cimento.

2.4.4 Água livre

A água livre é constituída da fase condensada que não está mais sob o campo de influência das forças superficiais e que está em equilíbrio com a fase gasosa por intermédio de uma interface plana. Ela pode estar presente dentro dos poros grandes (nas zonas suficientemente afastadas da superfície do sólido). A água livre representa um caso particular da água capilar e é tratada nesse trabalho como pertencente a essa última classe.

Um modelo clássico dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados é o de Feldman & Sereda (1968), apresentado na Figura 7.

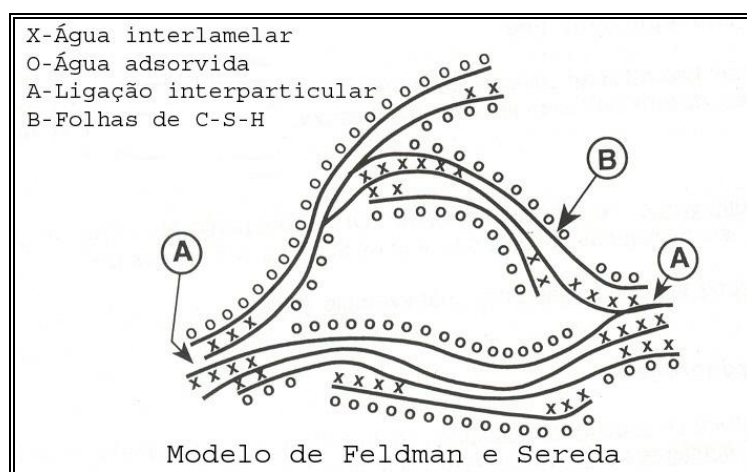


Figura 7 - Modelo esquemático dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados (FELDMAN & SEREDA, 1968).

3 RETRAÇÃO AUTÓGENA

3.1 BREVE HISTÓRICO

O fenômeno da retração autógena não é algo novo na tecnologia do concreto, pelo contrário, a literatura (JENSEN & HANSEN, 2001a) mostra que em 1900, Le Chatelier, um dos pioneiros na pesquisa sobre cimento, descreveu a autodessecação e começou um registro sistemático das propriedades da pasta de cimento.

Em 1927, a umidade relativa interna (hoje é consenso no meio técnico sua forte relação com a retração autógena) foi medida em pastas de cimento com relações a/c de 0,24 a 0,36 e notou-se que a umidade pode ser de 90% após um mês de endurecimento (JENSEN & HANSEN, 2001a). Já em 1934, Lynam¹ (*apud* AÏTCIN, 1999a) usou, pela primeira vez, a expressão *retração autógena* e a definiu como a retração que não é ocasionada por tensões térmicas nem devida à perda de umidade para o meio.

Em 1940, foram publicados os primeiros resultados de ensaios de deformação autógena: neles verificou-se que a magnitude da retração variava de 50 a 100 $\mu\epsilon$, após 5 anos de moldado. Comparada com as deformações de origem térmicas e as de retração por secagem, a retração autógena era quase insignificante. Por essa razão pouca atenção foi dada à deformação autógena nas aplicações práticas de concreto e nas pesquisas por muitos anos (JENSEN & HANSEN, 2001a).

Como resultado da pesquisa de Powers² (*apud* JENSEN & HANSEN, 2001a), entre 1940 e 1950, conseguiu-se descrever e desenvolver cálculos teóricos da composição das fases endurecidas de pastas de cimento. Isto tornou possível análises de medidas de autodessecação. Nestas análises foi observado que a autodessecação não ocorreria para relações água/cimento suficientemente altas, mas que, em relações abaixo de 0,4, a autodessecação era considerável. Mais adiante, nos anos 50, a partir de uma comparação entre retração por secagem e retração

¹ C. G. Lynam, Growth and Movement in Portland Cement Concrete, Oxford Univ. Press, London, 1934, pp. 26-27.

² T. C. Powers, A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete, Proc. Highw. Res. Board 27 (1947) 178 -188.

autógena, foi possível mostrar que a retração pela autodessecação, consequência da retração química, é a causa da deformação autógena.

Nos anos 80, houve uma importante revolução na tecnologia do concreto com o surgimento do concreto de alta resistência ou concreto de alto desempenho. Isto foi possível graças ao desenvolvimento de aditivos eficazes – os superplastificantes - capazes de produzir concretos de trabalhabilidade satisfatória com baixa relação água/cimento e à incorporação de superpozolana, como a sílica ativa ou o metacaulim. Com essas inovações foi possível produzir concretos com resistências muito superiores às usuais na época.

Entretanto, esses novos concretos, pelo alto consumo de cimento por metro cúbico, baixo teor de água e adições minerais de alta reatividade, apresentavam um importante refinamento da estrutura de poros e incrementavam a demanda de água, potencializando uma maior autodessecação e por conseguinte, maior retração, o que leva o material ser mais susceptível à fissuração.

TAZAWA (1999), citando um estudo sobre concreto de alta resistência, comenta que foi observado um estranho fenômeno: o concreto havia fissurado durante cura submersa à temperatura constante. Posteriormente, no Japão, vários fatos foram revelados sobre o processo de fissuração no concreto, destacando as observações de que as fissuras de origem térmica do concreto massa não poderiam ser explicadas somente pela elevação da temperatura e pelas propriedades mecânicas, nem as que surgem em concretos altamente trabalháveis poderiam ser explicadas somente pela retração por secagem. Tais constatações demonstram que o fenômeno da retração autógena pode ocorrer de forma significativa tanto em concreto massa como em concreto de alta resistência.

Apenas no início da década de 90, por meio de investigações laboratoriais, foi demonstrado que o surgimento de fissuras em concretos de alta resistência devia-se às deformações autógenas. Entretanto, somente a partir de meados dos anos 90 foram intensificados os estudos sobre retração autógena (TAZAWA et al., 1995; TAZAWA & MIYAZAWA, 1995; JENSEN & HANSEN, 1996, HUA et al., 1997; PERSSON, 1998).

3.2 TERMINOLOGIA

De um modo geral, pode-se dizer que o fenômeno da retração é caracterizado pelas defomações ao longo do tempo que ocorrem em pastas de cimento, argamassas e concretos, sem que haja qualquer tipo de carregamento. Tal fenômeno está associado a movimentações hídricas, uma vez que na pasta de cimento hidratado, que é um material poroso, a perda de massa de água livre nos poros maiores gera tensões capilares, que provocam a retração do material. Entretanto, para o adequado entendimento da proposta deste estudo, mais do que uma visão generalista do fenômeno, é necessária uma abordagem aprofundada sobre os conceitos e terminologia envolvidos no tema em questão.

Na literatura técnica, não há qualquer consenso sobre a terminologia associada aos fenômenos de deformações de materiais cimentícios nas primeiras idades. Diferentes termos são usados para o mesmo fenômeno e diferentes fenômenos são descritos com o mesmo termo. Como exemplo, a deformação livre (não restringida) de uma pasta de cimento selada, sob temperatura constante, tem sido denominada por retração química, variação química de volume, retração por autodessecação, deformação autógena, retração autógena, variação de volume autógena e retração endógena, entre outras. Outra confusão de nomenclatura pode ser observada quanto aos termos retração plástica, contração *Le Chatelier* e retração química.

Um grupo de pesquisadores japoneses (TAZAWA *et al.*, 1995), precursor de estudos sobre retração autógena em concretos com baixa relação *a/c*, já discutia a inadequação de termos para denominar a retração autógena. Os autores comentam que, àquela época, o termo “*retração de endurecimento*” era frequentemente utilizado para retratar a retração autógena. Ressaltam, porém, que este termo, também chamado de *retração química*, deve ser utilizado para definir o fenômeno em que o volume dos hidratos produzidos pela reação entre o cimento anidro e a água é menor que o volume total do cimento e água. Definem ainda retração autógena como “*redução macroscópica em comprimento sob condições de temperatura constante e sem qualquer migração de umidade para dentro ou fora do concreto*”.

Já em 1999, o *Japan Concrete Institute* – JCI (TAZAWA, 1999) apresenta e adota as seguintes terminologias:

Retração Autógena: redução macroscópica de volume dos materiais cimentícios após o início de pega, não incluindo variação de volume devido à perda ou ingresso de substâncias, variação de temperatura, aplicação de carga externa e restrição. Observa ainda que o fenômeno de redução de volume macroscópico de pasta de cimento, argamassas e concreto causados pela retração química, é denominado como retração autógena.

Expansão autógena: é o aumento do volume macroscópico de materiais cimentícios quando o cimento hidrata após o início de tempo de pega, e não inclui alteração de volume devido à perda ou ingresso de substâncias, variação de temperatura, aplicação de uma força externa ou restrição.

Autodessecação: é o fenômeno em que a pasta de cimento pode estar sujeita à secagem pelo consumo de água capilar no progresso da hidratação do cimento.

Retração química: é o fenômeno em que o volume absoluto dos produtos de hidratação se torna menor que o volume total de cimento anidro e água, podendo ser descrita pela Equação 2:

$$S_{hid} = \frac{(Vc + Va) - V_{hid}}{Vc_i + Va_i} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

S_{hid} : percentual de retração química

Vc_i : volume de cimento antes da mistura

Vc : volume de cimento hidratado

Va_i : volume de água antes da mistura

Va : volume de água que reagiu

V_{hid} : volume de produtos hidratados

A terminologia adotada por Bentur (2002) é descrita a seguir, que se baseou nos termos recomendados pelo JCI:

Retração química: redução de volume microscópica-interna, resultado do fato do volume absoluto dos produtos de hidratação ser menor do que o volume dos reagentes (cimento e água). Essa redução de volume é, de forma aproximada, linearmente proporcional ao grau de hidratação (após as idades iniciais).

Autodessecação: redução na umidade relativa interna de um sistema fechado, quando poros vazios são gerados. Isso ocorre quando a retração química está no estágio em que a pasta desenvolveu um esqueleto auto-suportante, e a retração química (que é um fenômeno interno) é maior que a retração autógena (que é um fenômeno externo).

Retração autógena: redução dimensional macroscópica-externa do sistema cimentício (volumétrica ou linear), que ocorre sob condições isotérmicas e sem troca de umidade ou qualquer outra substância com o meio exterior (cura selada). A retração autógena é causada geralmente pela retração química e as duas são aproximadamente iguais quando o sistema se comporta como fluido. A retração autógena se torna menor que a retração química quando a pasta desenvolveu um esqueleto suficientemente rígido (aproximadamente no tempo de início de pega) e se comporta como um sólido. Dentro desse contexto, o Instituto Japonês do Concreto (JCI) define retração autógena como aquela que ocorre após a pega, com variação de volume antes da pega, devido à retração química, incluída na retração plástica.

Expansão autógena: expansão dimensional microscópica-interna (volumétrica ou linear) de um sistema cimentício que ocorre sob condições isotérmicas e sem troca de umidade ou de qualquer outra substância com o exterior (cura selada). O autor esclarece que esta expansão pode ocorrer imediatamente após o desenvolvimento do esqueleto auto-suportante (aproximadamente no tempo de pega). Tal expansão que é notada freqüentemente em sistemas com relação a/c elevada, mas também algumas vezes em misturas com baixa a/c, imediatamente após a pega, pode ser atribuída a uma série de mecanismos relacionados com a hidratação, tais como pressão de expansão e formação de etringita, conclui o autor.

Deformação térmica: variação de volume ou linear macroscópica-externa induzida por efeitos térmicos. No comportamento nas primeiras idades, as variações térmicas são induzidas pela natureza exotérmica da reação de hidratação e seu resfriamento posterior.

Deformação autógena: definida como variação dimensional macroscópica-externa, num sistema selado, resultado da soma dos três efeitos descritos anteriormente: retração autógena, expansão autógena e deformação térmica. Como o autor adota a definição do JCI, a deformação autógena é aquela que ocorre após a formação do esqueleto auto-suportante, aproximadamente no tempo de pega.

Deformação plástica: variação de volume linear microscópica-externa que ocorre num sistema no estágio quando pode ser tratado como fluido, antes do desenvolvimento do esqueleto sólido auto-suportante, aproximadamente no tempo de pega.

De outra forma, Boivin *et al.* (1999) relatam que o entendimento sobre retração autógena e retração química passa pela definição dos termos *volume absoluto* e *volume aparente*, conceitos estes estabelecidos por Le Chatelier, em 1900, segundo o qual, o volume aparente de uma amostra de pasta de cimento é seu volume externo, isto é, a soma dos volumes de seus diferentes componentes – sólidos, líquidos ou gasosos. Por outro lado, o volume absoluto é definido como a soma dos volumes das fases sólida e gasosa, conforme ilustrado na Figura 8. Partindo destas definições, a autora propõe denominar retração química à redução do volume absoluto cujo efeito no volume aparente (retração autógena) dependerá principalmente da porosidade e da rigidez do material.

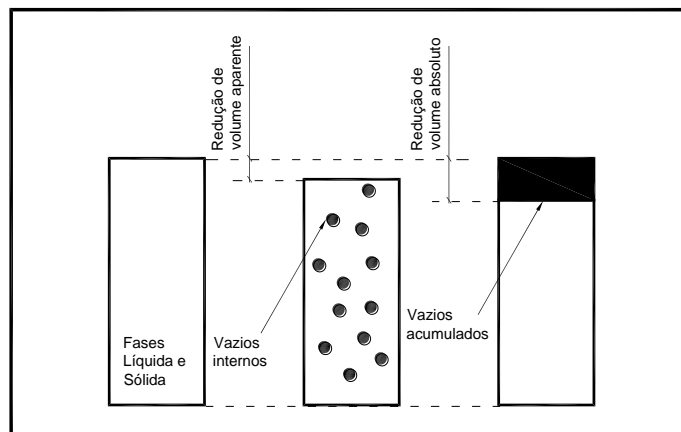


Figura 8 - Ilustração da definição de volume aparente e volume absoluto (BOIVIN *et al.*, 1998 adaptado por FONSECA SILVA, 2007).

As mudanças física e química que ocorrem durante a hidratação são acompanhadas pela redução no volume absoluto, ou seja, o volume combinado de componentes sólidos e líquidos após hidratação é menor que os volumes iniciais de água e cimento anidro. Esta é a definição de *retração química* para Boivin *et al.* (1999). Este fenômeno foi observado pela primeira vez

por Le Chatelier (1900) *apud* Boivin *et al.* (1999) sob as seguintes condições: uma pasta de cimento e água foi introduzida em um balão volumétrico e coberta com água até meia altura do tubo graduado; o experimento consistiu em medir a redução gradual do nível da água, comprovando então, a redução do volume absoluto causada pela hidratação.

Ainda para a autora, a retração autógena (retração por autodessecação) é a redução do volume aparente resultante do processo hidratação, sendo que o mecanismo motor desta retração é a retração química. Dependendo da rigidez e da porosidade do material, a retração química terá efeitos macroscópicos diferentes (Figura 9).

Enquanto o material comporta-se com uma suspensão, a retração autógena é proporcional ao grau de hidratação (parte AB). Quando um esqueleto rígido contínuo é formado, as deformações impostas pela retração química tornam-se mais e mais restringidas (partes BC e CD). Daí em diante, a retração autógena será somente uma pequena parte da retração química.

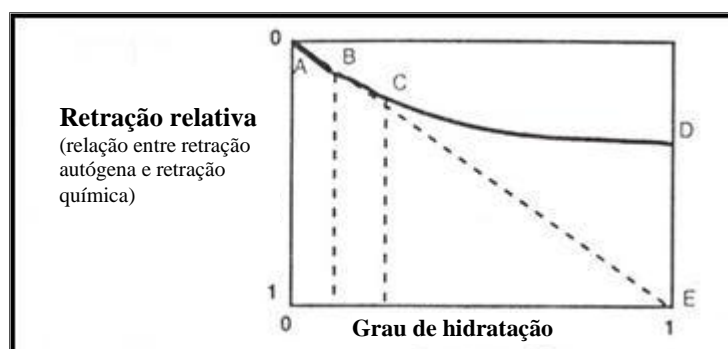


Figura 9 - Evolução esquemática da retração autógena como função do grau de hidratação (ACKER, 1988).

Pesquisadores como Bentz e Jensen (2004) e Jensen e Hansen (2001a) também concordam que há uma confusão generalizada sobre nomenclatura para os fenômenos ora em discussão, e, assim sugerem uma terminologia, descrita abaixo e representada na Figura 10, fundamentando-se nos conceitos introduzidos por Le Chatelier: tratam de retração química, a alteração no volume absoluto e de deformação autógena, a alteração no volume aparente.

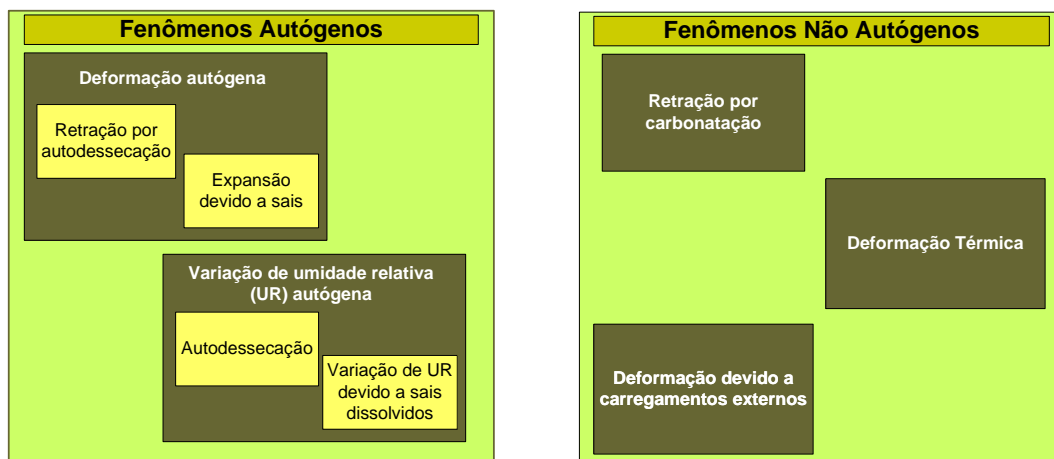


Figura 10 - Representação gráfica da terminologia empregada por Jensen & Hansen (2001a).

- Retração química: redução interna de volume associada com a hidratação do cimento Portland. Este fenômeno causa um sucessivo esvaziamento da estrutura porosa e leva a tensões de tração na água do poro por meio da formação do menisco, que por sua vez acarreta a queda da umidade relativa interna, e assim, a autodessecação ocorre na pasta de cimento. Adicionalmente, o aumento de tensões de tração na estrutura do poro resulta em retração volumétrica macroscópica do concreto endurecido, denominada retração por autodessecação.
- Deformação autógena: deformação volumétrica macroscópica, não restringida, de um sistema de material cimentício isotérmico e fechado, não sujeito a forças externas. Segundo os autores, quando a deformação autógena é uma contração, pode ser referida como *retração autógena*. A *deformação autógena* pode ser causada por diferentes mecanismos, que serão tratados no item 3.3, adiante. Mas, como um exemplo, pode-se citar o crescimento de certos *cristais de sal*, como a etringita, que pode causar a expansão durante a hidratação.
- Retração por autodessecação: retração volumétrica macroscópica de um sistema cimentício isotérmico e fechado causada pela retração química.
- Variação de umidade relativa autógena: mudança na umidade relativa interna em um sistema de material cimentício isotérmico fechado.
- Autodessecação: diminuição da umidade relativa interna em um sistema cimentício isotérmico e fechado causado pela retração química.

Jensen e Hansen (2001a) esclarecem que, para as definições que envolvem fenômenos autógenos, os conceitos físico-químicos devem ser considerados, como sistema isotérmico fechado: o termo fechado significa que não há qualquer troca entre o material cimentício e o ambiente. O mais importante é que a troca de água com o ambiente leva a deformações não autógenas ou mudança não autógena de umidade relativa interna, e que outras substâncias como CO_2 e SO_4^{2-} podem ser importantes nesta conexão. A palavra isotérmica quer dizer que a temperatura é mantida constante.

Para Lange (2002), os principais fenômenos que contribuem para as alterações volumétricas nas primeiras idades do concreto são: dilatação térmica, retração, expansão e fluência e podem ser categorizadas de acordo com a Figura 11.

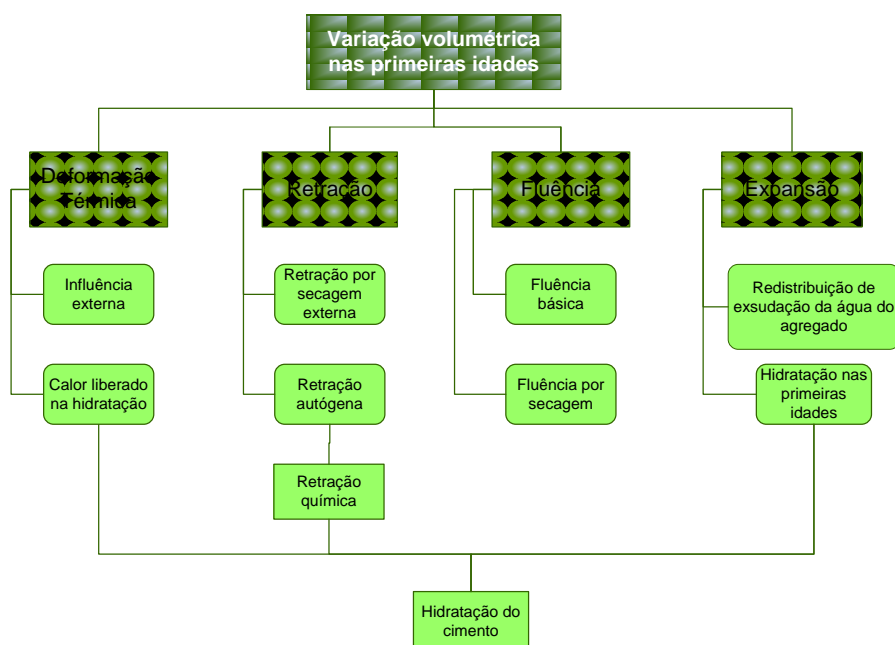


Figura 11 - Sumário fenomenológico de alteração de volume nas primeiras idades, segundo LANGE (2002).

As *deformações térmicas* no concreto ocorrem em razão do calor liberado durante as reações de hidratação do material cimentício e devido a influências ambientais externas. O coeficiente de expansão térmica evolui durante as primeiras horas durante o período de transição em que o concreto passa de material fluido para um esqueleto sólido.

A *retração* pode ser dividida em autógena e secagem. A *retração química* é o mecanismo preponderante da retração autógena e ocorre porque o volume dos produtos de hidratação

torna-se menor que o volume original de cimento e água. A secagem interna ocorre pelo fato de água ser consumida pela hidratação; já a secagem externa é resultante da perda de água da mistura para o meio externo, pela evaporação.

A *fluência*, tradicionalmente, é definida como tendo dois componentes: i) a fluência básica que é a deformação que ocorre ao longo do tempo sob carregamento constante; no caso de concreto restringido submetido à retração ou à contração térmica, a fluência é o mecanismo de relaxação de tensão; ii) a fluência por secagem é a deformação adicional medida em ensaios que envolvem secagem e corpos de prova sob carregamento.

A *expansão* pode ser observada nas primeiras idades como água redistribuída devido ao fenômeno da exsudação e demanda por água armazenada em poros de agregado. Se a hidratação nas primeiras idades exige uma demanda por água enquanto a água de exsudação está ainda em abundância na superfície, esta água será reabsorvida para o interior do concreto, ocorrendo a expansão. Expansão autógena também pode ocorrer como resultado da formação de produtos de hidratação, como a etringita, conclui o autor.

Pelo exposto acima, percebe-se que verdadeiramente falta consenso sobre a terminologia adotada e não há muita clareza em algumas das explicações para os fenômenos que envolvem a retração autógena, como por exemplo a de Bentur (2002), quando trata da ocorrência de retração química e retração autógena quando o material se comporta como fluido. Ora, neste estado, não há o que se falar em retração, pois as deformações são apenas oriundas de acomodações do material na forma.

Finalmente e em razão desta ausência de concordância sobre a terminologia, Fonseca Silva (2007), em sua tese de doutorado, propôs uma classificação para as variações volumétricas em sistemas de materiais cimentícios: i) baseada em conceito de termodinâmica, no qual o universo é dividido em duas partes – o sistema (aberto, fechado e isolado) e a sua vizinhança, separados por uma fronteira; ii) considerando escala de tamanho e iii) considerando escala de tempo. As características da fronteira irão determinar o tipo de sistema. O sistema é considerado *aberto* quando matéria e energia são trocados (pela fronteira) entre sistema e vizinhança. Quando energia é trocada mas existe conservação de massa, o sistema é dito *fechado*. Quando nem massa nem energia são trocados entre sistema e vizinhança o sistema é dito *isolado*.

Segundo a autora, considerando os conceitos da termodinâmica, em sistemas isolados podem ocorrer apenas deformações autógenas. Já em sistemas abertos e fechados, além das deformações autógenas, podem ocorrer também deformações não autógenas (Figura 12).

As *deformações autógenas* (Figura 13) estão divididas em três categorias:

- (1) *volumétricas químicas*, devido ao balanço volumétrico das reações de hidratação,
- (2) *térmicas*, devido à liberação de calor proveniente da reação de hidratação e
- (3) *de degradação*, devido a agentes internos (reação álcali-sílica, CaO e MgO livres, formação de etringita retardada).

As deformações químicas devido à reação de hidratação têm sua classificação dependente do estado do material: suspensão ou sólido. Enquanto suspensão pode ocorrer a *Contração Le Chatelier* e, quando sólido, a *retração autógena* (gerada pelo mecanismo da autodessecação) e a *expansão inicial* (Figura 13).

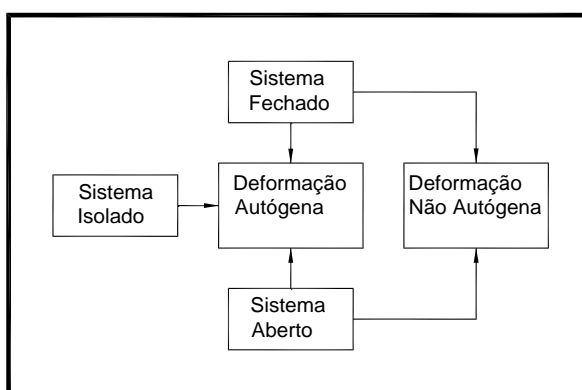


Figura 12 - Resumo esquemático da possibilidade de ocorrência das deformações autógenas e não autógena no tipos de sistemas proposto por FONSECA SILVA (2007).

As *deformações não autógenas* podem ser de três tipos (Figura 13), em função da variação

- (1) de massa;
- (2) de calor;
- (3) de trabalho .

No caso de sistemas abertos, podem ocorrer as três categorias de deformações não autógenas. Em sistemas fechados podem ocorrer variações volumétricas devido à variação de calor e de trabalho. Não podem ocorrer as deformações devido à variação de massa, pois, por definição, há conservação de massa.

As deformações não autógenas devido à variação de massa podem ser do tipo contração e retração por secagem, se o material tem comportamento de suspensão ou de sólido, respectivamente, ou pode ser de degradação devido a agentes externos (expansão com aporte externo de íons, no estado sólido). A contração e a retração por secagem são geradas por evaporação ou sucção de água. A reação expansiva de degradação pode ser devido à formação de etringita secundária, se houver ataque externo de íons SO_4^{2-} , retração por carbonatação, se houver ataque por CO_2 e formação de Mg-S-H, se houver ataque de íons Mg^{2+} .

As deformações não autógenas devido à variação de calor são chamadas de deformações térmicas e podem ocorrer durante todo o intervalo de hidratação, geradas com aporte externo de calor.

As deformações não autógenas devido à variação de trabalho podem ser viscoplásticas, no estado de suspensão e, quando sólido, deformações elásticas, plásticas e por fluência.

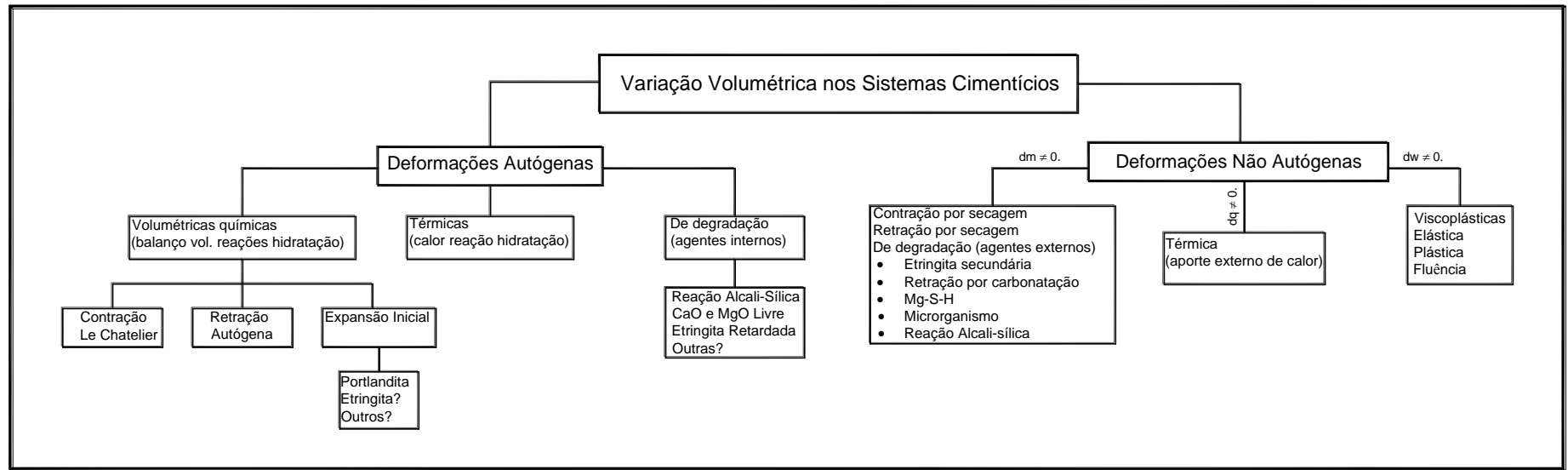
A classificação e nomenclatura utilizada neste trabalho é a proposta por FONSECA SILVA (2007). Dessa forma, os conceitos para os fenômenos autógenos, objeto do presente estudo, são apresentados e discutidos a seguir:

Deformações autógenas volumétricas químicas resultado do balanço das reações de hidratação: traduzem-se, “na maior parte do tempo, por uma diminuição do volume molar, porque o volume molar dos hidratos formados (V2) é inferior à soma dos valores molares iniciais do cimento anidro mais o da água (V1)”.

- **Contração *Le Chatelier*:** fenômeno de redução de volume que ocorre quando o concreto ainda está fluido. Na literatura em geral, este fenômeno é conhecido como retração plástica, todavia não deve ser referenciado por retração porque o líquido não retrai, uma vez que não há poro; a água está dando continuidade, e o que ocorre de fato é uma diminuição de volume do fluido, que puxa o líquido para se adaptar à forma do molde; assim, aqui, para esta deformação utiliza-se o termo contração para diferenciar de retração – termo empregado quando o material apresenta um esqueleto sólido o

suficiente para se opor às variações de volume, podendo levá-lo à fissuração. Neville (1997) também nomeia como *contração* à redução de volume do material cimento-água durante o estado plástico, apenas ressaltando que é conhecida como retração plástica. A contração Le Chatelier é um fenômeno anisotrópico, pois ocorre somente na direção vertical, provocado pela ação da gravidade.

- **Autodessecação e retração autógena:** posteriormente à contração Le Chatelier, ocorre o fenômeno denominado *autodessecação*, que fisicamente se traduz pela redução da umidade relativa interna (UR) do material e, mecanicamente, por uma retração global do material. Como pode ser visto nas terminologias adotadas pelos vários pesquisadores anteriormente apresentadas, esta retração ora é tratada como retração autógena ora como retração por autodessecação. Neste trabalho o termo *retração autógena* significa a *retração causada pela autodessecação*. A retração autógena é a redução macroscópica de volume, observada nos sistemas cimentícios após atingido o patamar de percolação (transição suspensão-sólido), ocasionada pelo mecanismo da autodessecação, gerando tensões capilares nos poros, fenômeno físico-químico preponderante para seu aparecimento, que pode ser comprovado com a medição da umidade relativa interna (UR). As Figuras 14 a 19 mostram a evolução da microestrutura, em função do tempo, de uma argamassa com baixa relação a/c, durante a hidratação (de acordo com VERNET *et al.*, 1992 *apud* BAROGHEL-BOUNY, 1994). O tempo correspondente a cada microestrutura está representado na Figura 19, indicando as diferentes etapas da curva calorimétrica.



Nota: dm = variação de massa; dq: variação de calor; dw: variação de trabalho

Figura 13 - Organograma com a classificação proposta por FONSECA SILVA para as deformações autógenas e não autógenas

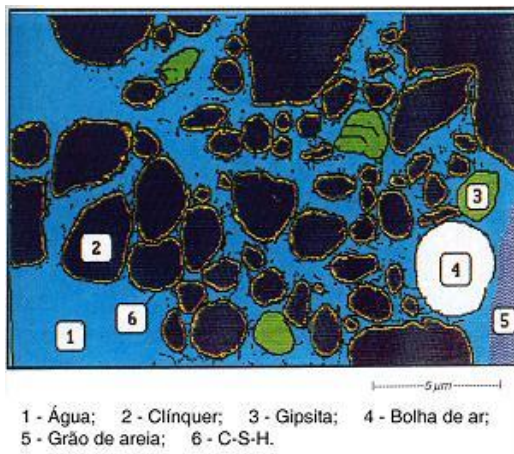


Figura 14 - $t = 1$ hora. Os grãos de clínquer começam a se hidratar formando o C-S-H. Os íons sulfato, provenientes da dissolução da gipsita, se difundem pela água de amassamento (VERNET et al., 1992 *apud* BAROGHELBOUNY, 1994).

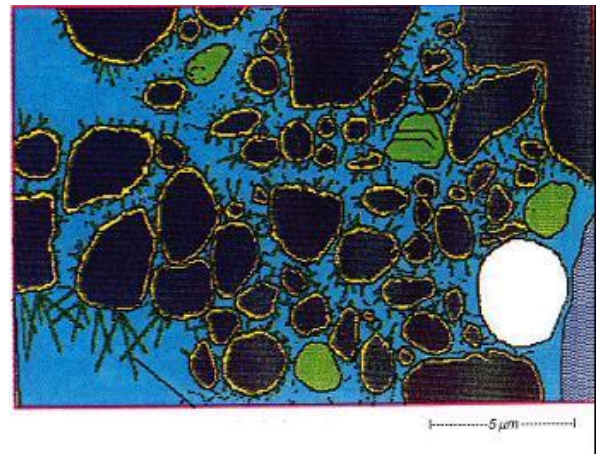


Figura 15 - $t = 2$ horas. Uma quantidade não desprezível de etringita é formada na periferia dos grãos de clínquer (segundo VERNET et al., 1992 *apud* BAROGHELBOUNY, 1994).

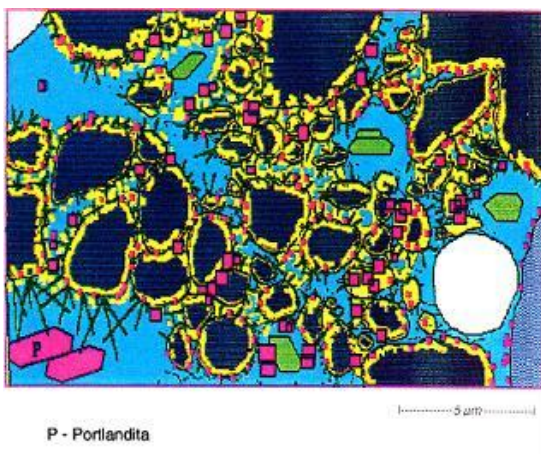


Figura 16 - $t = 5$ horas. As camadas de C-S-H na superfície dos grãos de clínquer, assim como os cristais de Portlandita e de etringita começam a se interpenetrar. O material se enrijece: é o início da pega (VERNET et al., 1992 *apud* BAROGHELBOUNY, 1994).

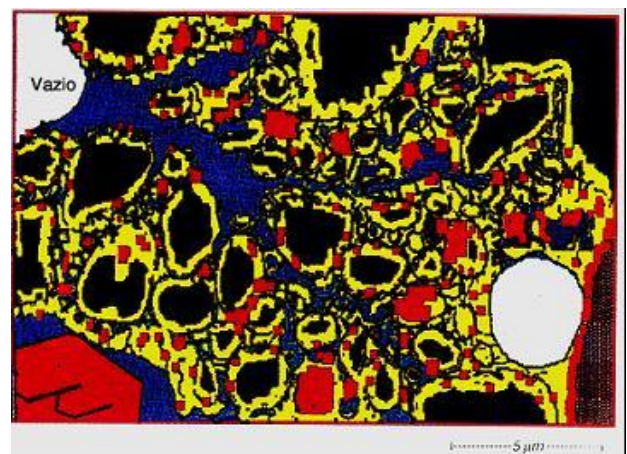


Figura 17 - $t = 9$ horas. Após o consumo da gipsita, ocorre a dissolução da etringita (VERNET et al., 1992 *apud* BAROGHELBOUNY, 1994).

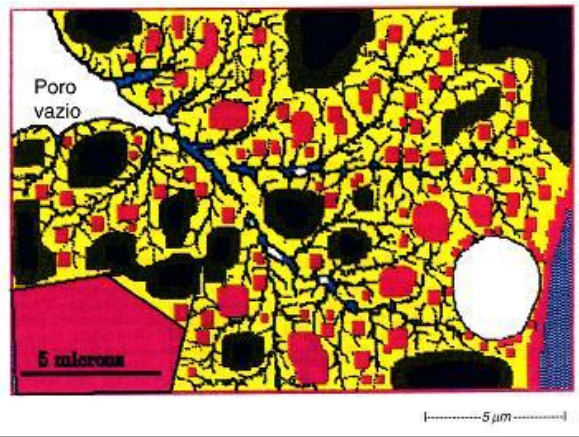


Figura 18 - $t = 28$ dias. A hidratação conduz à autodessecação. Os poros capilares se esvaziam pouco a pouco (VERNET et al., 1992 *apud* BAROGHEL-BOUNY, 1994).

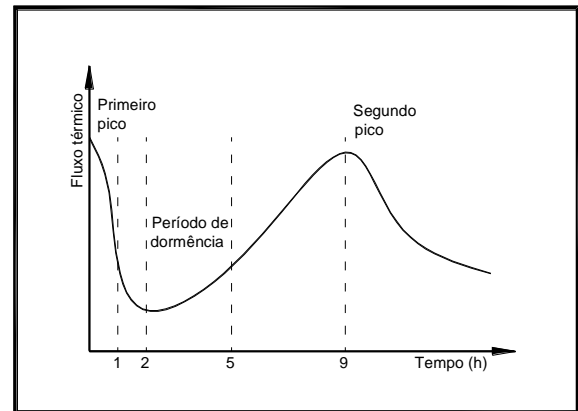


Figura 19 - Curva calorimétrica de hidratação de um material cimentício, (VERNET et al., 1992 *apud* BAROGHEL-BOUNY, 1994

Na Figura 14 vê-se a formação inicial do C-S-H ao redor dos grãos de clínquer e na Figura 15 nota-se uma quantidade grande de cristais de etringita sendo formada na periferia dos grãos de clínquer, impedindo a pega imediata. Com o avanço da hidratação, as *amas* ou núcleos (subconjuntos contínuos de grãos ligados mecanicamente, formados pelos hidratos e por grãos de cimento anidro e grãos não totalmente hidratados) se interligam, formando o primeiro caminho sólido, iniciando o endurecimento do material (Figura 16). É a transição suspensão-sólido do material ou patamar de percolação. Durante o endurecimento, observa-se o crescimento do esqueleto mineral, ocorrendo uma substituição progressiva da porosidade da pasta pelos hidratos e a diminuição da umidade interna nos espaços dos poros, ocorrendo aumento no tamanho dos vazios (devido ao fato do volume dos reagentes ser maior que o dos hidratos e pela saída de água dos poros para a hidratação), fenômeno conhecido por autodessecação (Figura 18).

- **Expansão autógena inicial:** a expansão que aparece somente nas primeiras idades, imediatamente após a pega, para materiais cimentícios com média ou alta relação a/c, pode ser atribuída, segundo Baroghel-Bouny et al. (2004) e Bentz e Stutzman (1994), à formação e ao crescimento de grandes cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (e também agulhas de etringita), enquanto se processam as reações de hidratação do cimento. Durante este período, a expansão é proeminente, apesar de todas as reações químicas levarem à diminuição no volume do sólido e contribuir com a retração química. Outros

mecanismos, menos aceitos, são sugeridos para explicar esta expansão como: i) a redistribuição da água de exsudação, de acordo com Lange (2002), apresentado anteriormente, ou reabsorção da água de exsudação, conforme Bjøntegaard (1999) *apud* Lura (2003), e ii) formação do C-S-H interno, cujo volume é maior que o das porções de grãos anidros que eles substituem, e que requerem água de fora da borda dos grãos de cimento para sua formação, desenvolvendo-se com um aumento de volume de sólido (ao contrário do C-S-H externo), de acordo com os estudos realizados por Van Breugel (1991) e Barcelo et al. (2001) citados por Baroghel-Bouny (2002).

- **Deformação térmica autógena**: variação de volume macroscópica, induzida pelo gradiente de temperatura gerado no sistema cimentício, em razão da natureza exotérmica da reação de hidratação e seu posterior resfriamento, comportamento que acontece nas primeiras idades. Conforme Bentur (2002), as variações dimensionais neste estágio não podem ser calculadas multiplicando-se a variação de temperatura pelo coeficiente de expansão térmica, uma vez que este último não apresenta valor constante nas primeiras idades. Entretanto, há poucos dados na literatura técnica relativos à evolução do coeficiente expansão térmica durante o endurecimento.
- **Deformação volumétrica química devido a reações tardias**: embora não sejam exploradas neste estudo, vale citar que expansões químicas tardias podem ocorrer em idades mais avançadas, provocadas por mecanismos como: i) expansão álcali-agregado, na presença de água e ii) expansão devida ao óxido de cálcio (CaO) e ao óxido de magnésio (MgO) livres e cristalizados, que se hidratam sem dissolução prévia, passando a um estado pulverulento, com acentuada expansão, (iii) formação de etringita retardada e (iv) crescimento de microorganismos.

Para o entendimento da classificação que propõe considerar escala de tamanho e escala de tempo recomenda-se consultar Fonseca Silva (2007).

3.3 MECANISMOS DA RETRAÇÃO AUTÓGENA

As alterações volumétricas autógenas e a fissuração nos materiais cimentícios podem ser explicadas pelos mecanismos químicos e físicos, que por sua vez são determinantes para o comportamento macroscópico das estruturas de concreto.

De uma forma geral, a retração autógena é análoga à retração por secagem (AÏTCIN, 1999b; HUA *et al*, 1995), pois em ambos os fenômenos ocorrem a diminuição da umidade relativa interna do material. A diferença está na causa. O mecanismo básico da *retração por secagem* é a evaporação da água da rede de capilares do concreto que estão expostos ao ar com umidade relativa menor que aquela dentro dos poros capilares. Como a água livre contida nos poros capilares está presa por forças que são inversamente proporcionais ao diâmetro dos poros, a perda de água é progressiva e ocorre a uma velocidade decrescente (AÏTCIN, 1999b). A retração por secagem ocorre inicialmente na superfície do concreto e progride em direção ao núcleo do elemento. A magnitude da perda de água é influenciada pela porosidade do concreto e pelas características da rede poros capilares, como as dimensões, a forma e a continuidade dos poros, complementa o autor. Já na *retração autógena*, há a diminuição da umidade relativa, pois ocorre a *autodessecação* na pasta de cimento, devido ao consumo da água evaporável nas reações de hidratação durante o processo de hidratação.

Simplificadamente, Aïtcin (1999b) explica que o fenômeno físico que se desenvolve dentro do concreto, tanto para a retração por secagem, quanto para a retração autógena é o mesmo: o surgimento de menisco dentro dos capilares, resultando em tensões de tração. Entretanto, há diferenças significativas entre a retração autógena e a retração por secagem, conforme o autor:

- a retração autógena se desenvolve sem qualquer perda de massa, diferentemente da retração por secagem;
- a retração autógena se desenvolve de forma isotrópica dentro do concreto enquanto a retração por secagem se processa da superfície para o núcleo do elemento;
- a retração autógena não desenvolve qualquer gradiente de umidade.

Hua *et al* (1995) apresentam os três principais mecanismos que podem explicar a retração por secagem conforme Baron (1982): i) *variação da depressão capilar*, ii) *variação de tensão de*

superfície de partículas coloidais e iii) *variação da pressão de disjunção*. Todavia, os mecanismos precisos que levam ao fenômeno da retração autógena não são muito bem entendidos, havendo apenas uma concordância sobre a relação entre retração autógena e alteração na umidade relativa interna nos poros da pasta de cimento endurecida. Estes três mecanismos são os mais discutidos na literatura para o entendimento da retração autógena.

3.3.1 Variação da depressão capilar

A *variação da depressão capilar* ou *tensão capilar* está relacionada à formação do menisco água-ar nos poros parcialmente vazios, e é explicado pelas leis de Laplace (Equação 3) e de Kelvin (Equação 4), que descrevem o equilíbrio higrométrico entre o líquido e o vapor d'água e o equilíbrio mecânico de um menisco submetido a pressões diferentes. Considerando um tubo bem estreito em relação ao comprimento, o menisco é uma porção de uma esfera. A pressão sob a interface (ponto A da Figura 20) é dada pela lei de Laplace. Supondo um poro cilíndrico de raio médio r , a curvatura total da interface esférica é igual a $2/r$. A queda de pressão hidrostática entre B e A equilibra a depressão de Laplace em A (GENNES *et al.*, 2002).

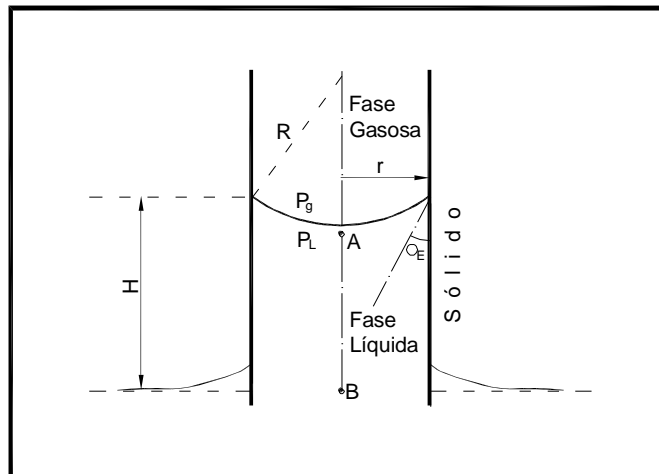


Figura 20 - Ilustração da equação de Kelvin-Laplace para o caso de um menisco esférico dentro de um capilar cilíndrico, não saturado (GENNES *et al.*, 2002)

$$p_v - p_c = \frac{2\sigma}{r} \cos \theta \quad (\text{Laplace}) \quad \text{Equação 3}$$

$$p_c - p_v = \frac{RT}{M_v} \ln(h) \quad (\text{Kelvin}) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

σ : tensão de superfície da interface água/água

θ : ângulo de umedecimento

p_c : pressão na água

p_v : pressão no vapor de água, tomado frequentemente como zero

r : raio do poro onde há um menisco

v : volume específico da água

M : massa molar da água

R : constante de gás ideal

T : temperatura

h : umidade relativa

As leis de Kelvin e Laplace podem ser combinadas, originando uma relação entre o raio do poro onde está o menisco e a umidade relativa (Equação 5):

$$P_v - P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} = -\frac{RT}{Mv} \ln(h) \quad \text{Equação 5}$$

Desta combinação das leis pode-se observar:

- quanto mais estreitos forem os poros em processo de esvaziamento, maior a intensidade da depressão capilar, uma vez que $P_v - P_c$ e r são grandezas inversamente proporcionais;
- quanto menor a umidade relativa, menor a dimensão do poro não saturado (onde pode existir menisco).

De acordo com as leis acima, para um dado estado não saturado, à medida que a hidratação se processa, há um raio de acesso r_0 tal, que todos os capilares com raio de acesso menor que r_0 são preenchidos com água e todos os capilares com raio de acesso maior estão vazios; como um raio de acesso r_0 introduz uma correspondente tensão (ou depressão) na fase líquida, então o esqueleto sólido sofre uma compressão, ocorrendo assim a retração.

O mecanismo de depressão capilar ocorre pelo fato de que, num capilar não saturado completamente, a fase líquida é tracionada devido à criação de um menisco na interface líquido-gás, que induz uma pressão negativa sobre as paredes dos capilares, tendendo a aproximá-las. A retração macroscópica observável é proveniente da compressão que o sólido é submetido (FONSECA SILVA, 2007).

Discute-se, entretanto, a validade destas leis e a realidade da tensão de superfície em escala macroscópica. Na ciência coloidal, de acordo com Fisher (1982) e Craussous (1993), citados por Hua *et al.* (1995), estima-se que os efeitos de menisco podem ser avaliados com precisão pelas Leis de Kelvin e Laplace para um menisco de raio maior que 50 angstroms. Isto significa que as leis macroscópicas são válidas para umidades relativas superiores a 80%, e exatamente neste intervalo de umidade relativa (100% - 80%) é que se processa a hidratação sob condições seladas, e conseqüentemente ocorre a *autodessecação*. Outros pesquisadores sugerem que a tensão capilar é de maior importância para umidades relativas superiores a 40% (ISHAI, 1968 *apud* KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006), ou no intervalo de 50 -100% (POWERS, 1968 *apud* KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006) e ainda de 35 – 100% (FELDMAN e SEREDA, 1970 *apud* KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006). Para Baroghel-Bouny (1994), o mecanismo da depressão capilar é válido pelo menos em fortes umidades relativas (supõe-se aqui $UR > 80\%$), quando os poros capilares estão cheios de líquido.

Hua *et al.* (1995) empregaram este mecanismo para calcular a retração autógena de pasta de cimento. Experimentalmente, os autores usaram a porosimetria por intrusão a mercúrio para indiretamente determinar as tensões de capilaridade da água do poro. Apesar de algumas críticas relacionadas com esta técnica, como exemplo, a secagem da pasta antes das medidas de porosimetria pode modificar a estrutura de poros, especialmente nas primeiras idades, devem ser destacadas as conclusões do trabalho. Modelando a retração autógena numa escala macroscópica, ficou demonstrado que *o efeito de capilaridade* causa a tração (depressão) na fase líquida e então induz à retração (compressão) do esqueleto sólido. Assim, os autores

concluíram que *a tensão capilar é o mecanismo preponderante no fenômeno da retração autógena*. Em outro estudo, Hua *et al* (1997) modelaram a retração autógena considerando a escala de grãos se hidratando (os hidratos são viscoelásticos isotrópicos e homogêneos e no conjunto de materiais, somente um percentual de heterogeneidades – hidratos, cimento anidro residual e água capilar – varia durante o processo de hidratação) e concluíram mais uma vez que o mecanismo da depressão capilar é bastante razoável para estimar a retração autógena.

3.3.2 Variação de tensão de superfície de partículas coloidais

A tensão superficial é uma propriedade dos líquidos explicada pelas forças de atração que as moléculas internas do líquido exercem junto às da superfície. As moléculas situadas no interior de um líquido são atraídas em todas as direções pelas moléculas vizinhas e, por isso, a resultante das forças que atuam sobre cada molécula é praticamente nula. As moléculas da superfície do líquido, entretanto, sofrem apenas atração lateral e inferior. Esta força para o lado e para baixo cria a tensão na superfície, que a faz contrair e comportar-se como uma película elástica.

Segundo Powers (1968), a tensão de superfície resulta da assimetria de forças de atração em átomos ou moléculas na vizinhança da superfície. Nesta região, é produzida uma pequena variação na distância atômica ou molecular que induz a uma tensão tangente à superfície. Para um dado material, esta tensão de superfície depende da vizinhança; é maior quando a superfície está situada em um vácuo e nula quando a superfície está em contato com o mesmo material. Geralmente, a adsorção de átomos ou moléculas na superfície sólida provoca uma diminuição da tensão de superfície e a dessorção causa um aumento na tensão de superfície, provocando uma compressão no sólido.

Quando se trata de materiais cimentícios, com sua elevada área específica resultante da formação dos produtos hidratados, tem-se a formação de inúmeras interfaces sólido-líquido nos meniscos formados, conforme Figura 21. Então, com a diminuição da umidade relativa há um aumento da tensão superficial na interface sólido-líquido em cada menisco, tendo por consequência uma retração macroscópica do material.

De acordo com esse mecanismo, a retração e expansão da pasta de cimento são resultados de mudanças na tensão de superfície das partículas coloidais; se houver adsorção de água, há uma diminuição na tensão superficial das partículas de gel de cimento, ocasionando uma

expansão; ao contrário, se a água adsorvida for removida, há um aumento na tensão de superfície, ocorrendo então a retração (LURA, 2003), devido à mudança na umidade relativa interna (HUA *et al.*, 1995). Kovler e Zhutovsky (2006) citando Wittman (1968) e Soroka (1979) mencionam que em partículas coloidais, como as do gel de cimento com grande área específica, as tensões de superfície induzem a tensões de compressão da ordem de 250 MPa, sendo as variações volumétricas consideráveis.

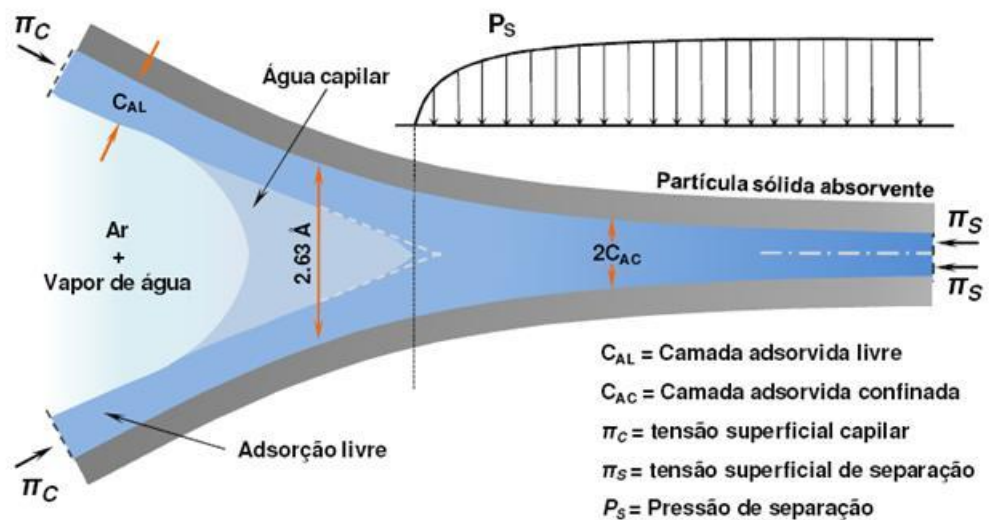


Figura 21 - Representação esquemática da adsorção da água em um capilar de pasta de cimento (BAZANT, 1972 adaptado por MELO NETO, 2008).

Entretanto, merece ser destacado que este mecanismo é válido somente em baixas umidades relativas ($UR < 40\%$), quando as variações no teor da água da pasta são devidas notadamente às variações na quantidade de água adsorvida (KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006). Em altas umidades relativas, toda a superfície sólida é coberta por moléculas de água adsorvida e a variação de umidade relativa não mais varia a tensão de superfície (HUA *et al.*, 1995), então a água começa a preencher poros capilares na pasta, que está fora do alcance das forças de superfície e o mecanismo de pressão de disjunção pode provocar a expansão adicional no sistema coloidal (KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006). Adicionalmente, a mudança na tensão de superfície de sólidos devida à adsorção de moléculas de água tem significado somente para as primeiras três camadas; as camadas exteriores estão ligada por forças fracas e sua influência sobre a tensão de superfície do adsorvente é quase desprezível (JENSEN, 1995). Portanto, a importância da tensão de superfície é maior para umidades relativas menores, não superiores a 40 %, conforme Kovler e Zhutovsky (2006). Assim, tal mecanismo não pode

desempenhar um expressivo papel na retração autógena, onde normalmente a umidade relativa não fica abaixo de 75% (JENSEN, 1995).

3.3.3 Variação da pressão de disjunção

Este mecanismo está relacionado à interação entre duas superfícies sólidas, muito próximas, na presença de moléculas de água adsorvida (Figura 22). Conforme descrito por Hua *et al.* (1995), para uma dada temperatura, a espessura da camada de água adsorvida depende da umidade relativa: a camada de água adsorvida não pode se desenvolver livremente acima de certa umidade relativa porque a distância entre duas camadas é muito pequena. Mas, se há um aumento da umidade relativa, a adsorção da água tende a separar a superfície dos dois sólidos de modo a aumentar a espessura da camada adsorvida. A superfície dos dois sólidos, portanto, submetem-se à chamada *pressão de disjunção*. Esta pressão alcança valores máximos no estado saturado, entretanto, quando o sistema vai de um estado saturado a um não saturado, ocorre a retração, pois a pressão de disjunção diminui e as duas superfícies se aproximam (Figura 22).

Lura (2003) citando Soroka (1979) descreve o mecanismo, mencionando que a pressão de disjunção está ativa em áreas de difícil adsorção, onde a distância entre as superfícies sólidas é menor que duas vezes a espessura da camada de água livre adsorvida.

Medidas de pressão de disjunção feitas por Ferraris (1986) *apud* Hua et al. (1995) mostraram que a pressão de disjunção é praticamente constante quando a umidade relativa varia de 80% a 100%. De fato, quando a umidade relativa permanece elevada, sua variação não causa muita mudança entre moléculas de água adsorvida e não adsorvida, de modo que a pressão de disjunção não varia em altas umidades relativas.

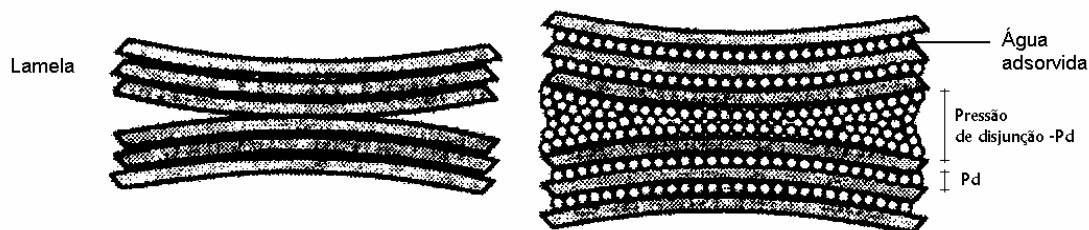


Figura 22 - Pressão de disjunção: (a) material seco e (b) material com água adsorvida, segundo VISSER (1998) *apud* KOVLER e ZHUTOVSKY (2006).

De acordo com Baroghel-Bouny (1994), na presença de duas superfícies hidrófilas de mesma natureza, como é o caso do C-S-H, separadas por uma camada delgada de água, podem atuar três tipos de força : as de van der Waals (atrativas), as eletrostáticas (repulsivas) e as interações estéricas (repulsivas). A pressão de disjunção é a soma delas. Para Gennes et al. (2002) a pressão de disjunção é a pressão que deve ser aplicada sobre duas superfícies hidrófilas para manter uma espessura entre elas. Ou, no caso contrário, é a depressão que precisa se impor à superfície para impedir um espaçamento nulo.

3.3.4 Autodessecação

A pasta de cimento fluida não é capaz de sustentar os vazios internos criados pela retração química e contrai. Quando é atingido o patamar de percolação, ou seja, quando os primeiros caminhos de sólido são formados na pasta, a rigidez aumenta e bolhas de ar começam a se nuclear e crescer em poros maiores. O menisco água-ar se forma e a umidade relativa cai; a presença do menisco também causa tensões de tração hidrostáticas no fluido do poro (Figura 23). A queda na umidade relativa resulta em uma mudança na espessura de camada de água adsorvida na superfície do sólido, segundo Hagymassy et al.(1969) *apud* Lura (2003). Ainda conforme Lura (2003) este comportamento é acompanhado de mudanças tanto na *tensão de superfície* quanto na *pressão de disjunção* de água adsorvida entre as superfícies sólidas.

Baseados nos três mecanismos anteriormente apresentados e no fenômeno relativo à estruturação progressiva da pasta de cimento durante a hidratação, Hua *et al.* (1995) observam que: i) a influência da variação da depressão capilar é maior em pastas de cimento jovens, porque a depressão capilar pode variar de 0 a 30 MPa com umidade relativa variando entre 80 – 100% e ii) o efeito da variação de tensão superficial de partículas coloidais de hidratos e o efeito da variação de pressão de disjunção são desprezíveis em retração autógena. Os pesquisadores destacam que *a variação da depressão capilar* é a principal origem da retração por autodessecação quando comparada aos dois fenômenos físico-químicos apresentados anteriormente.

Mas o fato é que na literatura não há concordância sobre o mecanismo responsável pela *autodessecação*. A partir de estudos feitos em concreto de alto desempenho mostrando a correlação entre deformações longitudinais autógenas livres e UR interna, Baroghel-Bouny

(1994) concluiu que com umidades relativas maiores que 76%, cujo tamanho de poro corresponde a $r_p \approx 50 \text{ \AA}$, infere-se que a autodessecação é originada essencialmente de água capilar, o que leva à predominância do mecanismo de variação da depressão capilar. Com umidades relativas menores que 76% e poros menores que $r_p \approx 50 \text{ \AA}$, a redução de umidade relativa pode ser explicada pela diminuição da camada de água adsorvida. Isto significa, segundo a autora, que é o começo da porosidade do gel C-S-H. Assim, se a umidade relativa baixar desse limite, é a água dos hidratos que está sendo retirada. Desta forma, pode-se concluir que com água capilar reduzida, a variação de depressão capilar não é o mecanismo que essencialmente dá origem às deformações medidas. Nessas condições, um outro mecanismo de retração por secagem deve ser o preponderante. É ainda mencionado pela autora que abaixo de cerca de 80% de umidade relativa interna, a autodessecação do material pode dar continuidade, pois quando a água nos poros capilares está ausente, os grãos de cimento anidro, sendo mais hidrófilos que os hidratos, utilizam a água adsorvida desses últimos para se hidratar, sendo a cinética da reação bem mais lenta.

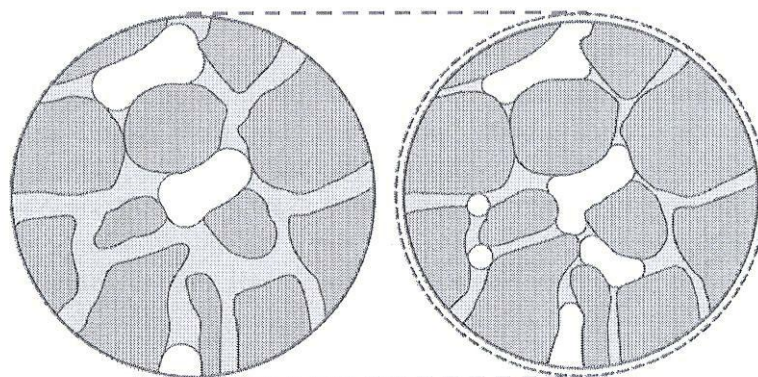


Figura 23 - Representação esquemática de uma seção de uma pasta de cimento em hidratação.

Esquerda: baixo grau de hidratação. Direita: alto grau de hidratação.

Matéria sólida (produtos de hidratação, cimento anidro, sílica ativa, etc) é mostrado em cinza escuro, água nos poros está em cinza claro e poros vazios em branco. A figura ilustra a seqüência do processo de hidratação: a) redução da quantidade de água do poro devido à ligação com os produtos de hidratação, b) aumento da quantidade de material sólido, c) refinamento da estrutura de poros, d) formação de volume de poros vazios devido à retração química, e) diminuição do raio de curvatura do menisco, e f) retração do sólido devido ao aumento das tensões de tração na água do poro, provocada pela **autodessecação** (JENSEN e HANSEN, 2001a).

Por fim, vale citar Kovler e Zhutovsky (2006) ao afirmarem que a maioria dos pesquisadores atribuem mudanças de volume em umidades relativas acima de 40% para tensões capilares. Com umidades relativas abaixo de 35%, o movimento de água intercamadas é considerado,

por uma grande parte de estudiosos, o mecanismo responsável pela alteração de volume. Outros pesquisadores assumem que variações na energia de superfície é a causa de retração ou expansão com umidades relativas abaixo de 40%, e alguns, ao contrário, acreditam que este mecanismo é ativado em umidades relativas acima de 40%. A variação de pressão de disjunção é também objeto de controvérsia. Alguns pesquisadores supõem que tal mecanismo é responsável pela alteração de volumes com altas umidades relativas, outros o consideram em baixas umidades relativas e muitos o rejeitam completamente.

3.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A RETRAÇÃO AUTÓGENA

De acordo com os dados apresentados na literatura (TAZAWA e MIYAZAWA, 1995; PERSSON, 1998; TAZAWA, 1999; YANG, 1999), a retração autógena é influenciada por muitos fatores, por exemplo, a relação água/cimento (a/c), composição do cimento, teor de pozolana, finura do cimento e da pozolana, volume do agregado e temperatura de exposição. Contudo, não há consenso sobre a magnitude da influência desses fatores.

A relação $a/(c+sa)$ e o teor de sílica ativa tem uma influência significativa na retração autógena do concreto, como pode ser verificado na Figura 24 (BROOKS et al., 1999). Como a relação $a/(c+sa)$ é reduzida de 0,28 para 0,23, há um aumento expressivo na retração para todos os concretos. Segundo de LARRARD *apud* BROOKS et al. (1999), isto pode ser explicado pelo aumento da tensão capilar da água dos poros, com a diminuição da relação $a/(c+sa)$. Como essa explicação não é inteiramente satisfatória, os autores propõem que a principal causa da retração autógena é a grande diferença de concentração iônica entre a água dos poros e água adsorvida na frente de hidratação. A água se move pelo efeito de sucção devido a essa diferença de concentração e produz um aumento na tensão capilar, que então provoca a retração autógena.

KOJIMA *et al.* (2001), ao estudarem a influência da relação a/c e da sílica ativa na retração autógena de concretos até a idade de dois anos, verificaram maiores deformações nas idades iniciais para o concretos com menor relação $a/(c+sa)$. As deformações foram em torno de 740 $\mu\epsilon$ para a idade de 3 meses e em torno de 800 $\mu\epsilon$ na idade de 1 ano, quando a relação $a/(c+sa)$ era de 0,20 e 7,5% de teor de sílica ativa. Para uma mesma relação $a/(c+sa)$, as deformações aumentaram com o incremento do teor de sílica ativa.

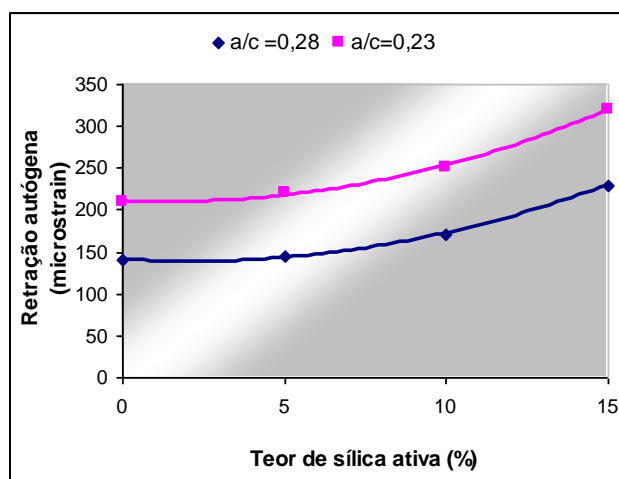


Figura 24 - Correlação entre retração autóloga do concreto e o teor de sílica ativa aos 40 dias de idade (BROOKS et al., 1999).

Além dos autores já citados, outros estudiosos (PERSSON, 1998; MAK *et al.* 1999) apontam para o aumento da retração autóloga com a diminuição da relação a/c e para concretos com adição de sílica ativa. Da mesma forma, MATSUSHITA *et al.* (1998) observaram que o aumento no teor de adição de escória granulada de alto forno leva ao aumento nas deformações devidas à retração autóloga.

Quanto ao *tipo de cimento*, TAZAWA e MIYAZAWA (1999) observaram que a retração autóloga é fortemente dependente deste fator. Cimento Portland de médio calor de hidratação e cimento rico em C_2S resultam em menor retração autóloga que cimentos Portland comuns.

Como já se sabe que para o entendimento da retração é necessário entender como as reações de hidratação se desenvolvem, é importante ressaltar que dentre os fenômenos simultâneos que ocorrem durante esse processo, a elevação da *temperatura* merece especial atenção. A temperatura devido ao calor de hidratação se eleva rapidamente e a resistência também se desenvolve rapidamente em concretos de alta resistência com baixa relação a/c ; após atingir o pico, a temperatura cai de forma rápida. Por isso, um concreto de alta resistência é geralmente mais empregado em estruturas esbeltas de concreto que em estruturas massivas. Então, de acordo TAZAWA (1999), durante a queda da temperatura, as tensões de tração são produzidas pelo efeito simultâneo da retração autóloga e pela retração induzida pela queda de temperatura. Daí observa-se a importância do estudo da influência da temperatura nos resultados de retração autóloga. SATO *et al.* (1997) destacam que os dados disponíveis sobre tensões devido à retração autóloga provavelmente não consideram valores independentes das

tensões resultantes das mudanças de temperatura. O efeito da temperatura nas tensões devidas à retração autógena não é muito claro e métodos precisos de análises numéricas dessas tensões ainda não foram obtidos. LURA *et al.* (2001), estudando a influência da temperatura de cura na retração nas primeiras idades do concreto de alto desempenho, observaram que o efeito de um aumento na temperatura no desenvolvimento nas deformações autógenas não foi sistemático e variou para diferentes tipos de cimento. Parece que temperaturas mais altas não necessariamente levam a maiores deformações.

3.5 MEDIDA DE UMIDADE RELATIVA INTERNA

O fenômeno da *autodessecação* ocorre pela diminuição da *umidade relativa* no interior da pasta de cimento endurecido sob condições isoladas, sem qualquer perda de massa, devido ao consumo de água pela reação de hidratação. Esta diminuição de umidade relativa é experimentalmente demonstrada por vários autores (PAILLÈRE *et al.* 1989; BENTZ *et al.*, 2001; LURA *et al.*, 2003; FONSECA SILVA, 2007; SCHÄFFEL, 2009; entre outros). Embora não haja consenso sobre vários aspectos relativos ao tema objeto de estudo neste trabalho, percebe-se uma importante concordância: a relação entre retração autógena e queda na umidade relativa interna.

Nos estudos realizados em 1927, Jesser determinou a mudança de umidade relativa autógena em argamassas de cimento com relação a/c de 0,24 a 0,36, e comprovou que a umidade relativa interna pode ser de 90% após um mês de endurecimento da pasta (JENSEN e HANSEN, 2001a).

Entretanto, as determinações de mudança de umidade relativa interna têm sido executadas de diferentes formas, e não com muita frequência. Um procedimento típico, de acordo com Jensen e Hansen (2001a), consiste em colocar a pasta de cimento em um pequeno contêiner, selado e termicamente controlado. A umidade interna da pasta de cimento se equilibrará com a umidade relativa do ar dentro do contêiner, que é medida por um sensor de umidade. Normalmente, a pasta de cimento é partida em pedaços para alcançar o equilíbrio da umidade relativa interna de forma mais rápida. Mas somente sensores eletrônicos para medidas contínuas são relevantes, concluem os autores. A desvantagem é que estes sensores devem ser periodicamente calibrados para se obter precisão de $\pm 1\%$ de umidade relativa. Este

procedimento foi utilizado por pesquisadores como Bentz et al (2001), Lura (2003) e Schäffel (2009). Já Fonseca Silva (2007) inovou empregando sensores de umidade relativa do ar embutidos no concreto. É este método o utilizado neste trabalho, descrito no item 4.9.

3.6 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA

Assim como não há concordância na literatura técnica sobre a terminologia, o mesmo se aplica às técnicas de medidas de retração autógena. Embora haja um interesse crescente no estudo deste fenômeno, com ênfase a estudos que buscam investigar os fatores que o influenciam e as estratégias mitigadoras de seus efeitos, ainda não se conseguiu padronizar internacionalmente a técnica de medida, antes de se comparar resultados. Este deveria ser um dos primeiros passos, senão o primeiro, no estudo da retração autógena. Foi demonstrado por Barcelo et al. (1999) *apud* Jensen e Hansen (2001a) o quanto é difícil interpretar resultados considerando as diferentes técnicas de medidas. Com base na literatura, verifica-se que a discrepância de resultados é causada principalmente pela ausência de definição quanto ao tempo zero para início da determinação. Há estudos com tempo zero imediatamente após a moldagem (quando se mede também contração Le Chatelier), outros no início de pega (patamar de percolação), e outros com início em 24 horas da moldagem, o que pode subestimar os resultados de retração autógena. Outro ponto relevante que gera discrepância nos resultados é o dispositivo de ensaio utilizado. Encontram-se na literatura medidas de deformação devida à retração autógena obtidas por meio de LVDTs - *linear variable differential transformers*, extensômetros elétricos embutidos, relógios comparadores, medidores de corda vibrante e sensores à laser. Tudo isto faz o processo de comparação de resultados e conclusões entre pesquisadores impraticável. Vislumbra-se que o desenvolvimento de um padrão de medida de retração autógena proporcionará a obtenção de resultados universais, confiáveis e consistentes.

Jensen e Hansen (2001a) mencionam que a determinação da retração autógena tem sido executada de duas formas, fundamentalmente diferentes: medidas de deformação volumétrica e de deformação linear, em pastas. A *determinação volumétrica* consiste em moldar *pasta* de cimento em um balão de borracha imerso em água. A mudança de volume da pasta de cimento é determinada pela quantidade de água deslocada pela amostra imersa, por exemplo, medindo a mudança de peso da amostra imersa (Princípio de Arquimedes). A medida de *deformação linear em pasta* consiste em moldá-la em um molde rígido com baixo atrito. As

mudanças de comprimento do material são registradas por transdutores instalados nas extremidades das amostras.

Uma vantagem do método volumétrico é a possibilidade de iniciar as medições imediatamente após a moldagem, conforme exposto por Jensen e Hansen (2001a). Sobre esse aspecto merece ser comentado que isso não representa uma vantagem, uma vez que com essa leitura após moldagem, determina-se contração Le Chatelier (material no estado plástico sob ação da gravidade) e não retração autógena, levando a um aumento no resultado. No que se refere ao método linear, seu ponto positivo é quanto à ancoragem firme nos pontos de medida do conjunto da pasta de cimento. Segundo os autores, um aspecto que deve ser objeto de cuidados é quanto ao risco de restrição à pasta de cimento: nas primeiras horas após a pega a pasta é muito fraca para superar o atrito contra o molde rígido, o que com a lubrificação dos moldes pode reduzir sobremaneira este problema. É importante comentar que, destes dois procedimentos em pasta, a discrepância é devida notadamente à consideração da contração Le Chatelier no método volumétrico, que majora a retração autógena, podendo levar a significativos erros, enquanto no método unidirecional, a retração autógena só é medida depois da desmoldagem e selagem dos corpos de prova, minorando os resultados.

As determinações em concreto podem ser feitas unicamente no método unidirecional. O Instituto Japonês do Concreto (TAZAWA e MIYAZAWA, 1999) propõe um método para determinação da retração autógena e da expansão autógena, em pasta de cimento, argamassa e concreto, que é utilizado por vários pesquisadores, entre eles, Fonseca Silva (2007) e Baltar (2004), com pequenas modificações. A metodologia estabelece uma amostragem de no mínimo 03 corpos de prova, para cada ensaio. Os corpos de prova são prismáticos, com largura e altura de pelo menos 3 vezes a dimensão máxima do agregado graúdo, no caso da determinação em concreto. O comprimento deve ser mais de 3,5 vezes a largura ou a altura. A forma deve ser de aço e rígida, com um orifício de 3 a 5 mm de diâmetro no centro das duas placas laterais, de menor dimensão, para encaixar os pinos metálicos (um em cada extremidade através do orifício), para leitura da distância inicial entre as extremidades dos pinos, antes da moldagem e, demais leituras, após o tempo de pega, usando extensômetros. A acurácia dos extensômetros deve ser de 0,001 mm, ou seja, milésimo de milímetro. Os corpos de prova são moldados em formas metálicas, previamente forrada com folha de politetrafluoretileno (no fundo) e de poliestireno (nas laterais), de modo a não restringir o

movimento livre. Antes da desforma, as medidas são efetuadas horizontalmente, e podem começar a partir do tempo de início de pega (determinado segundo JIS A 6204), quando o material apresenta uma rigidez suficiente para suportar a introdução dos eixos dos extensômetros, nos pinos metálicos, através dos orifícios das placas laterais extremas.

No centro dos corpos de prova deve-se efetuar medida da temperatura, a cada leitura, para o cálculo da variação de comprimento (feita nos extensômetros), até a temperatura se estabilizar com a da sala de leitura. Esse procedimento é para determinar a deformação térmica e subtrair da retração total, assumindo um coeficiente de expansão igual a $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, para o concreto, segundo o JCI - *Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete* (TAZAWA, 1999).

Após a desforma, os corpos de prova são selados para evitar troca de umidade com o meio externo, fazendo-se pesagens periódicas. A partir dessa etapa, as determinações de variação de comprimento devem ser feitas conforme JIS A 1129.

A retração autógena e expansão autógena são expressas por : $\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2$, sendo:

ΔL_1 = variação relativa de comprimento, antes da desforma, dado pela expressão:

$$\Delta L_1 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(X_{ia} - X_{0a}) + (X_{ib} - X_{0b})}{L} \right] \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

L = distância inicial entre as extremidades dos pinos, antes da moldagem

X_{0a}, X_{0b} = Leituras iniciais nos extensômetros

X_{ia}, X_{ib} = Leituras nos extensômetros no tempo i

ΔL_2 = variação relativa de comprimento, após a desmoldagem, determinada pelo JIS A 1129).

Um outro dispositivo denominado dilatômetro, desenvolvido por Jensen e Hansen (1995a), é constituído de um molde flexível, fixado rigidamente a uma das extremidades e ligado à outra extremidade por um relógio medidor de deslocamento. Os autores desenvolveram um molde especial, corrugado, capaz de transformar a deformação volumétrica, medida antes da pega, em deformação linear e medir a deformação linear, após a pega (Figura 25). Essa

transformação é possível graças à grande rigidez na direção radial em relação à direção do molde.

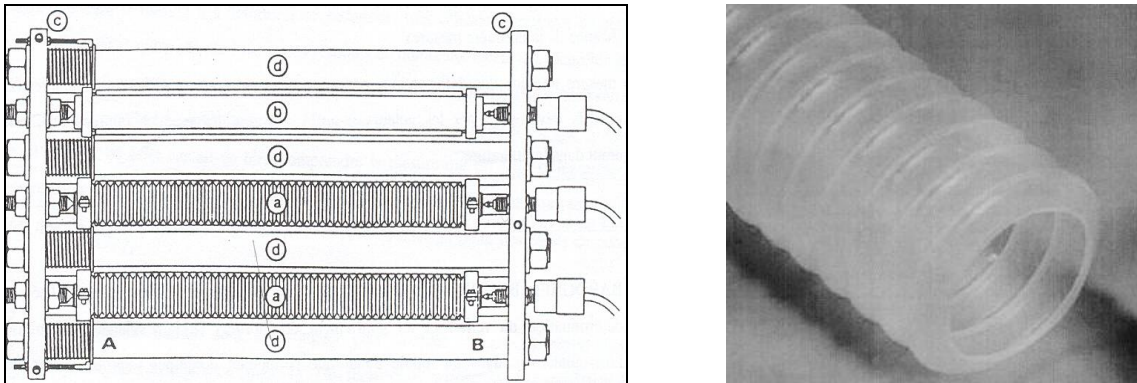


Figura 25 - À esquerda, dispositivo de medida unidirecional e horizontal, desenvolvido por JENSEN e HANSEN (1995a). À direita, detalhe do tubo corrugado.

Além desses, observa-se que em muitos estudos para determinação de deformação em materiais cimentícios são usados os extensômetros embutidos (*strain gages*), seja em pasta, argamassa ou concreto. Hanehara *et al.* (1999), estudando a relação entre retração autógena e reações de hidratação, empregou extensômetros elétricos de 6 mm de comprimento embutidos na pasta de cimento e as deformações foram obtidas continuamente. Já Aïtcin (1999c), estudando o fenômeno da expansão em concreto, num estudo sobre variações volumétricas do material e temperatura, utilizou extensômetros elétricos de 10 mm embutidos no centro dos corpos de prova. Kojima *et al.* (2001) mediram a retração autógena no concreto com transdutores de extensômetros elétricos embutidos na massa de concreto (Figura 26).

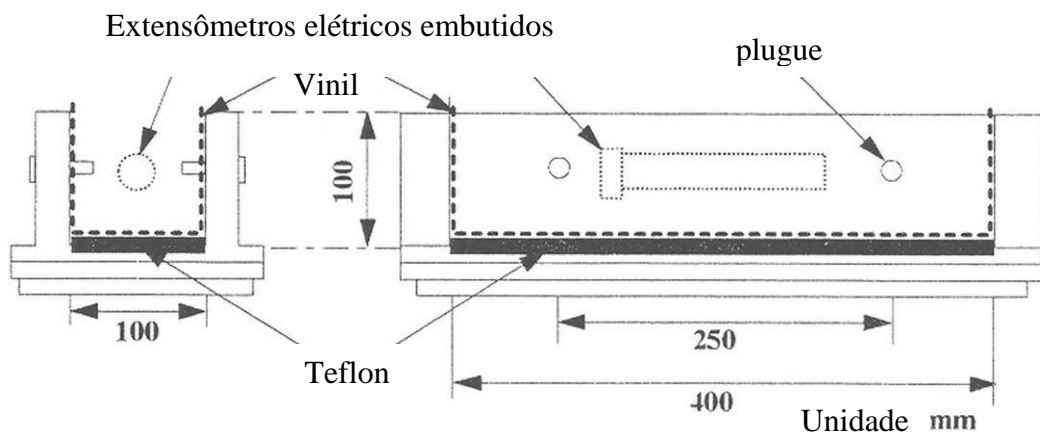


Figura 26 - Moldes e corpos de prova para os ensaios de retração realizados por KOJIMA *et al.* (2001).

Neste trabalho todas as medidas de retração foram determinadas por meio de extensômetros elétricos de resistência, tipo Carlson, semelhantemente ao realizado por Kojima et al.(2001), conforme descrito no item 4.8.

3.7 SOLUÇÕES PARA MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA

A retração autógena desenvolvida nas primeiras 24 horas em um concreto de resistência convencional é desprezível quando comparada com a retração por secagem. Já no concreto de alta resistência, a retração autógena é intensa e mais importante que a retração por secagem nas primeiras idades. Embora seja caracterizado como material de excepcionais propriedades mecânicas e de maior durabilidade, no concreto de alta resistência esta alta retração autógena, já nos primeiros dias após terem sido produzidos, faz aumentar seu potencial de fissuração em idades iniciais. Relatos dessa natureza podem ser encontrados em vários artigos da literatura técnica, como exemplo Mechtcherine, Dudziak e Hempel (2009) e Bentz e Jensen (2004). Conforme estes últimos pesquisadores, as deformações produzidas devido à retração autógena restringida podem facilmente exceder a 1000 $\mu\epsilon$, levando à fissuração, e como consequência, pode-se ter redução da resistência à compressão, redução da durabilidade, perda de protensão e problemas de ordem estética.

A fim de reduzir a retração autógena do concreto, várias abordagens têm sido estudadas nos últimos anos. Bentz e Jensen (2004) mencionam algumas estratégias de mitigação da retração autógena como:

- a adição de aditivo redutor de retração, mais comumente utilizado para a retração por secagem, que age diminuindo a tensão superficial da água e, assim, reduzindo a tensão capilar;
- controle da distribuição do tamanho das partículas do cimento;
- modificação da composição mineralógica do cimento;
- adição de agregados miúdos leves saturados ao concreto para promover a chamada “cura interna”;

- adição de fibras (poliméricas, celulósica, metálica ou de carbono), que por restringir mecanicamente o material pode evitar o surgimento das fissuras oriundas da retração autógena;
- uso de aditivo químico compensador de retração, cujos agentes expansivos atuam aumentando o volume do concreto para compensar a redução de volume causada pela retração e, por fim;
- soluções híbridas, com mais de uma estratégia combinadas.

Outra forma em que se pode reduzir a retração autógena, segundo Tazawa e Miyazawa (1997) *apud* Tazawa (1999), é utilizando cimento Portland com altos teores de C_2S e baixos teores de C_3S e C_4AF , o que reflete em moderado a baixo calor de hidratação. A retração autógena em concretos fabricados com tais cimentos é muito menor que em concretos com cimentos normais. Entretanto, mencionam os autores, é muito difícil avaliar o efeito preciso da composição do cimento na retração autógena, pois esta depende também da resistência à compressão do concreto. Adicionalmente, o aumento no teor de gesso no cimento, que causa expansão autógena, pode ser usado para neutralizar a retração autógena. Contudo, afirmam os autores, são necessários estudos para a investigação de tais cimentos.

Com o uso de aditivos expansivos, é possível também reduzir a retração total quando comparado com concreto referência, e a combinação destes com aditivos redutores de retração por secagem pode ser altamente eficiente no combate à retração autógena. Adicionalmente, é relatado que um fator de proporção da mistura do concreto de grande efeito na retração autógena é a relação a/c , uma vez que são de grandezas inversamente proporcionais. Entretanto, o aumento da relação a/c , efetivo para reduzir a retração autógena, não é prático, pois a relação a/c é determinada por exigências de resistência e durabilidade (TAZAWA, 1999).

Quanto ao uso de fibras, há algumas indicações que fibras com alto módulo de elasticidade (MIYAZAWA, 1997 *apud* KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006) e de pequeno diâmetro (KAYALI *et al.*, 1999) podem ser efetivas para reduzir a retração autógena em concreto de alto desempenho, porém, para seu uso, mais estudos são necessários, em função do provável comprometimento da fluidez, no estado fresco, e da resistência mecânica, no estado endurecido. Estudos desenvolvidos por Kovler e Bentur (1997) mostram que a adição de

fibras de aço praticamente não influencia a retração livre; isto significa que o principal efeito do reforço com fibras é reduzir a fissuração quando restrição externa é aplicada (KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006).

Os procedimentos usuais de cura utilizados para o concreto tradicional parecem não ser eficazes para o concreto de alto desempenho. De acordo com Weber e Reinhardt (1997), há aspectos conflitantes com relação à cura dos concretos de alta resistência: a cura úmida ou armazenamento por 6 dias em ambiente com névoa não melhora as propriedades dos concretos de alta resistência e tem efeito desprezível sobre a retração destes concretos. Com isso, uma solução que deve receber especial atenção, segundo Jensen e Hansen (2001b), é o combate à retração autógena pela aplicação da chamada “cura interna”. Se a autodessecação da pasta é a maior causa da retração autógena, a forma lógica de mitigar ou reduzi-la é impedindo a autodessecação. Para isto a proposta é incorporar agregados leves saturados na mistura; esses agregados atuarão como reservatórios de água que liberam água no momento que a umidade relativa do concreto cai (TAKADA *et al*, 1999, KOHNO *et al*, 1999, WEBER e REINHARDT, 1997). Contudo, é esperado que o uso de agregado leve em vez do agregado denso resulte em resistência e módulo de elasticidade mais baixos. Assim, chega-se a um problema de otimização que deve ser investigado experimentalmente.

O emprego de argila expandida, em estudos realizados por Weber e Reinhardt (1997), proporcionou ao concreto um maior grau de hidratação e valores de deformações por retração menores em relação ao referência, sem o agregado leve. Os resultados de Suzuki *et al*. (2009), em investigação para verificar a eficiência da cura interna utilizando resíduo cerâmico graúdo poroso, mostraram a alta eficácia do resíduo cerâmico para reduzir drasticamente e até eliminar completamente a retração autógena de concretos, sem, contudo, comprometer a resistência à compressão dos concretos.

Os estudos com os agregados leves como agentes de cura interna foram bastante explorados nos anos 90, com vistas a se verificar sua influência nas propriedades de concretos e observou-se que os principais inconvenientes relacionados com a adição do agregado leve de concreto foram a dificuldade em controlar a consistência de concreto e uma redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto. Atualmente, como agente de cura interna, dentro do conceito de “água incorporada”, estão os polímeros superabsorventes - *SAP*, que minimizam as dificuldades mencionadas associadas ao uso do agregado leve em concreto. Os polímeros superabsorventes são substâncias expansíveis que

podem absorver muitas vezes seu próprio peso em líquido, formando um gel, e reduzem a retração autógena baseada no mesmo princípio do uso de agregado saturado leve. Contudo, a técnica produz microestrutura altamente controlada. Além disso, é possível que os pequenos vazios esféricos deixados, quando a água sai dos macro-poros para a hidratação, possam funcionar como um sistema de vazios, protegendo o concreto da ação do gelo-degelo. Muitos pesquisadores têm investido neste tema, entre eles Jensen e Lura (2006), Jensen (2008), Paiva et al.,(2009) e Mechtcherine et al. (2009).

Pode-se perceber, portanto, que na engenharia de materiais há numerosas opções disponíveis como estratégias de mitigação da retração autógena. O imprescindível é o entendimento sobre o fenômeno físico preponderante para que se possa ou selecionar de forma adequada os materiais ou adaptar o projeto estrutural de maneira a controlar a fissuração devido à retração autógena. *Neste trabalho dedica-se a estudar o comportamento do concreto com os aditivos redutores de retração, principalmente quanto às suas propriedades mecânicas, elásticas e viscoelásticas nas primeiras idades e à durabilidade frente a agentes agressivos e ao aspecto microestrutural da pasta contendo tais aditivos.*

3.8 ADITIVO REDUTOR DE RETRAÇÃO – ARR

Os aditivos redutores de retração - ARR (em inglês, *shrinkage-reducing admixtures – SRA*), inicialmente desenvolvidos para reduzir a retração por secagem, foram investigados pela primeira vez no Japão no início dos anos 80 (SATO *et al.*, 1983 *apud* BENTZ, 2006). Há vários tipos de ARRs comercialmente disponíveis, e embora não tenham a mesma composição química, são similares em natureza e todos agem diminuindo a tensão superficial do fluido nos poros da pasta de material cimentício. Alguns aditivos podem ser aplicados na superfície do concreto, como solução tópica para minimizar o efeito da retração.

De uma forma geral, estes aditivos são orgânicos, com substâncias de superfícies ativas, que incluem éter propilenoglicol, dióis alcanos e éter polialifáticos ou éter cicloalifático; e apresentam baixa viscosidade.

Desde que se iniciaram os estudos nos anos 80 até hoje, numerosas pesquisas têm sido desenvolvidas (FOLLIARD e BERKE, 1997; BENTZ et al, 2001; GETTU e RONCERO,

2003; RONGBING e JIAN, 2005; RIBEIRO et al., 2006; BENTZ, 2006; FONSECA SILVA, 2007; RAJABIPOUR et al, 2008; MELO NETO, 2008; SCHÄFFEL, 2009; entre outras) com o fim de avaliar o desempenho dos ARR e para quantificar sua capacidade de reduzir a retração no concreto.

A explicação do *mecanismo* de ação do ARR é baseada em Bentz (2006). Simplificadamente, o ARR influencia a tensão de superfície e a viscosidade da solução no poro. Como o concreto é um material poroso com uma ampla distribuição de poros, esta mudança na tensão superficial tem efeitos que são descritos por Kelvin-Laplace (Equação 5). As tensões capilares dentro de um concreto parcialmente saturado serão geradas na solução aquosa remanescente na solução do poro, assumido como cilíndrico. Reduzindo a magnitude da tensão superficial, σ , da água do poro tem-se a redução da pressão capilar exercida pela mesma e por consequência a diminuição da retração.

A *diminuição da tensão superficial* pelo uso do ARR é demonstrada experimentalmente por Schäffel (2009): a tensão de superfície da solução dos poros da pasta de cimento endurecida sem ARR correspondeu a 70 N/m. Utilizando 03 tipos de ARR (ARR1 – 4,5% de massa de água destilada, ARR2 – 3,5% de massa de água destilada e ARR3 - 4,5% de massa de água destilada), obteve valores de tensão superficial da ordem de 40 N/m para as pastas com ARR1 e de 30 N/m para as pastas com ARR2 e ARR3. Bentz et al. (2001) chegaram à conclusão que foi possível reduzir significativamente a tensão de superfície de uma água destilada contendo ARR. Semelhantemente, Rongbing e Jian (2005), estudando um processo químico para sintetizar o AAR, demonstram que, à medida que adicionam o ARR à água, a tensão superficial vai diminuindo drasticamente. Tazawa e Miyazawa (1995) verificaram que medidas de tensão de superfície na solução aquosa do ARR revelaram que a porcentagem de diminuição na retração autógena correspondia à porcentagem da diminuição da tensão de superfície.

No que se refere à *dosagem* a ser empregada para o ARR, Collepardi *et al.* (2005) mencionam que este aditivo é usado no teor de 1 a 2% em relação à massa de cimento, com base neopentil glicol, $(CH_2)_2 - C - (CH_2OH)_2$, ou outro produto similar, que reduz a retração por secagem e a retração autógena. Folliard e Berke (1997) trabalharam com 1,5 % de ARR, investigando sua influência sobre as propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho. Fonseca Silva (2007) trabalhou com teores de 1 e 2% do ARR. Valores mais altos prejudicariam a trabalhabilidade, devido ao aumento da fluidez que poderiam acarretar a segregação do

material. Schäffel (2009) afirma que, como regra geral uma dosagem ótima de adição do ARR é de 2% em relação à massa do cimento. Cita ainda que nenhuma redução adicional de retração ocorre para dosagens acima de 4% da massa de cimento, baseado nas investigações de Sato (1983) e Shah *et al.* (1992).

3.8.1 Efeitos do ARR nas propriedades de pastas, argamassas e concretos

3.8.1.1 Propriedades reológicas

A influência do aditivo redutor de retração na *reologia dos concretos* foi somente verificado no estudo desenvolvido por Fonseca Silva (2007). A autora observou que o concreto fresco se ajusta bem ao modelo de Herschel-Bulkley, sendo a equação de estado reológico de Bingham um caso particular desse modelo. A adição de 1% de ARR foi pouco expressiva nos resultados reológicos. Em ambos os modelos, a adição de 2% de ARR melhorou a reologia inicial dos concretos. Os concretos com 2% de ARR apresentaram tensão de escoamento e viscosidade da ordem de 30% menores do que os respectivos resultados obtidos nos concretos de referência. A incorporação do ARR melhorou a dispersão de partículas floculadas de cimento, ao mesmo tempo em que reduziu o atrito interno do concreto, favorecendo a movimentação espacial dos grãos maiores. Com tensão de escoamento menor, a colocação, o espalhamento e o adensamento são facilitados nos concretos com ARR. Com a melhora na viscosidade, atribuída ao aumento de água livre para atuar como lubrificante da movimentação de partículas, fica facilitado o bombeamento para o interior da tubulação com gasto de energia menor.

3.8.1.2 Abatimento, teor de ar e tempo de pega

Gettu e Roncero (2003) relatam que o ARR pode aumentar a fluidez da mistura do concreto fresco. Fonseca Silva (2007), em estudos com concretos de alto desempenho utilizando 1 e 2% de ARR, observou que aqueles com 2% de ARR apresentaram *abatimento* ligeiramente mais elevado em relação aos concretos sem o aditivo redutor, apesar de visualmente a diferença apresentar-se maior.

Folliard e Berke (1997) verificaram que o teor de ar e massa unitária de concretos não foram afetados significativamente pelo uso do ARR. Fonseca Silva (2007), da mesma forma, não observou alteração do ar incorporado nos concretos com 1 e 2% de ARR, quando comparados com os de referência.

Nos estudos desenvolvidos por Brooks *et al.* (2000), onde se estudou o efeito da adição de 2% de ARR nos *tempos de pega* de concretos com resistência normal e em concretos de alta resistência, pelo método da resistência à penetração (ASTM-C-403), foi possível concluir que o ARR tem efeito desprezível no tempo de pega de concretos normais. Entretanto, combinado com aditivos superplastificantes em concretos de alta resistência, provoca um significativo retardo no tempo de pega. Conclusão similar foi obtida por Folliard e Berke (1997), que observaram um retardo no início e fim de pega para concretos com ARR. Fonseca Silva (2007), usando o método do ultrassom, também verificou um retardamento na velocidade de hidratação de 45 min para as misturas com 2% de ARR em relação à de referência, e de até 60 min pelo método da curva calorimétrica; para as misturas contendo 1% de ARR não foi verificado aumento no tempo zero (patamar de percolação).

3.8.1.3 Retração por secagem

O ARR, por reduzir a tensão de superfície do fluido no poro, pode diminuir em até 50% a retração por secagem em concretos (BALOGH, 1996 e BERKE, 1997 *apud* RAJABIPOUR, 2008). Gettu e Roncero (2003) observaram que a incorporação de um adequado ARR pode afetar drasticamente o comportamento do concreto com o tempo. O uso de 03 ARRs à base de propilenoglicol levaram à redução significativa da retração por secagem de concretos, com reduções em torno de 22 a 54%, após um ano de idade. Semelhantemente, Fonseca Silva (2007) obteve menor retração por secagem nos concretos com ARR que nos concretos de referência, porém o crescimento é maior nas primeiras idades e menor à medida que a hidratação avança. Conforme observado pela pesquisadora, a adição de 2% de ARR (em concretos com $f_{ck} = 80$ MPa) provocou uma redução da ordem de 30-40% na retração por secagem com 1 e 3 dias, 30% aos 28 dias, 20% aos 90 dias e 15% aos 120 dias de idade. Os resultados obtidos para os concretos com $f_{ck} = 60$ MPa, para dosagens com 1 e 2% de ARR, são praticamente idênticos.

3.8.1.4 Retração autógena e umidade relativa interna

A retração autógena é reduzida em concretos de alta resistência com baixa relação a/c, contendo ARR, pela capacidade deste aditivo reduzir as tensões capilares nos poros da pasta de cimento. Os inibidores de retração por secagem são também efetivos na redução da retração autógena, conforme experimentalmente obtido por Tazawa e Miyazawa (1995), em estudos com pasta de cimento, quando sugerem que o mecanismo da retração autógena é em essência similar ao da retração por secagem. Com 100 dias de idade, as pastas de referência tiveram retração autógena da ordem de 1500 microstrain, enquanto para as pastas com o ARR, na mesma idade, a retração autógena medida variou na ordem de 750 microstrain, portanto uma redução em torno de 50%.

Bentz *et al.* (2001) obtêm substancial redução na retração autógena e na umidade relativa interna de argamassas de baixa relação a/c contendo ARR, em condições seladas. Fonseca Silva (2007), trabalhando com concretos com relação a/c igual a 0,3, com 0, 1 e 2% de ARR, obteve, aos 28 dias, 387, 311 e 218 microstrain de retração autógena para os respectivos concretos, demonstrando assim o efeito benéfico do ARR no combate à retração autógena. A pesquisadora verificou que nestes concretos ($f_{ck} = 80$ MPa), o teor de 2% de ARR foi mais promissor que a dosagem de 1%. Na média, a redução da retração autógena com 2% de ARR foi cerca de 50% com 1 e 3 dias, 40%, com 7 e 28 dias, 35% aos 90 dias e 30% aos 120 dias. Tais resultados demonstraram, segundo Fonseca Silva (2007), que a eficácia da redução da tensão superficial da água dos poros diminuiu seu efeito com o tempo, pois as moléculas do redutor de tensão superficial são absorvidas pelos produtos de hidratação. Porém, a redução na retração autógena é maior, justamente nas primeiras idades (1 e 3 dias), quando o concreto apresenta menor resistência à tração. Já nos concretos com $f_{ck} = 60$ MPa, o comportamento do concreto com 1 e 2% foi muito próximo, não justificando o uso da dosagem maior. Fonseca Silva (2007) também demonstra a redução da umidade relativa interna ao utilizar o ARR. Os ensaios realizados pela pesquisadora, com sensores capacitivos, mostraram que à medida que a hidratação avança, a magnitude da retração autógena se elevou e a UR dentro do concreto diminuiu, ou seja, a autodessecação aumentou.

Conclusões semelhantes quanto à eficácia do emprego do ARR para reduzir a retração autógena são também obtidas em outros estudos (MELO NETO, 2008, BENTZ, 2006, BENTZ *et al.*, 2001).

3.8.1.5 Propriedades mecânicas, elásticas e viscoelásticas

Em seus estudos com concreto de relação a/c 0,35, Folliard e Berker (1997) verificaram que o uso de ARR, em teor de 1,5%, levou à redução da *resistência à compressão*, especialmente na idade de 1 dia (em torno de 18%). Segundo os autores, esta perda de resistência é principalmente atribuída aos efeitos do ARR na hidratação inicial do cimento. Entretanto, nas idades seguintes, a resistência à compressão do concreto contendo ARR foi somente de 8 a 9% menor que o concreto sem o ARR. Ainda, como o ARR é utilizado sem diminuir da água da mistura, pois toda sua água é combinada, os autores continuam esclarecendo que, se a dosagem de superplastificante fosse mantida constante e a quantidade de água da mistura fosse diminuída para atingir o abatimento desejável, a diferença na resistência à compressão não seria tão evidente. Estes pesquisadores concluem, então, que uma possível desvantagem dos ARR é a desestabilização do sistema de vazios da pasta, podendo levar ao retardo das reações de hidratação (aumento no tempo de pega), e à redução da resistência mecânica. No que se refere ao *módulo de elasticidade*, houve uma redução muito pouca expressiva com o uso do ARR.

Weiss (1999) estudou a influência do ARR (dosagem de 2%) em concretos com relação a/c igual a 0,29, e também notou uma diminuição de 15% na *resistência à compressão* dos concretos contendo o aditivo redutor em comparação ao de controle. Os resultados de ensaios de *fluência* (usando ARR à 5%) realizados à compressão em concreto na idade de 3 dias, indicaram, de uma maneira geral, uma redução nas deformações.

Os estudos realizados por Fonseca Silva (2007) nos concretos C80 ($f_{c_k} = 80$ MPa) e C60 ($f_{c_k} = 60$ MPa) revelaram que a *resistência à compressão* dos concretos contendo 1% de ARR foram muito próximos aos valores dos respectivos concretos de referência, sendo, em média, 3% superiores. Os concretos contendo 2% de ARR apresentaram, em média, redução de 5% em relação aos concretos de referência. Quanto ao *módulo de elasticidade*, a diferença percentual, obtida pela autora, entre o maior e o menor valor, numa mesma classe de resistência, foi de no máximo 3%, indicando que a presença do ARR não alterou o módulo de elasticidade dos concretos. A *resistência à tração direta* determinada reduziu em média 6% ao se adicionar 1% de ARR ao concreto e 10% dobrando a dosagem do ARR, o que demonstrou uma perda de capacidade resistente em torno de até 10%.

Poucos estudos foram encontrados na literatura sobre o efeito do ARR na *fluência*. Além de Weiss (1999), D'Ambrosia et al. (2001) e Gettu (2003) investigaram o tema, encontrando, no entanto, cada um, resultados contraditórios. Nos concretos de relação $a/c = 0,4$ estudados por Gettu (2003), o ARR não afetou a fluência básica. Já D'Ambrosia *et al.* (2001) detectaram diminuição no coeficiente de fluência na tração quando empregado 1% de ARR, em relação ao concreto de referência, em concretos de relação $a/c = 0,45$.

Pelo exposto, percebe-se que em geral o ARR promove alguma redução na resistência à compressão dos concretos. A influência do ARR na resistência à tração dos concretos, pela literatura consultada, não é muito explorada, ressalvas feitas ao trabalho extenso desenvolvido por Fonseca Silva (2007) para tração direta. No que se refere ao módulo de elasticidade, esta propriedade parece não ser alterada. A propriedade da fluência não é objeto de muitas investigações pelos pesquisadores, quando empregado o ARR.

3.8.1.6 Efeitos na microestrutura e na durabilidade

A durabilidade do concreto contendo ARR é um tema pouco pesquisado. Schaffel (2009) comenta que os dados disponíveis da literatura levam a resultados contraditórios. Em particular, há controvérsias sobre a influência do ARR na porosidade e na hidratação. A reduzida tensão de superfície da água nos poros capilares está relacionada à redução da retração, entretanto, destaca o pesquisador, não se encontra na literatura técnica corrente nenhuma investigação sistemática sobre a durabilidade dos concretos com ARR.

Encontram-se alguns estudos sobre a resistência à permeabilidade a cloretos dos concretos com ARR, mas pouco conclusivos. Folliard e Berker (1997) analisaram o comportamento dos concretos contendo ARR frente à ação de cloretos e observaram que o efeito do ARR não foi tão significativo ao serem submetidos à penetrabilidade a cloretos. Por outro lado, Weiss (1999) investigou também a resistência à permeabilidade de cloretos e verificou que as misturas de concreto contendo ARR exibiram uma redução de aproximadamente 25% quanto a esta propriedade.

Melo Neto (2008) em estudo da influência da ARR em pasta com cimento de escória ativada com silicato de sódio, verificou, por meio da porosimetria por intrusão de mercúrio, que este

aditivo altera claramente o desenvolvimento da matriz porosa do cimento, provocando um aumento proporcional da porosidade total com o aumento do ARR (nos teores de 0,5, 1, 1,5 e 2,0%) e o retardo do início do refinamento da porosidade. O aumento da porosidade total com a utilização do ARR é mais intenso nas primeiras idades, onde com 1 dia de idade a porosidade total passa de aproximadamente 30% na mistura sem aditivo para em torno de 50% com qualquer teor de ARR utilizado.

3.8.1.7 Efeito nas propriedades térmicas

As propriedades térmicas e a influência do ARR foram investigados por Fonseca Silva (2007) de forma pioneira. A pesquisadora verificou que estas propriedades foram ligeiramente afetadas com a presença do ARR. A *elevação adiabática de temperatura* foi 6% superior, em relação à mistura de referência. Por outro lado, o desprendimento de calor da mistura contendo ARR é menor até praticamente as primeiras 40 horas de ensaio. A curva do grau de hidratação em função do tempo mostra que o comportamento das duas funções é muito próximo, porém ocorrendo um retardamento nas reações de hidratação no concreto com ARR. O *calor específico* e a *difusividade térmica* também são ligeiramente menores, pois os concretos apresentam mesmo tipo litológico, volume e dimensão máxima do agregado graúdo, fatores que influenciam essas propriedades. Os *coeficientes de expansão térmica* dos concretos com e sem ARR foram próximos e respectivamente iguais à $14,3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e de $12,4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, cuja magnitude se situa dentro do intervalo apresentado na literatura técnica para rocha granítica ($9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $14,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).

3.9 A CONTRIBUIÇÃO DESTA PESQUISA

A importância da retração autógena nos concretos de alto desempenho é reconhecida pelo meio técnico em razão do número expressivo de artigos encontrados na literatura. Muitas investigações devem ser realizadas para entender o mecanismo, conhecer os fatores que afetam e sua intensidade e com isso buscar soluções para não evitar, ao menos reduzir a retração autógena. Nesse âmbito se enquadra esta pesquisa, ao visar fundamentalmente contribuir com o estudo aprofundado do comportamento do concreto quando empregado o aditivo redutor de retração como estratégia de mitigação da retração autógena.

- Em razão das lacunas observadas na literatura esta pesquisa se dedica a investigar o comportamento dos concretos quanto à resistência à tração (por compressão diametral e na flexão), sobretudo nas primeiras idades (de 1 a 7 dias de idade), quanto à fluência e principalmente, verificar o desempenho dos concretos frente à penetrabilidade de cloretos, quanto à carbonatação natural, permeabilidade à água e quanto à absorção, quando utilizado aditivo redutor de retração. De forma a complementar o estudo, as propriedades de resistência à compressão e módulo de elasticidade são também estudadas.
- Ainda, com base no estado da arte sobre o tema, foi possível verificar que é discutida a influência do ARR na porosidade e no processo de hidratação, sendo necessários mais estudos. Assim, com estudo em pasta, utilizando-se de técnicas analíticas, foi possível investigar o efeito do aditivo redutor na formação da microestrutura da pasta de material cimentício.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUÇÃO

O programa experimental desta tese, realizado em grande parte nos laboratórios de FURNAS Centrais Elétricas S.A, em Aparecida de Goiânia, foi elaborado com o intuito de se investigar:

- a capacidade de o aditivo redutor de retração – ARR (*shrinkage-reducing admixture - SRA*) reduzir o fenômeno da retração autógena em concretos;
- o efeito do ARR sobre as propriedades mecânicas e elásticas, principalmente a resistência à tração nas primeiras idades, bem como sobre a fluência;
- a influência do ARR sobre a durabilidade dos concretos;
- o efeito do ARR na formação da microestrutura das pastas dos concretos.

Neste capítulo apresentam-se as variáveis, os materiais, os concretos, assim como são descritos os métodos utilizados para a obtenção dos resultados.

4.2 VARIÁVEIS INDEPENDENTES

As variáveis estudadas neste programa experimental, com vistas a atingir os objetivos propostos, foram: i) para os estudos em concreto: as classes de resistência do concreto e o teor do aditivo redutor de retração (ARR); ii) para o estudo em pastas: a relação a/ag e o teor de ARR. A seguir essas variáveis são detalhadas.

4.2.1 Classes de concreto

A proposta do trabalho foi de trabalhar com três classes de concreto, a fim de possibilitar a obtenção de curvas de comportamento que descrevam o fenômeno, a partir de um tratamento estatístico. Como este trabalho está inserido dentro de um projeto de P&D mais amplo (vide

Capítulo 1 - Introdução), empregaram-se as duas classes estudadas por Fonseca Silva (2007): a **C80**, com resultados médios de resistência à compressão aos 28 dias, da ordem de 90 MPa e a **C60**, com resultados médios de resistência à compressão aos 28 dias, da ordem de 70 MPa. Adicionalmente, uma terceira classe, **C40**, com resultados de resistência à compressão da ordem de 50 MPa, aos 28 dias, foi utilizada. A partir de um estudo de dosagem adicional para se obter um concreto da mesma família das classes C80 e C60, com relação a/agl 0,3 e 0,4, respectivamente, obteve-se a relação $a/agl = 0,63$ para a C40. Trabalhou-se então com as classes de concreto **C80**, **C60** e **C40**.

4.2.2 Pastas estudadas

O estudo em pastas objetivou produzir dados para a investigação da influência do aditivo redutor de retração na formação da microestrutura, porosidade e processo de hidratação, buscando também explicações para comportamentos do ponto de vista macroestrutural. Definiu-se por estudar as pastas dos dois concretos de menor relação a/agl : C80 e C60. Adotou-se a seguinte nomenclatura das pastas: a pasta do concreto C80 = **P80** e a pasta do concreto C60 = **P60**.

4.2.3 Teor do aditivo redutor de retração

Os teores empregados do aditivo redutor de retração, tanto para o concreto como para as pastas, foram **1%** e **2%** em relação à massa de cimento, objetivando verificar qual o teor mais eficaz no combate à retração nas primeiras idades e a influência nas propriedades do concreto. Tais teores foram definidos a partir do levantamento bibliográfico e orientações do fabricante, que indicam o máximo de 2% para atenuar a retração. Estas dosagens foram as mesmas utilizadas por Fonseca Silva (2007).

4.2.4 Apresentação geral do experimento

Na Figura 27 está apresentada uma visão geral do programa experimental com a representação das variáveis e ensaios empregados, com vistas ao melhor entendimento sobre o

fenômeno da retração autógena, quando utilizado o aditivo redutor de retração como estratégia para combatê-la.

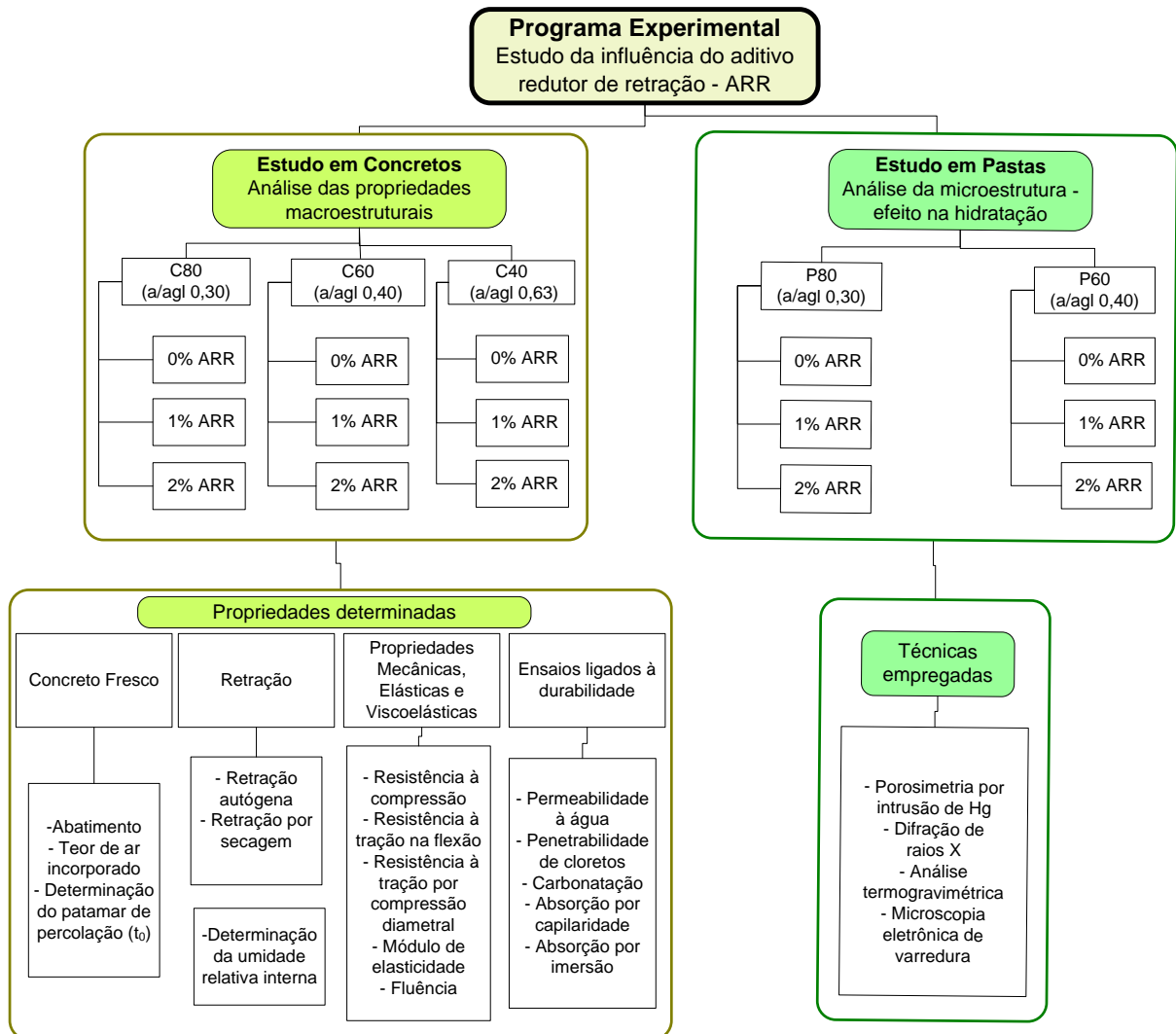


Figura 27 - Visão geral do programa experimental.

4.3 MATERIAIS

Para a confecção dos concretos estudados nesta pesquisa foram utilizados cimento CPV ARI Plus, sílica ativa, agregado graúdo de granito com dimensão característica máxima 19 mm, agregado miúdo areia lavada de rio, além de aditivos superplastificante e redutor de retração. A caracterização dos materiais foi realizada nos Laboratórios de FURNAS, em Aparecida de Goiânia, local da execução de todo o programa experimental desta pesquisa, à exceção dos ensaios de umidade relativa interna e análise termogravimétrica, realizados na COPPE/UFRJ e de porosimetria por intrusão de mercúrio, realizada na ABCP.

4.3.1 Cimento

O cimento empregado foi do tipo CP V ARI (ABNT 5733), obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, recebendo na etapa final de moagem, uma quantidade necessária de sulfato de cálcio e adição de 5% de material carbonático, sem adição de sílica ativa. As características físicas e mecânicas deste cimento estão dispostas na Tabela 1, e as químicas na Tabela 2.

Conforme observa-se nas Tabelas 1 e 2, o cimento atende as exigências das normas brasileiras, exceção feita ao limite do teor de óxido de potássio.

Tabela 1 – Caracterização física e mecânica do cimento realizada nos Laboratórios de FURNAS

Ensaio	Unidade	Resultados	Limites NBR 5733	Método de ensaio	
Massa específica	g/cm ³	3,1	-	NBR NM 23: 2000	
Área específica	cm ² /g	4800	≥ 3000	NRB NM 23:2000	
Finura na peneira 200	(%)	0,3	≤ 6,0	ABNT NBR 11579:1994	
Finura na peneira 325	(%)	0,1	≤ 6,0	ABNT NBR 9202:1985	
Tempo de início de pega	h	3:10	≥ 1:00	NBR NM 65: 2002	
Tempo de fim de pega	h	3:50	≤ 10:00	NBR NM 65: 2002	
Água de consistência – Pasta	(%)	30,4	-	NBR NM 43:2002	
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente	mm	0,0	≤ 5	NBR 11582:1991	
Resistência à compressão	3 dias	MPa	37,0	≥ 24,0	
	7 dias	MPa	46,4	≥ 34,0	NBR 7215:1996
	28 dias	MPa	52,0	-	

Tabela 2 – Caracterização química do cimento realizada nos Laboratórios de FURNAS

Composição química	Teores (%)	Limites NBR 5733	Método de ensaio
Perda ao fogo	2,76	≤ 4,5	NM 18:2004
Resíduo insolúvel	0,37	≤ 1,0	NM 15:2004
Dióxido de silício – SiO ₂	21,18	-	NM 11-2:2004
Óxido de cálcio- CaO	62,21	-	NM 11-2:2004
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃	2,18	-	NM 11-2:2004
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃	5,43	-	NM 11-2:2004
Trióxido de enxofre– SO ₃	2,62	≤ 3,5	NM 16:2004
Óxido de magnésio – MgO	1,53	≤ 6,5	NM 11-2:2004
Álcalis Totais	Óxido de sódio – Na ₂ O	0,36	NBR 5747:2004 ou IT.DCT.TC.403
	Óxido de potássio – K ₂ O	0,90	NBR 5747:2004 ou IT.DCT.TC.403
	Equivalente alcalino	0,95	IT.DCT.TC.403
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	4,45		NBR NM 16:2004
Óxido de cálcio livre	1,8	≤ 3,0	NBR 5748:1993

4.3.2 Sílica ativa

Utilizou-se sílica ativa nacional, do tipo não-densificada, proveniente de um mesmo lote de produção, fornecida em sacos de papel *craft*, com 15 kg cada. Foi empregada em substituição a 10 % da massa do cimento, com compensação de volume. Suas características físicas e químicas encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Características físicas e químicas da sílica ativa realizadas nos Laboratórios de FURNAS

Propriedades determinadas	Teores	Limites NBR 13956:1997	Método de ensaio		
Massa específica (g/cm ³)	2,22	-	NM 23:2001		
Perda ao fogo	2,18	≤ 6,0	NM 18:2004		
Óxido de magnésio (MgO)	0,07	-	NM 11-2:2004		
Dióxido de silício (SiO ₂)	93,76	≥ 85	NM 11-2:2004		
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,21	-	NM 11-2:2004		
Componentes químicos (%)	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,10	-	NM 11-2:2004	
	Óxido de cálcio (CaO)	0,32	-	NM 11-2:2004	
	Álcalis Totais	Óxido de sódio – Na ₂ O	0,31	-	IT.DCT.TC.403
		Óxido de potássio – K ₂ O	1,04	-	IT.DCT.TC.403
		Equivalente alcalino	0,99	≤ 1,5	IT.DCT.TC.403
	Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	0,00	-	NM 16:2004	
Teor de Umidade (%)	0,39	≤ 3,0	NM 24:2004		

4.3.3 Agregados

Como *agregado miúdo* utilizou-se areia natural, produto comercial da região da cidade do Rio de Janeiro, quartzosa, oriunda de depósito aluvial no rio Guandu – RJ. Na amostra de areia natural, observada em estereomicroscópio (lupa binocular – Figura 30a), verificou-se a cor geral creme acinzentada e não foram observados sulfetos; a granulometria variou de fina a grossa, com fragmentos atingindo a classificação de cascalho; os grãos variaram de subangulosos a angulosos; os feldspatos encontravam-se preservados e raros estavam em processo de alteração para caulim. A distribuição granulométrica (Figura 28) apresentou-se dentro dos limites da zona utilizável da ABNT NBR 7211:2005.

O *agregado graúdo* utilizado foi resultado da britagem de rocha granítica, de dimensão máxima característica 19 mm, cuja distribuição granulométrica atendeu os limites da ABNT NBR NM 7211:2005, conforme apresentado na Figura 29. A análise petrográfica (Figura 30b)

realizada na imagem obtida por meio de microscópio ótico com luz polarizada indica a presença de plagioclásio saussuritizado, quartzo, biotita e titanita.

As principais características dos agregados estão demonstradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização dos agregados miúdo e graúdo realizada nos Laboratórios de FURNAS

Ensaio realizado	Unidade	Areia Natural	Brita 19mm	Método de ensaio
Módulo de Finura	-	2,74	7,10	ABNT NBR NM 248:2003
Dimensão máxima característica	mm	-	19	ABNT NBR NM 248:2003
Massa específica	g/cm ³	2,61	2,70	ABNT NBR NM 52:2003
Massa unitária – estado solto	kg/dm ³	-	1,47	ABNT NBR NM 7251:1982
Índice de forma	-	-	2,1	ABNT NBR NM 7809:2006
Abrasão Los Angeles	-	-	39 “B”	ABNT NBR NM 51:2001
Absorção de água	(%)	0,5	0,5	ABNT NBR NM 30:2001
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	(%)	0,09	-	ABNT NBR 7218:1987
Teor de material pulverulento	(%)	1,05	-	ABNT NBR NM 46:2003
Teor de matéria orgânica	+/- clara	+ clara	-	ABNT NBR NM 49:2001

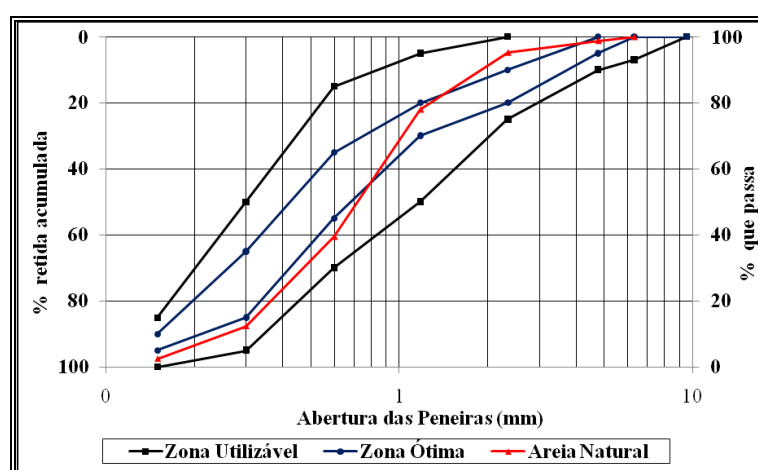


Figura 28 - Curva granulométrica da areia natural

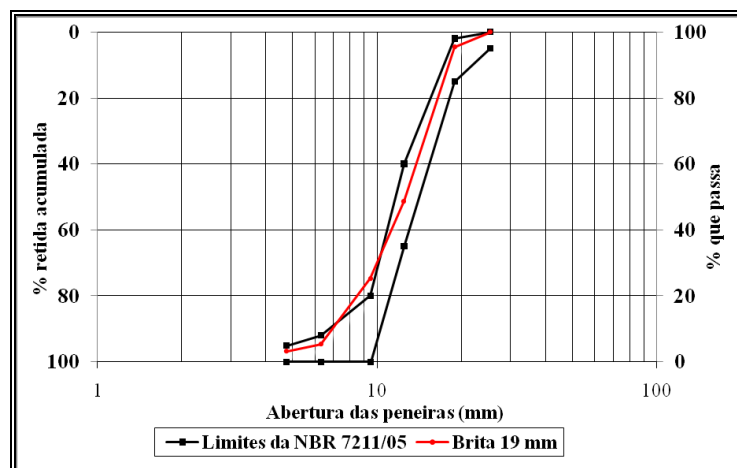
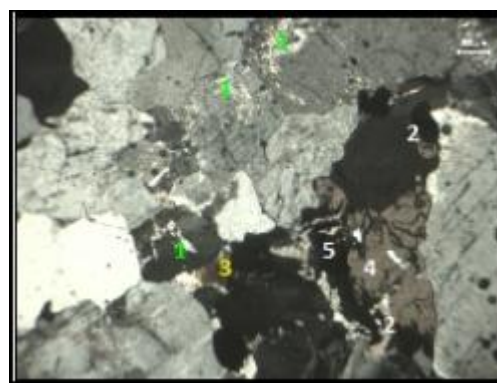


Figura 29 - Curva granulométrica da brita.



a) *Composição Mineralógica*: Quartzo (50%); Feldspatos (35%); Micas (10%); Granada (3%), óxidos de ferro (1%) e fragmentos de rocha (1%).



b) 1. Plagioclásio saussuritizado; 2. Quartzo; 3. Biotita; 4. Titanita; 5. Opacos. Imagem ao microscópio ótico com luz polarizada.

Figura 30 - Análises petrográficas dos agregados: a) areia natural, b) brita 19 mm.

4.3.4 Aditivos

O *aditivo superplastificante* empregado foi de terceira geração, formado por polímeros de éter carboxílico, que permite uma sensível dispersão das partículas de cimento, proporcionando a obtenção da trabalhabilidade adequada para o concreto de alto desempenho. Os teores utilizados foram definidos no estudo de dosagem.

Utilizou-se *aditivo redutor de retração* – ARR (em inglês, *shrinkage reducing admixture* – SRA), líquido, base glicol, com o objetivo de diminuir a tensão superficial nos poros capilares do concreto.

As principais características do aditivo superplastificante e do ARR encontram-se na Tabela 5. É importante ressaltar que embora o teor de sólidos do ARR seja desprezível, a água contida no aditivo está toda combinada; portanto, este aditivo é isento de água livre, conforme ensaio realizado no Núcleo de Catálise da COPPE/UFRJ.

Tabela 5 – Caracterização dos aditivos realizada nos Laboratórios de FURNAS

Base	Massa específica	Ph	Teor de sólidos
Policarboxilato	1,1	6,44	31,15
Glicol	1,0	11,36	0,5 a 2% (desprezível)

4.4 CONCRETOS ESTUDADOS

Os concretos classes C80 ($a/ag = 0,3$) e C60 ($a/agl = 0,4$) avaliados nesta pesquisa são os mesmos que foram objeto de estudo de Fonseca Silva (2007); as pequenas variações devem-se aos ajustes necessários para compensar a também pequena diferença entre a massa específica dos materiais utilizados neste estudo e a dos materiais da pesquisadora mencionada. É importante salientar que tais traços foram planejados e obtidos experimentalmente de forma que tivessem aplicabilidade em estruturas reais.

Para o estudo em concretos, optou-se pela elaboração de um programa experimental de forma que fosse possível uma melhor análise de resultados baseada em um tratamento estatístico, proporcionando maior confiabilidade aos resultados obtidos. Com isso, foi considerado um planejamento fatorial completo, no qual trabalhou-se com um conjunto de 03 dosagens (03 classes de concreto) com 03 situações (teor de aditivo – 0, 1 e 2%), podendo ser representado por b^x (onde b é o número de níveis e x é o número de fatores), resultando em 09 situações de ensaios (3^2). A proposta, então, foi de se trabalhar com uma classe adicional C40, com resistência à compressão aos 28 dias da ordem de 50 MPa. Após um estudo de dosagem baseado nas características das classes previamente definidas – C80 e C60 - obteve-se um concreto com relação $a/agl = 0,63$, que atinge os 50 MPa de resistência à compressão aos 28 dias, conforme pretendido, a fim de que o intervalo de resistências entre os concretos fosse equilibrado para fins estatísticos. Na Figura 31 estão apresentadas as curvas das dosagens estudadas.

Não se optou por trabalhar com um terceiro traço de concreto de relação a/agl menor que 0,3, pois resultaria em um concreto com resistência muito elevada e consumo de cimento superior a 500 kg/m^3 , fugindo da proposta inicial da pesquisa, que é estudar traços de concretos com resistência à compressão mais próximas à realidade da construção civil brasileira.

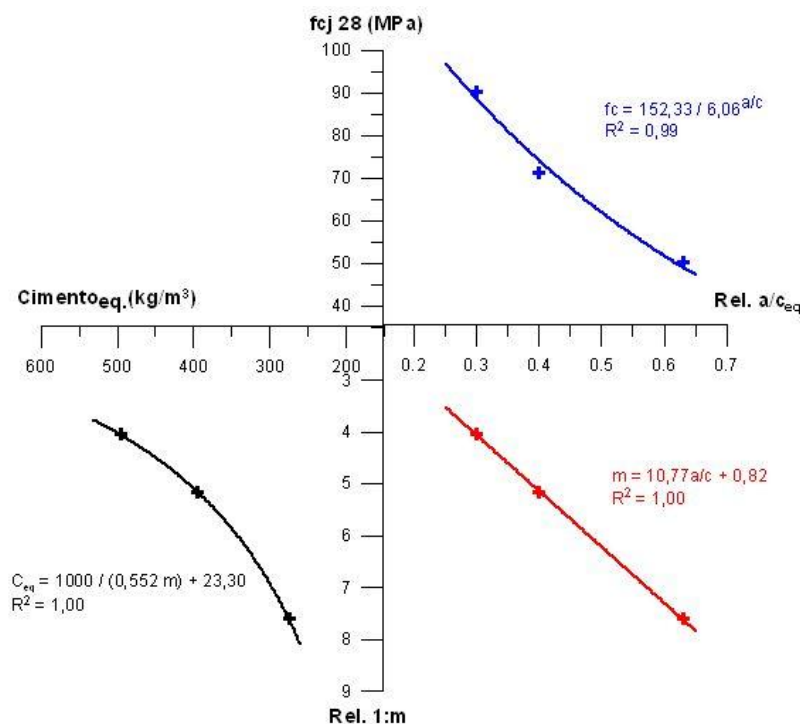


Figura 31 - Curvas de dosagem dos concretos estudados.

Resumidamente, neste programa experimental trabalhou-se com 03 composições de concreto referência, a saber: o concreto com $f_{ck28} = 80$ MPa, denominado C80, o de $f_{ck28} = 60$ MPa, denominado C60 e o de $f_{ck28} = 40$ MPa, denominado C40; para todos considerou-se um desvio padrão de produção de 4 MPa.

A fim de se verificar a influência do ARR nas propriedades e características do concreto, foram fabricados concretos com 1 e 2% do ARR em relação à massa do cimento, para cada concreto referência.

O abatimento requerido no ensaio de tronco de cone foi definido em 200 ± 20 mm para todas as classes de concreto.

4.4.1 Identificação dos concretos

Para cada concreto de referência (C80, C60 e C40) foram produzidas misturas de referência, sem aditivo, e misturas contendo 1 e 2% de ARR, totalizando 9 concretos. Na Tabela 6 está apresentada a denominação dos concretos pesquisados.

Tabela 6 – Identificação usada nessa pesquisa para os concretos

Concreto	C80	C60	C40
Referência	C80_0	C60_0	C40_0
Referência + 1% de ARR	C80_1	C60_1	C40_1
Referência + 2% de ARR	C80_2	C60_2	C40_2

4.4.2 Composição e parâmetros dos concretos

A composição e parâmetros de misturas dos concretos estudados estão apresentados na Tabela 7.

Fonseca Silva (2007), em seu estudo, inseriu a relação $(\text{água} + \text{ARR}) / (c + sa)$, ou $(\text{água} + \text{ARR}) / \text{agl}$ como um parâmetro para destacar o efeito do aditivo redutor de retração na trabalhabilidade do concreto. Quanto maior essa relação, mais fluida se torna a mistura, alterando as propriedades reológicas de pastas e concretos. Isso ocorre em razão de não se descontar da água da mistura a água contida no ARR, assim com se faz com o aditivo superplastificante. Isto porque, segundo o fabricante e confirmado por meio de ensaios realizados no núcleo de catálise da COPPE/UFRJ, toda a água livre do ARR está combinada, não havendo água livre para aumentar a relação a/agl .

Tabela 7 – Composição e parâmetros de misturas dos concretos

		C80_0	C80_1	C80_2	C60_0	C60_1	C60_2	C40_0	C40_1	C40_2
Dados de composição (kg/m ³)	Cimento	450	450	450	360	360	360	250	250	250
	Sílica ativa	45	45	45	36	36	36	25	25	25
	Água	150	150	150	162	162	162	172	172	172
	Areia natural (sss)	776	776	776	837	837	837	930	930	930
	Brita 19 mm (sss)	1039	1039	1039	1024	1024	1024	972	972	972
	Superplastificante	4,50	4,50	4,50	2,34	2,34	2,34	3,25	3,25	3,25
	ARR	-	4,5	9	-	3,6	7,2	-	2,5	5,0
Parâmetros das misturas	Relação a/c	0,33	0,33	0,33	0,45	0,45	0,45	0,69	0,69	0,69
	Relação a/agl	0,30	0,30	0,30	0,40	0,40	0,40	0,63	0,63	0,63
	Relação (a+ARR)/agl	0,30	0,31	0,32	0,40	0,42	0,43	0,63	0,63	0,64
	Argamassa seca (%)	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0
	Água/materiais secos (%)	6,5	6,5	6,5	7,2	7,2	7,2	7,4	7,4	7,4
	Agreg. Graúdo/agreg. Miúdo	1,34	1,34	1,34	1,22	1,22	1,22	1,02	1,02	1,02
	Relação 1:m	4,03	4,03	4,03	5,17	5,17	5,17	7,60	7,60	7,60
	Pasta sem ar incorporado (%)	31,7	31,7	31,7	29,7	29,7	29,7	25,6	25,6	25,6

4.4.3 Mistura

Para a produção dos concretos, os agregados eram preparados com antecedência na condição saturada superfície seca (sss), de forma a garantir que não absorvessem a água de amassamento. Todos os constituintes dos concretos eram pesados imediatamente antes da mistura em betoneira; tanto a pesagem dos materiais quanto a produção dos concretos ocorreram em sala climatizada, com temperatura $21^{\circ} \pm 2$ C. Antes da introdução dos materiais na betoneira, esta era imprimada com uma mistura de agregados, cimento e água (depois descartada) para minimizar perdas durante o procedimento de mistura. A betoneira utilizada foi do tipo industrial, de eixo inclinado, com capacidade de 320 litros.

A seqüência de introdução dos materiais na betoneira foi padronizada, conforme apresentada na Tabela 8, a fim de se garantir melhor homogeneidade na mistura.

Tabela 8 – Sequência de colocação dos materiais na betoneira

Etapa	Tempo (s)
Agregado graúdo e 1/3 da água	30
Cimento e sílica ativa	120
Parte da areia (cerca de 50%)	
1/3 da água	150
Restante da areia. Raspagem das paredes e pás da betoneira	
Restante da água (1/3)	
Aditivo superplastificante	300
Aditivo redutor de retração (ARR)	60

4.4.4 Moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova

A moldagem e adensamento dos corpos de prova cilíndricos 10x20 cm (Figura 32a) e os 10x10x40 cm foram realizados em mesa vibratória. Os corpos de prova destinados a ensaios de retração autógena e secagem com dimensões de 10x10x30 cm (Figura 32b), e fluência, de 15x30 cm (Figura 32c) foram moldados e adensados com vibradores de imersão, por estarem instrumentados com extensômetros tipo Carlson. Este tipo de extensômetro requer cuidados para não sofrer vibração, sob pena de danificá-los. Todos os corpos de prova foram moldados em sala climatizada com temperatura controlada de 21 ± 2 °C.

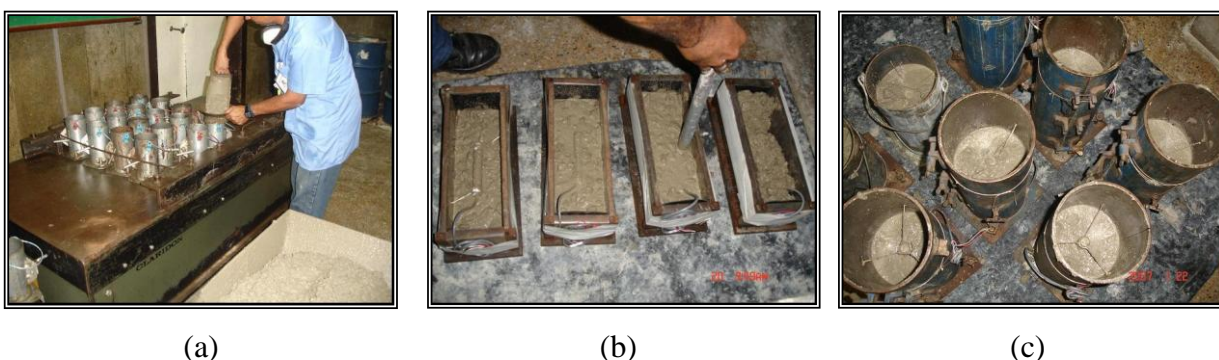


Figura 32 - Moldagem de corpos de prova: a) formas cilíndricas; b) ensaios de retração, e c) ensaios de fluência.

Após moldagem, os corpos de prova foram cobertos com filme plástico para prevenir a perda de água e colocados em câmara úmida com 100% de umidade relativa. Decorridas 24 h, eram

desmoldados e mantidos no mesmo ambiente até a idade de realização do ensaio. Os procedimentos para os ensaios de retração autógena e por secagem foram diferenciados e são descritos respectivamente nos itens 4.8 e 4.10.

4.5 PASTAS ESTUDADAS

Para um melhor conhecimento da influência do ARR na microestrutura e na hidratação da pasta de cimento foram confeccionadas duas pastas com relação a/agl igual a 0,3 (P80) e 0,4 (P60), representando a pasta correspondente do concreto classe C80 e da classe C60, respectivamente. Cada uma fabricada nas três situações: referência (sem ARR) e com 1% e 2% de ARR. As dosagens das misturas estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Composição das pastas (kg/m³)

Pastas	Cimento	Sílica ativa	Água	Superplastificante	ARR
P80_0	1427	143	475	14,3	-
P80_1	1427	143	475	14,3	14,3
P80_2	1427	143	475	14,3	28,5
P60_0	1223	122	550	7,9	-
P60_1	1223	122	550	7,9	12,2
P60_2	1223	122	550	7,9	24,5

As pastas foram produzidas em argamassadeira com capacidade para 5,0 l. A seguinte seqüência de produção foi utilizada:

- a) colocação de cerca de 80% da água de amassamento com o superplastificante diluído, depois a adição do cimento e sílica;
- b) procedeu-se à homogeneização e após 1,5 minutos de mistura, a argamassadeira foi desligada para a sua raspagem, garantindo melhor homogeneização dos componentes;

c) lançamento gradual, com a argamassadeira ligada, do restante da água. As misturas foram homogeneizadas por 5 minutos. Para as pastas com o aditivo redutor de retração, este foi adicionado após 4 minutos de mistura.

Como era esperado, a pasta apresentou-se bastante fluida. Mas a autora não se preocupou com o controle da consistência, uma vez que se planejava estudar, comparativamente, a influência do aditivo redutor de retração nas pastas.

Após fabricação das pastas, foram moldadas barras prismáticas para a realização dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (item 4.13.1), nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias, de análise termogravimétrica – ATG (item 4.13.2), nas idades de 1, 3, 7, 28 e 90 dias, de difração de raios X (item 4.13.3) e microscopia eletrônica de varredura (item 4.13.4), nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias.

4.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

Os concretos no estado fresco foram caracterizados por meio das determinações da consistência pelo abatimento de tronco de cone, teor de ar incorporado e massa específica, como ilustrado na Figura 33.

A consistência pelo abatimento de tronco de cone foi determinada conforme ABNT NBR NM 67: 1998, imediatamente após o término da mistura. A determinação do teor de ar incorporado foi realizada de acordo a ABNT NBR NM 47: 2002; a massa específica foi determinada conforme procedimento da ABNT NBR 9833: 1987.

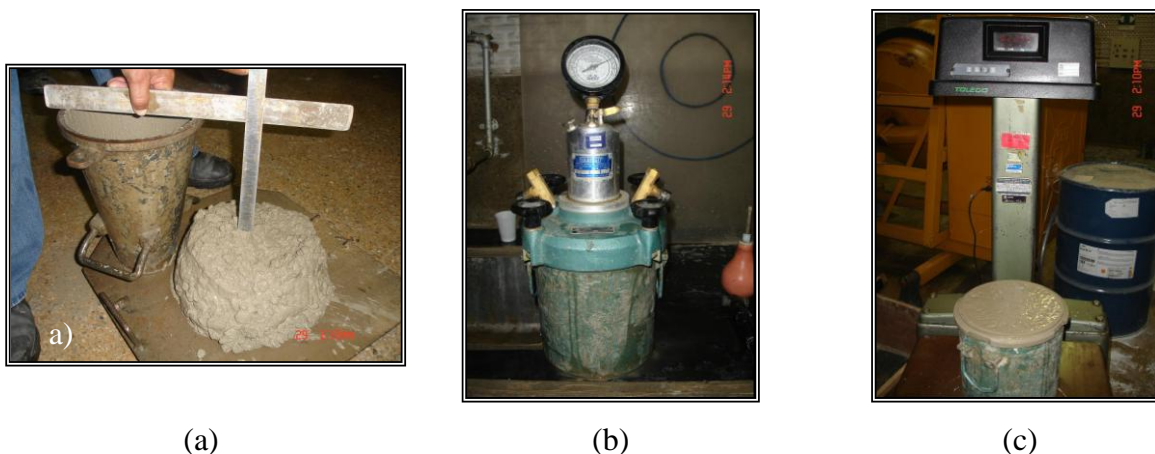


Figura 33 - Ensaio realizado no concreto fresco: a) abatimento do tronco de cone; b) teor de ar incorporado e c) massa específica.

4.7 DETERMINAÇÃO DO PATAMAR DE PERCOLAÇÃO

Os procedimentos para o ensaio de determinação do patamar de percolação pelo método ultrassônico foram baseados nos trabalhos de Lee et al. (2004), Fonseca Silva (2007) e Trtnik et al (2008). Tomou-se como base também a norma NBR 8802 : 1991.

Utilizou-se o aparelho de determinação de propagação de ondas ultrassônicas PROCEQ® TICO® (Figura 34f). O aparelho é composto por uma unidade eletrônica, com visor e dois transdutores com frequência de 54 kHz com diâmetro aproximado de 50 mm. O aparelho mede o tempo de propagação da onda no corpo de prova e automaticamente, após o usuário informar a distância, calcula a velocidade de propagação em m/s.

As dimensões do corpo de prova foram determinadas de acordo com as prescrições da RILEM NDT 1 (1972) e da NM 58 (1996). A RILEM NDT 1 (1972) estabelece as dimensões da peça a ser ensaiada, em função da frequência do transdutor (Tabela 10).

Tabela 10 – Frequência natural do transdutor de acordo com as dimensões da peça a ser ensaiada (RILEM NDT1, 1972).

Distância a ser percorrida pela onda (mm)	Frequência natural do transdutor (kHz)	Dimensão transversal mínima do elemento (mm)
100 – 700	≥ 60	70
200 – 1500	≥ 40	150
> 1500	≥ 20	300

No caso do transdutor usado, de 54 kHz de frequência, o comprimento do corpo de prova deve ficar entre 200 e 1500 mm, enquanto a dimensão lateral deve ser no mínimo 150 mm. Segundo a NM 58 (1996), devido à heterogeneidade do concreto, é essencial que a distância a ser percorrida pela onda ultrassônica seja a maior possível e a dimensão lateral mínima, para uma frequência de transmissão de 54 kHz, deverá ser 80 mm. Optou-se por usar corpos de prova prismáticos com dimensão longitudinal de 300 mm e dimensão transversal de 150 mm, atendendo as duas recomendações.

As formas dos corpos de prova foram fabricadas com chapas compensadas em madeira plastificadas. Vedou-se internamente as paredes com chapas de poliestireno com espessura de

2 mm, visando evitar passagem de ondas através das paredes, diminuindo a chance de possíveis erros dos resultados, conforme recomendado por Trtnik et al. (2008). Completou-se a vedação das folhas de poliestireno cobrindo as arestas internas com silicone. Antes de adicionar o concreto, instalaram-se os transdutores nos vazios da forma. Para perfeita vedação passou-se uma fita ao redor dos transdutores antes da instalação. Dessa maneira, foi possível moldar o corpo de prova sem ocorrer vazamentos. O ensaio foi realizado seguindo as etapas a seguir.

- a) fabricar o concreto com materiais na temperatura da sala (21 ± 2 °C), com constituintes também nessa temperatura;
- b) aferir o equipamento usando a barra de referência metálica, que acompanha o aparelho, com vibração do tempo de trânsito conhecida (Figura 34a);
- c) colocar uma camada fina de gel de silicone, nas faces dos transdutores, para garantir contato contínuo entre as superfícies dos transdutores e o concreto (Figura 34b);
- d) acoplar os transdutores (receptor e transmissor) nos furos de 50mm de diâmetro, existentes nas laterais da forma (Figura 34c). Penetrar os transdutores de modo a facear a forma internamente, proporcionando um arranjo com transmissão direta (do pulso elétrico em onda de choque);
- e) moldar o corpo de prova numa forma prismática, com seção transversal de 150 mm x 150 mm e comprimento de 300 mm (Figura 34d), adensado manualmente com soquete do cone de Abrams, em três camadas de 30 golpes cada; (segurar o receptor e o transmissor para não perder o contato com o concreto durante o adensamento);
- f) cobrir a superfície exposta do concreto com filme plástico (Figura 34e), seguido de pano úmido, para impedir a saída de umidade do concreto e colocação de uma folha de poliestireno acima do pano para evitar a saída de pulsos ultrassônicos.
- g) fazer leituras periódicas do tempo de propagação da onda longitudinal, mostrada no visor digital do aparelho (Figura 34f). O intervalo entre as leituras iniciais é maior, passando para intervalos menores, à medida que o tempo de propagação começa a diminuir;
- h) calcular a velocidade de propagação de ondas, dividindo-se a distância entre os transdutores (m) pelo tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção.
- i) traçar a curva velocidade de propagação *versus* idade do concreto;

- j) o patamar de percolação é assumido como sendo a idade do concreto onde houve um aumento brusco na velocidade de propagação da onda ultrassônica.



Figura 34 - Procedimento para determinação do patamar de percolação, usando método ultrassônico. (a) calibração do aparelho; (b) gel nos transdutores para garantia do contato com o concreto; (c) detalhe da forma revestida com chapa de poliestireno 2 mm e do transdutor acoplado à forma; (d) moldagem do corpo de prova; (e) corpo de prova moldado e selado com filme plástico e (f) equipamento de ultrassom utilizado.

4.8 RETRAÇÃO AUTÓGENA

Para os ensaios de retração autóloga livre foram moldados 02 corpos de prova para cada tipo de concreto estudado, com dimensões de 10x10x30 cm, provenientes de uma mesma betonada. As leituras de deformação devido à retração autóloga ocorreram a partir do patamar de percolação até a idade de 180 dias para o C60 e C80. Para o C40, a leitura foi iniciada com 6 h da moldagem (vide item 5.1.2.1) e efetuada até os 180 dias de idade.

4.8.1 Método de ensaio

O método de ensaio para determinação da retração autógena livre no concreto utilizado neste programa experimental foi o empregado por FURNAS (IT.DCT.C.TC.310), com algumas adaptações resultantes do conhecimento obtido no âmbito do projeto em que essa pesquisa está inserida. Resumidamente, o procedimento consiste em medir as deformações ocorridas no concreto por meio de um extensômetro elétrico, tipo Carlson modelo M4, embutido no corpo de prova selado.

Para o preparo das formas, colocou-se nas suas laterais, material anti-aderente e flexível (borracha, com espessura de 3 mm) para reduzir o atrito entre o corpo de prova e a forma, de maneira que não houvesse restrição ao movimento livre do corpo de prova. Na Figura 35 está mostrada a forma pronta para a moldagem.

Após a moldagem, realizada em duas camadas, os corpos de prova foram cobertos com 03 camadas de filme plástico, que por sua vez foi fixado com fita adesiva, de forma a evitar a troca de umidade com o meio; depois, acondicionados em câmara úmida por 24 h, quando então eram desmoldados e imediatamente envolvidos com três camadas de filme plástico e por último, com papel de alumínio adesivo. Dessa forma, os corpos de prova foram mantidos em sala climatizada com $T = 21 \pm 2^\circ\text{C}$ e $UR = 55 \pm 5\%$ até o fim do ensaio. A Figura 36 mostra a seqüência do preparo dos corpos de prova para a determinação da retração autógena do concreto.

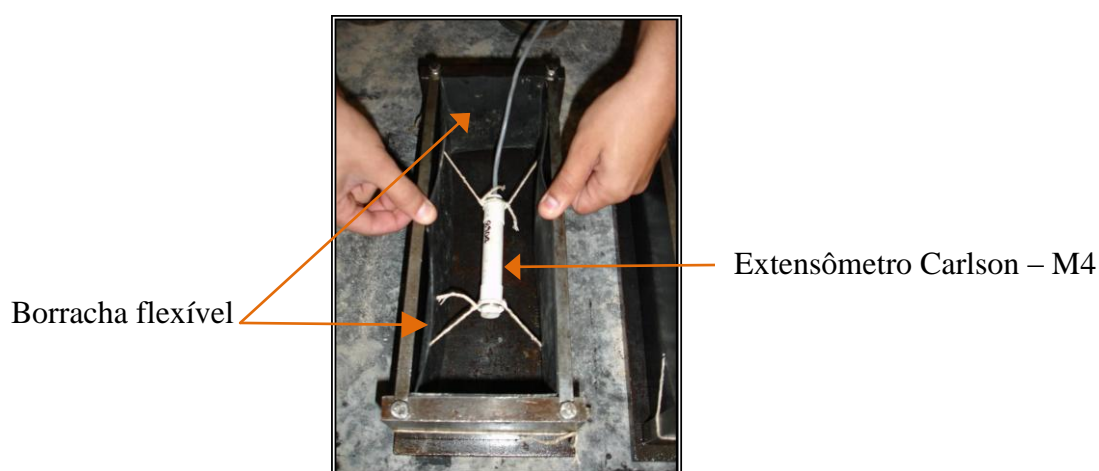


Figura 35 - Forma para ensaio de retração autógena.

As leituras de deformação e temperatura foram iniciadas a partir do patamar de percolação (tempo-zero) e repetidas de 2 em 2 h por 24 h após moldagem. Até a idade de 01 mês as leituras foram diárias e depois 01 leitura por semana pelo período de 180 dias.

O princípio do ensaio baseia-se no fato de que a retração autógena ocorre sem qualquer perda de massa para o meio. Assim, os corpos de prova foram pesados regularmente, a fim de se garantir a eficiência da selagem e, por consequência, a constância de massa.

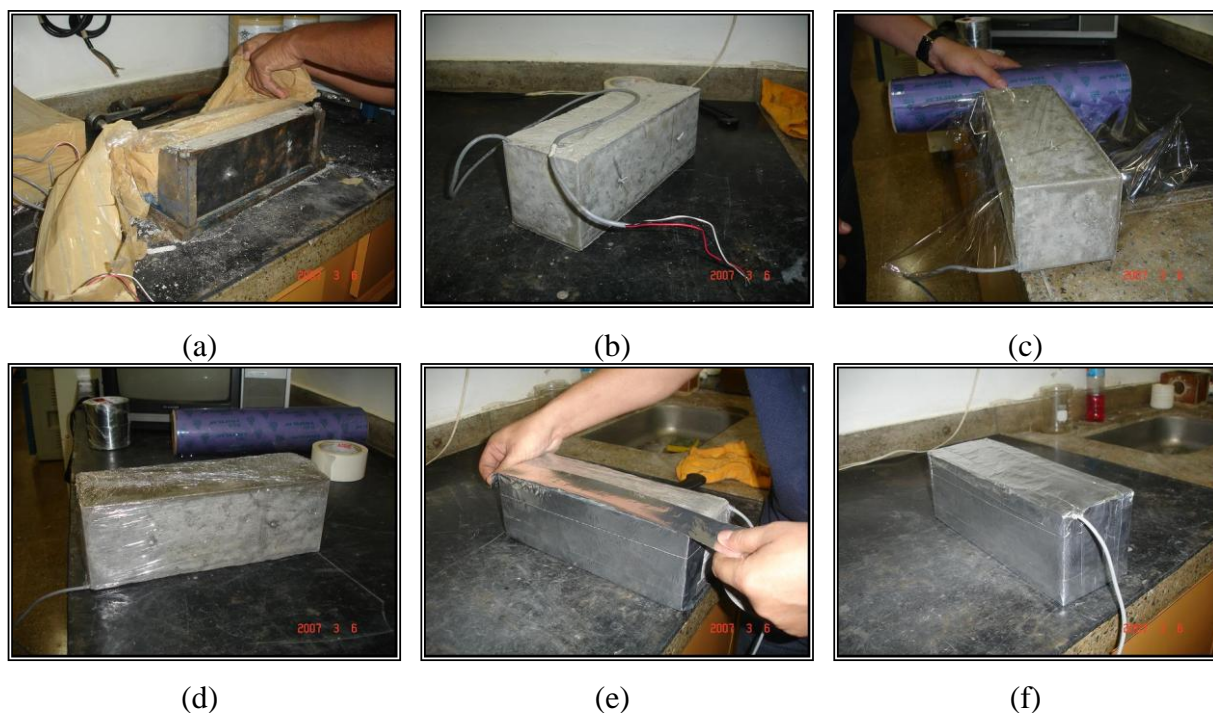
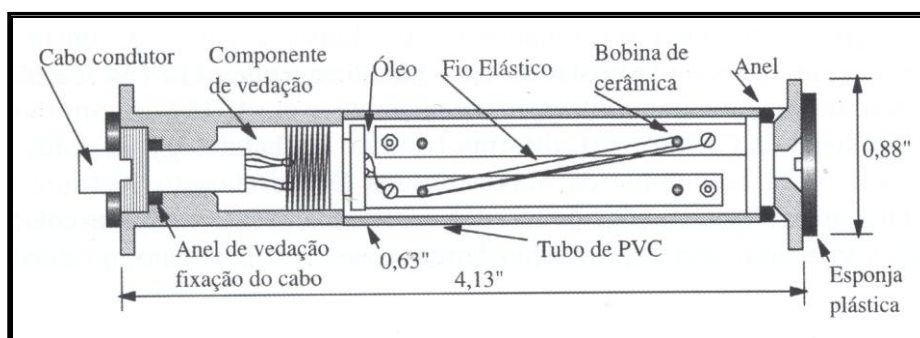


Figura 36 - Sequência de preparação do corpo de prova para determinação da retração autógena: a) desmoldagem do corpo de prova, b) corpo de prova desmoldado, c) selagem com filme plástico em 03 camadas, d) corpo de prova selado com o filme plástico, e) envolvimento com a fita de alumínio e f) corpo de prova completamente selado pronto para a continuação do ensaio de retração autógena.

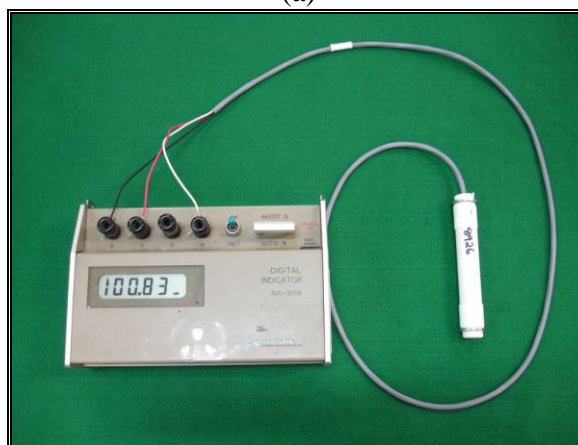
4.8.1.1 Extensômetro elétrico de resistência tipo Carlson

Para todas as determinações de deformação realizadas nesta pesquisa utilizou-se o extensômetro elétrico de resistência tipo Carlson. O princípio de funcionamento desses extensômetros se baseia na propriedade que os materiais condutores apresentam de transformar pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes na sua resistência elétrica; apresentam dois princípios eletromecânicos distintos: o da variação da tensão em um fio que provoca alteração da resistência elétrica e o da variação da temperatura.

O extensômetro elétrico resistivo tipo Carlson é constituído por um tubo de latão (ou liga semelhante) com forma de cilindro alongado (Figura 376a), fechado nos dois extremos por dois flanges, que fazem a sua ancoragem no concreto que o envolve. A deformação da peça é aplicada ao extensômetro nas suas extremidades e transferida mecanicamente aos elementos sensíveis, que são dois enrolamentos de fio de aço esticados, de comprimentos e resistências iguais. O extensômetro funciona também como termômetro. A descrição e modo de funcionamento detalhados são obtidos em Pacelli et al. (1997). Há vários modelos desses medidores de deformação com dimensões variáveis, permitindo dessa forma sua utilização em estruturas reais ou em laboratório. Nessa pesquisa, foram utilizados os extensômetros modelo M4 (Figura 37).



(a)



(b)

Figura 37 - Extensômetro elétrico tipo Carlson: a) representação esquemática, b) extensômetro modelo M4 e a ponte de leitura.

Para as leituras dos extensômetros Carlson foi utilizada uma ponte Wheatstone digital, cujo circuito se destina à medição de resistências elétricas. A deformação unitária real, medida pelos extensômetros, é dada pela Equação 7.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_a + \varepsilon_t$$

Equação 7

Onde:

 ε_r = deformação unitária real Δt = variação da temperatura, $\beta \Delta R_t$ ε_a = deformação unitária aparente, $\theta(\Delta R_1/R_2)$ ΔR_t = variação da resistência total ε_t = deformação unitária devido à temperatura, $-\alpha \Delta t$ θ , β , e R_t = constantes do extensômetro $\Delta R_1/R_2$ = variação da relação das resistências

4.9 UMIDADE RELATIVA INTERNA

A umidade relativa interna dos concretos foi determinada no laboratório – LABEST - da COPPE/UFRJ, empregando-se um equipamento eletrônico (sonda), comercialmente disponível para medidas de umidade relativa do ar, que dispõe de sensores independentes de temperatura (NTC – negative thermo couple) e umidade (capacitivo). Este equipamento foi adaptado para uso em concreto por Fonseca Silva (2007), que descreve resumidamente o princípio de funcionamento do sensor capacitivo: “a variação da quantidade de água evaporável de um material é dada por uma variação da capacidade entre dois eletrodos implantados dentro do material, que modifica a frequência de ressonância de um oscilador, ligado a esses eletrodos. Os dispositivos eletrônicos ficam dentro de um cilindro, em aço inoxidável, com diâmetro externo de 12 mm e comprimento de 160 mm. Os sinais elétricos recebidos pelos sensores são convertidos digitalmente para indicação da grandeza física e armazenados num sistema de aquisição de dados (*data logger*), ligado por uma conexão serial, com entradas para 9 sondas, monitoradas simultaneamente. O sistema permite a aquisição automática dos dados”.

Na extremidade do equipamento (Figura 38), onde estão localizados os sensores, é rosqueada uma cápsula protetora, com mesmo diâmetro do equipamento (12 mm) e comprimento igual à 33 mm, com trechos vazados, revestida originalmente por um filtro de papel. Para o ensaio no concreto, o filtro de papel que reveste a cápsula foi substituído por uma malha metálica de 100 μm , para proteger contra partículas sólidas.

A redução da umidade relativa interna (autodessecação) neste estudo foi medida para o concreto referência da classe C60 (C60_0) e para a mistura com 2% de ARR (C60_2). Foram moldados 02 corpos de prova prismáticos para cada tipo de concreto, provenientes de uma mesma betonada, conforme ensaio de retração autógena (sem extensômetro). Imediatamente após moldagem, os corpos de prova foram selados com 03 camadas de filme plástico e com fita de alumínio adesiva. Uma vez que o corpo de prova selado está impedido de trocar água com o meio exterior, a sonda possibilita medir a redução da quantidade de água evaporável, ocasionada pela hidratação do cimento.

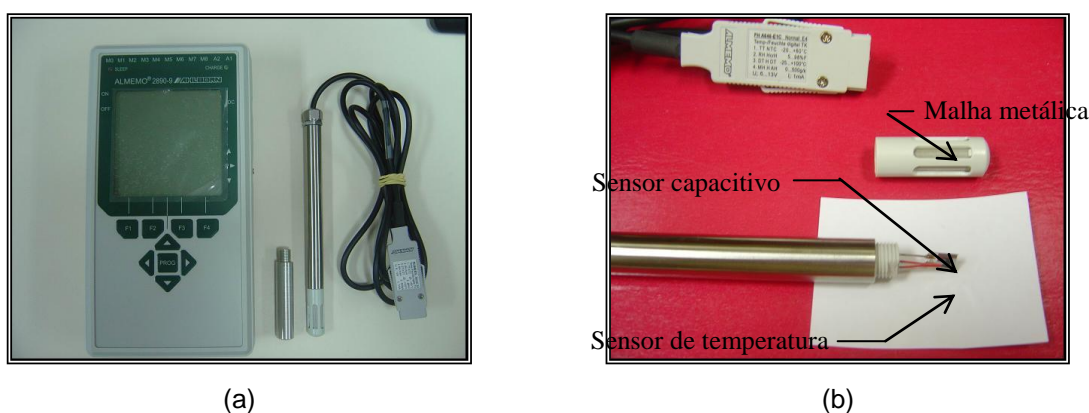


Figura 38 - (a) Sistema para aquisição automática da UR com *datalogger* e (b) detalhe dos sensores de umidade (capacitivo) e de temperatura (NTC)

Após moldagem e selagem do corpo de prova, introduzia-se no concreto fresco, até a meia altura da forma (centro do corpo de prova) um cilindro de aço inox, com diâmetro igual ao sensor, envolvido com filme plástico. Para evitar perda de umidade, era feita a vedação com silicone ao redor do cilindro. Após aproximadamente 1h da moldagem, retirava-se o cilindro de aço inox e introduzia-se o sensor com a cápsula de malha metálica; em seguida, ocorria a vedação com silicone no entorno do orifício do sensor. Dava-se, então, início às leituras de umidade relativa interna, obtidas por meio de um *datalogger*, a cada 5 min. As Figuras 39 e 40 apresentam um panorama do ensaio.



Figura 39 - Sensores introduzidos nos concretos selados com filme plástico e fita de alumínio.



Figura 40 - Sensores acoplados ao sistema de aquisição de temperatura e umidade.

4.10 RETRAÇÃO POR SECAGEM

O ensaio de retração por secagem foi realizado conforme ASTM C 157 (1991) com modificação e instrução de trabalho de FURNAS, IT.DCT.TC.308 (2009). Para cada concreto estudado foram moldados 02 corpos de prova prismáticos de dimensões 10x10x30 cm, instrumentados com extensômetros elétricos tipo Carlson. A Figura 41a mostra a primeira fase do ensaio, os primeiros 28 dias dos corpos de prova em condição submersa em água com cal e a Figura 41b, em período de determinação da secagem, armazenados em sala climatizada.



(a)



(b)

Figura 41 - Retração por secagem: a) corpos de prova em água saturada com cal e b) corpos de prova estocados em sala climatizada.

4.11 PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO

Os ensaios realizados para a determinação das propriedades do concreto endurecido foram resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e fluência. Na Tabela 11 está apresentado o planejamento destes ensaios para o estudo.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas, elásticas e viscoelástica: planejamento dos ensaios

Propriedade	Idades de ensaio (dias)	Dimensão dos corpos de prova (cm)	Nº de corpos-de prova por idade
Resistência à compressão	1, 3, 7, 28, 90 e 180	10x20	03 a 04
Resistência à tração por compressão diametral	1, 3, 7, 28, 90 e 180	10x20	03 a 04
Resistência à tração na flexão	3, 7, 28, 90 e 180	10x10x40	02 a 04
Módulo de elasticidade	1, 3, 7, 28, 90 e 180	10x20	03
Fluência	7 e 28	15x30	02

4.11.1 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em corpos de prova cilíndricos 10x20 cm, de acordo a norma brasileira ABNT NBR 5739:2007. Os corpos de prova tiveram seu topo e base retificados (Figura 42a e 42b). Em razão de estes concretos apresentarem um modo de ruptura frágil, os corpos de prova, antes do ensaio, eram envoltos com filme plástico (Figura 42c) para segurança do operador.

O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaio eletromecânica, microprocessada com capacidade máxima de 1000 kN; a medição da força foi efetuada com auxílio de uma célula de carga com indicação digital e os carregamentos e descarregamentos foram controlados pelo software, sem interferência do operador.

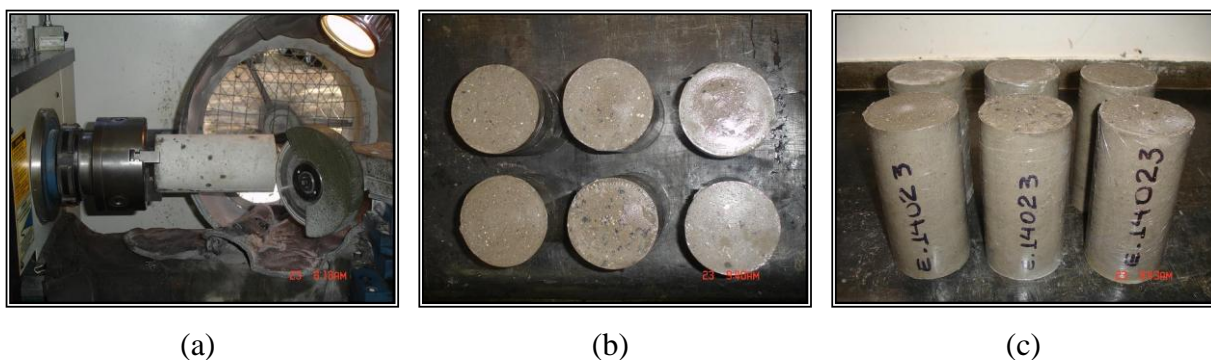


Figura 42 - Resistência à compressão: preparação dos corpos de prova – a) retífica, b) topos retificados e c) envoltos com filme plástico.

4.11.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado conforme a norma Argamassa e Concreto – Determinação da tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos, ABNT NBR 7222:1994, que consiste na aplicação de uma força com velocidade controlada – $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s - no sentido radial até a ruptura do corpo de prova. Foi empregada máquina de ensaio eletromecânica, microprocessada com capacidade máxima de 300 kN, com medição da força através de célula de carga com indicação digital. Os carregamentos e descarregamentos são controlados por *software* sem interferência do operador.

4.11.3 Resistência à tração na flexão

A determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos ocorreu de acordo com a norma ABNT NBR 12142:1991, que consiste na aplicação de uma força com velocidade controlada – $(1,0 \pm 0,1)$ MPa/min – em um corpo de prova prismático apoiado no dispositivo de flexão composto por quatro apoios (Figura 43a). A distância dos apoios da base corresponde a três vezes a dimensão da aresta. Os apoios superiores são posicionados de forma que a ruptura ocorra no terço médio do corpo de prova (Figura 43b). A máquina utilizada no ensaio é a mesma do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

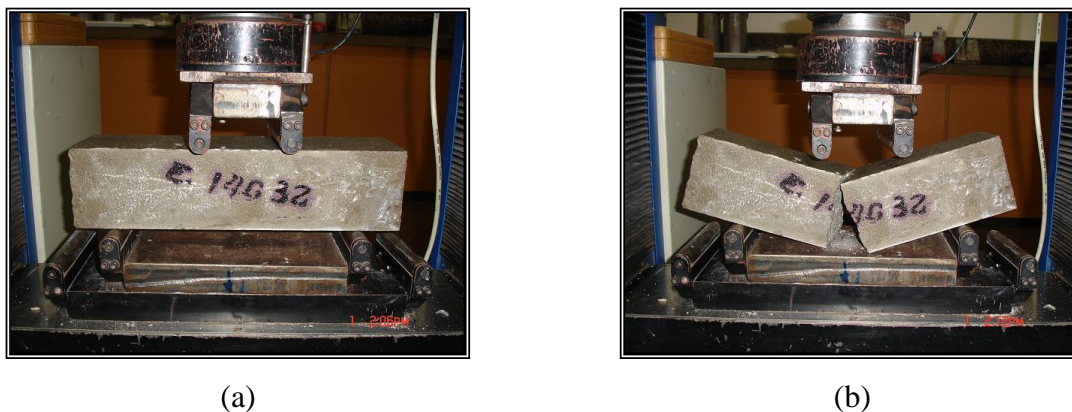


Figura 43 - Ensaio de resistência à tração na flexão: a) ensaio e b) ruptura.

4.11.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, em GPa, é a razão entre a tensão e a deformação específica e indica o nível de rigidez do corpo de prova à deformação proporcionada por um esforço de compressão. O ensaio de módulo de elasticidade secante do concreto foi realizado conforme a norma ABNT NBR 8522:2008 – Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, segundo a qual o corpo de prova é submetido à aplicação de quatro carregamentos compreendidos entre a tensão de 0,5 MPa (limite inferior) e a tensão correspondente a 30% da tensão máxima obtida no ensaio de resistência à compressão (limite superior). Nesse intervalo são medidas as deformações por meio de um extensômetro elétrico, com sensores independentes dispostos em cada lado do corpo de prova, com resolução de 0,0001 mm (Figura 44). A máquina de ensaio utilizada é eletromecânica, microprocessada, com capacidade máxima de 1000 kN; medição da força através de célula de carga com indicação digital. Os carregamentos e descarregamentos são controlados por *software*, sem interferência do operador. Os corpos de prova para o ensaio de módulo de elasticidade tiveram seu topos retificados assim como aqueles destinados ao ensaio de resistência à compressão.

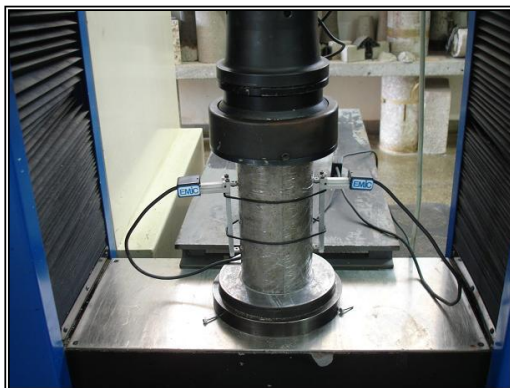


Figura 44 - Ensaio de módulo de elasticidade.

4.11.5 Fluência

A fluência do concreto ou deformação lenta pode ser definida como o aumento gradual da deformação sob carga mantida ao longo do tempo (NEVILLE, 1997).

O ensaio foi realizado em corpos de prova selados, com dimensões de 15x30 cm, instrumentados com extensômetros elétricos, tipo Carlson, embutidos no concreto, para as classes C60 e C80. Não foi determinada fluência para os concretos de classe C40.

Inicialmente planejou-se medir a fluência dos concretos nas idades 1, 3, 7 e 28 dias, para as duas classes de concreto, com enfoque às três primeiras idades, por se ter em tais idades uma parcela bastante expressiva da fluência. Entretanto, por ser um ensaio de longa duração, mas principalmente em razão da programação existente no laboratório, ficou inviável a realização dos ensaios nas idades de 1 e 3 dias. Assim, a fluência foi medida para os concretos classe C60 na idade de 7 dias e para o concreto classe C80, nas idades de 7 e 28 dias.

O ensaio de fluência consiste basicamente, depois de moldado corpos de prova com dimensões em função do diâmetro máximo do agregado e mantido em cura úmida até a idade de ensaio, colocá-lo em uma prensa com um carregamento pré-estabelecido em função da resistência do concreto. Os corpos de prova são envolvidos com uma película plástica e borracha para evitar que haja perda substancial de umidade interna do concreto. A carga é aplicada gradativamente para que não haja problemas de impacto até o valor estipulado de tensão, que é função de um percentual (30% a 40%) da resistência à compressão, dependendo da dimensão do corpo de prova. Para os ensaios deste trabalho, a carga aplicada equivaleu a

40% da resistência à compressão. A partir daí começa-se a efetuar leituras da deformação sempre com o carregamento constante em função da carga aplicada inicialmente ao ensaio.

A duração do ensaio de fluência é de 90 dias, após iniciada a aplicação da carga, onde as leituras de deformação e temperatura são realizadas em intervalos cada vez maiores com o passar do tempo de ensaio em função da tendência de estabilização das deformações. É realizada leitura simultânea de temperatura para correção do efeito das deformações de origem térmicas. As condições ambientais são controladas com $50\% \pm 5\%$ de umidade relativa e temperatura ambiente de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

4.12 PROPRIEDADES LIGADAS À DURABILIDADE DOS CONCRETOS

Além das propriedades mecânicas, elásticas e viscoelástica, estudou-se nesta fase do trabalho a influência do aditivo redutor de retração (ARR) nas propriedades ligadas à durabilidade dos concretos. Para tanto, os concretos foram submetidos aos ensaios de penetrabilidade por cloretos, carbonatação natural, permeabilidade à água, absorção por capilaridade e por imersão. O planejamento dos ensaios está apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Verificação da durabilidade: planejamento dos ensaios

Ensaio	Idades de ensaio	Dimensão dos corpos de prova (cm)	Nº de corpos-de prova por idade
Penetrabilidade a íons cloretos	90 dias	10x5	03 a 06
Permeabilidade à água	60 dias	15x30	03
Carbonatação natural	18, 24, 36 meses	10x10x40	02
Absorção por capilaridade	28 dias	10x20	03
Absorção por imersão	28 dias	10x20	03

4.12.1 Penetrabilidade a íons cloretos

O ensaio para determinação da penetrabilidade de íons cloretos, cuja sequência é mostrada na Figura 45, foi realizado segundo o prescrito na ASTM C 1202: 1992 (ASTM, 2000), para

todos os concretos estudados na idade de 90 dias. Os corpos de prova cilíndricos 10x20 cm, 03 de cada concreto, foram cortados em fatias, desprezando-se 3 cm de cada topo, de forma que para cada concreto foram ensaiados 03 corpos de prova nas dimensões de 10 cm de diâmetro por 5 cm de espessura. Estes corpos de prova foram preparados para os ensaios, iniciando pela selagem lateral com resina epóxica; após secagem da resina, as amostras foram submetidas a vácuo por 4 h, sendo que decorridas 3 h, as amostras foram submersas em água deaerada, permanecendo nessa condição por 19 h, para, então, serem coladas às semicélulas de acrílico por meio de borracha de silicone.

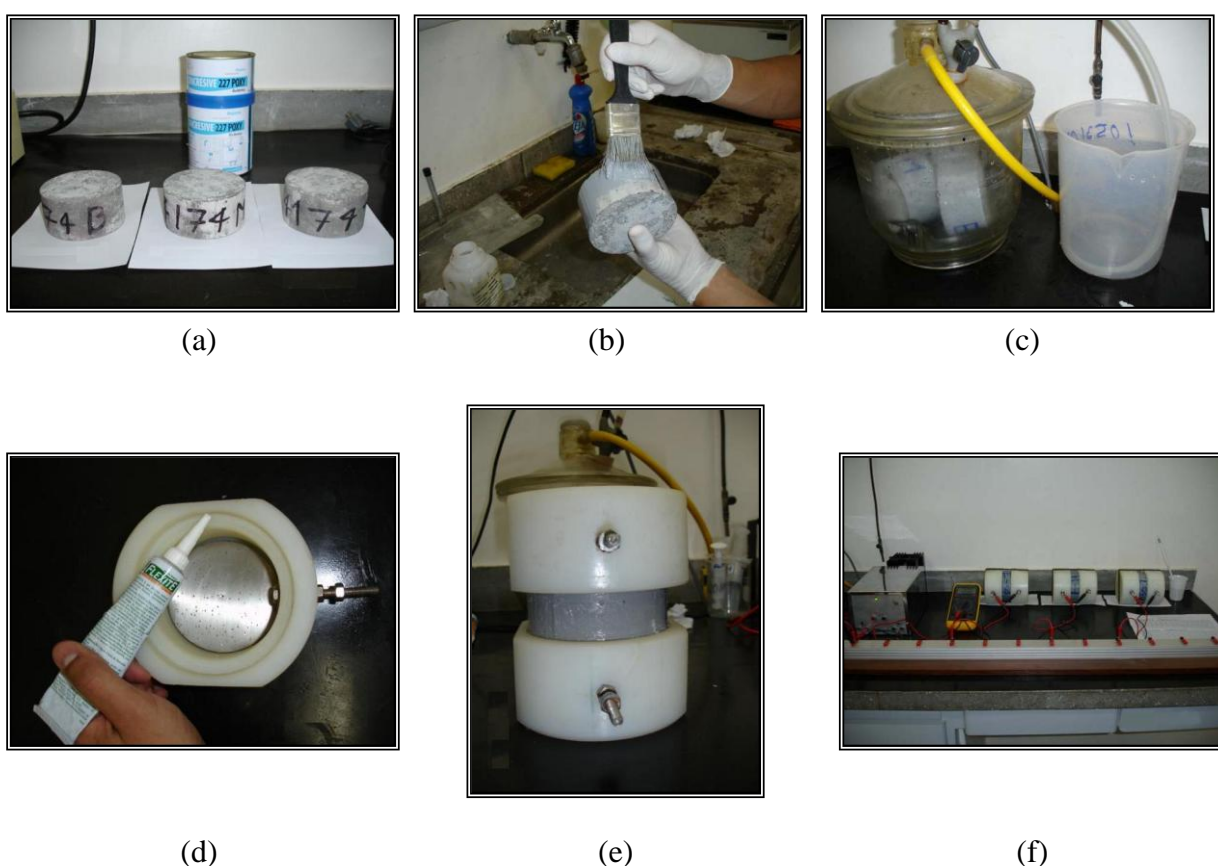


Figura 45 - Ensaio de penetrabilidade a íons cloretos: a) amostras, b) selagem com epóxi, c) saturação à vácuo, d) colagem com silicone, e) célula pronta e f) vista geral do ensaio.

Em seguida, o corpo de prova foi colocado entre as duas semicélulas de acrílico, uma contendo solução de hidróxido de sódio a 0,3 N e a outra contendo solução de cloreto de sódio a 3% de concentração em massa. O conjunto formado pelo corpo de prova e as semicélulas constituem a célula de penetração de cloretos.

Entre as semicélulas foi gerada uma diferença de potencial de 60 V (corrente contínua), dando origem a uma corrente elétrica que induziu o ânion cloreto a migrar através do concreto. O ensaio teve duração de 6 h e a corrente elétrica passante foi registrada em intervalos de 30 min. O somatório do produto da corrente pelo tempo é a carga total, em Coloumb, que atravessa o corpo de prova. Este resultado representa a maior ou menor resistência do concreto à penetração de íons cloretos. Os ensaios foram realizados em sala climatizada com temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(55 \pm 5)\%$. Para a leitura de valores da corrente empregou-se um multímetro com resolução de miliampère.

4.12.2 Permeabilidade à água

A permeabilidade, conceitualmente, se refere à *facilidade de deslocamento de um fluido através de um material sob um gradiente de pressão*, mas de forma genérica, a permeabilidade pode ser definida como a maior ou menor facilidade de um fluido escoar através de um meio poroso (NEVILLE, 1997).

O método adotado na pesquisa para a determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto foi através da percolação da água sob pressão, conforme a norma ABNT NBR 10786/89, baseada nas orientações do Bureau of Reclamation. O ensaio utiliza 03 corpos de prova cilíndricos, de relação altura/diâmetro igual a 1 (um). Cada corpo de prova é assentado numa campânula (cilindro de aço), onde é colocada uma mistura de asfalto/breu no espaço entre a superfície lateral do corpo de prova e a do cilindro de aço, com a finalidade de vedar as laterais, para que a água passe obrigatoriamente através do corpo de prova. Antes do fechamento da campânula são colocadas, sobre a face superior do corpo de prova, uma manta de algodão e duas camadas de cascalho, com granulometrias diferentes, cujo objetivo é de distribuir o fluxo de água uniformemente. Após esse processo, a campânula é fechada e instalada no permeâmetro, sendo então aplicada pressão de forma progressiva, iniciando com 0,7 MPa, após 3 h aplica-se 1,4 MPa, e finalmente decorridas mais 3 h, 2,1 MPa, que permanece até o fim do ensaio. O ensaio tem duração mínima de 500 horas com registro de leituras diárias.

O coeficiente de permeabilidade é obtido a partir da Lei de Darcy (fluxo laminar, estacionário e não-turbulento através de um meio poroso), conforme Equação 8, medindo-se a quantidade de água que atravessa o corpo de prova de seção transversal (A), durante um intervalo de

tempo (t). A vazão Q (cm^3/h) é obtida através da divisão do volume de água pelo tempo decorrido entre as leituras. Na Figura 46 é possível observar a sequência de montagem do ensaio.

$$\frac{dq}{dt} = K \cdot \frac{\Delta H \cdot A}{L \cdot \mu} \quad \text{Equação 8}$$

Onde,

dq/dt : velocidade de escoamento da água

K : coeficiente de permeabilidade do fluido

ΔH : gradiente de pressão

A : área da superfície por onde penetra o fluido

L : espessura do elemento

μ : viscosidade do fluido

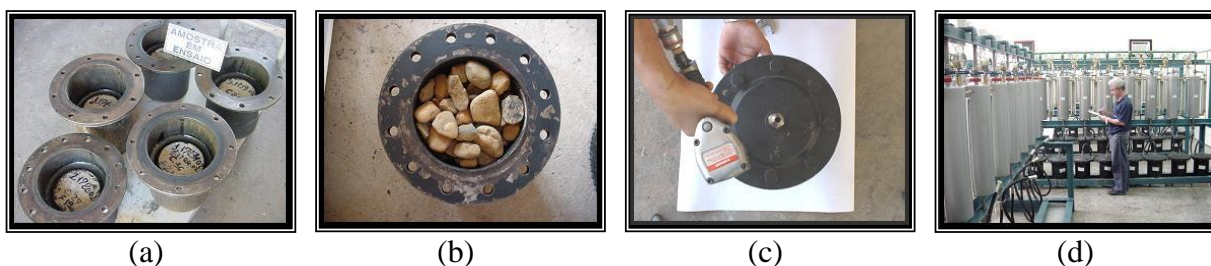


Figura 46 - Ensaio de permeabilidade á água sob pressão: a) corpos de prova na campânula, b) Seixo colocado sobre o filtro, de modo a distribuir e orientar o fluxo de água, c) fechamento da campânula e d) disposição geral dos permeâmetros.

4.12.3 Ensaio de carbonatação do concreto ao natural

A carbonatação é um fenômeno físico-químico oriundo das reações dos gases ácidos do ambiente com os produtos alcalinos - hidróxido de cálcio (CaOH_2), hidróxido de sódio (NaOH_2) e hidróxido de potássio – dissolvidos ou precipitados na pasta de cimento endurecida. Tal fenômeno e sua influência no processo de corrosão das armaduras são continuamente objeto de estudo devido aos efeitos desfavoráveis sobre a durabilidade das estruturas de concreto armado.

O ensaio de carbonatação ao natural ou não acelerado baseia-se na exposição de amostras de concreto em ambiente de degradação natural, conforme o uso a que se destina, protegido ou não das intempéries. Neste trabalho, os corpos de prova, após 07 dias de cura úmida, foram colocados em condições naturais de exposição, protegidos das intempéries, submetidos às seguintes condições ambientais: atmosfera urbana, pouco poluída, baixa umidade do ar e temperaturas elevadas por quase todo o ano. Após 18, 24, 36 meses de exposição, foram determinadas as profundidades médias de carbonatação de cada concreto. Para tanto, foram realizadas medidas de profundidade de carbonatação em amostras cortadas dos prismas de concreto (10x10x40 cm), após aspersão de solução de fenolftaleína a 1%, utilizando-se um paquímetro digital calibrado, conforme Figura 47 a seguir.



Figura 47 – Determinação da profundidade de carbonatação com paquímetro digital, após aplicação do indicador de fenolftaleína no concreto.

4.12.4 Absorção por Capilaridade

A absorção capilar ocorre quando há a penetração de líquidos no concreto devido à tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto. Os fatores que influenciam nesse mecanismo são as características do líquido, como viscosidade, densidade e tensão superficial e as características do sólido: estrutura dos poros (raio, tortuosidade e continuidade dos capilares), energia superficial e teor de umidade.

O ensaio de absorção por capilaridade baseou-se na norma NBR 9779 (1995), que prescreve a absorção de água através da ascensão capilar, sendo utilizados corpos de prova cilíndricos de

concreto. Esse ensaio consiste na secagem dos corpos de prova em estufa ventilada a $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 72 dias. Após esta etapa, os corpos de prova são pesados e colocados em contato com uma lâmina d'água de 5 mm por 72 h. É determinada a massa total dos corpos de prova nas idades de 3, 6, 24, 48 e 72 h. O resultado é expresso na massa de água absorvida por área de contato do corpo de prova. A Figura 48 mostra as etapas do ensaio.

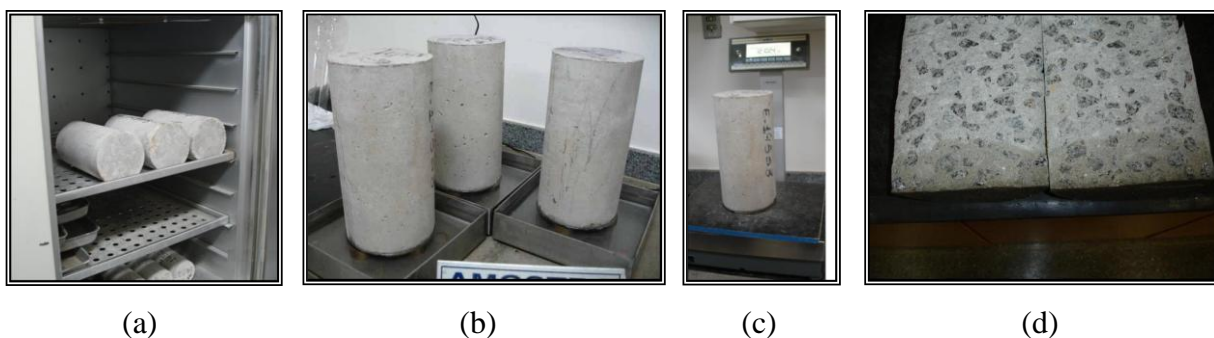


Figura 48 - Ensaio de absorção por capilaridade: a) secagem em estufa, b) corpos de prova sobre lâmina d'água, c) pesagem e d) corpo de prova rompido, mostrando a ascensão capilar da água.

4.12.5 Absorção por Imersão

O ensaio de absorção por imersão dá um indicativo de volume de poros e nada tem a ver com a facilidade de um líquido penetrar no concreto, segundo Neville (1997). A ideia nesse ensaio é verificar se o aditivo redutor de retração, de alguma forma, altera o volume de poros. Assim, a absorção de água por imersão foi determinada conforme recomendações da norma NBR 9778 (2005), que prescreve a secagem dos corpos de prova em estufa ($105\pm 5^{\circ}\text{C}$) até massa constante, imersão em água por 72 h e fervura por mais 5 h. O resultado é expresso em porcentagem de água absorvida. A Figura 49 mostra algumas etapas do ensaio.

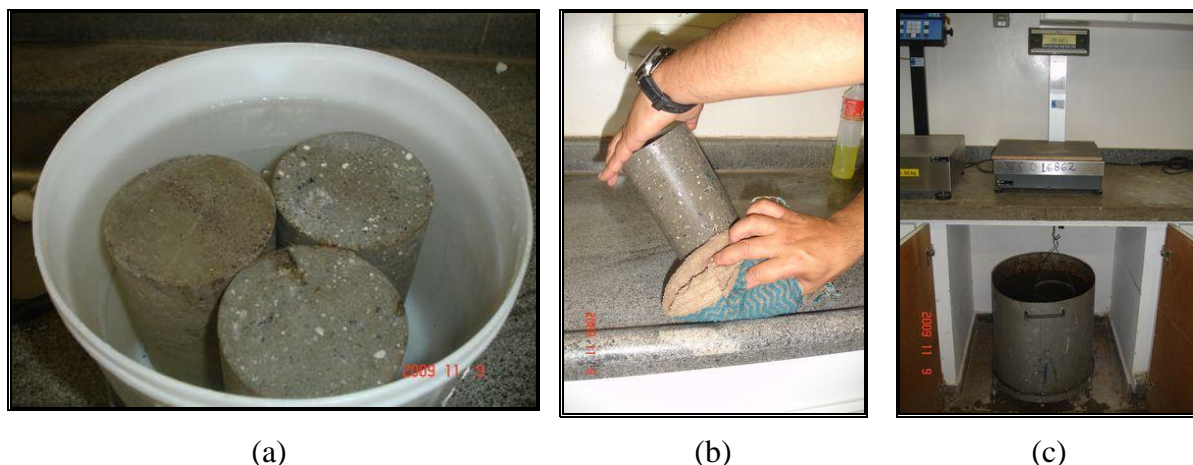


Figura 49 - Ensaio de absorção por imersão: a) corpos de prova imersos, b) secagem do corpo de prova para pesagem em condição sss e c) pesagem imersa.

4.13 ESTUDO DA MICROESTRUTURA

Com vistas ao entendimento da influência do aditivo redutor de retração na microestrutura da e no processo de hidratação da pasta de cimento, as amostras de pastas foram submetidas aos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura, nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias e análise termogravimétrica nas idades de 1, 3, 7, 28 e 90 dias.

Os ensaios de porosimetria foram realizados em duplicata, o que permitiu a análise estatística por análise de variância (ANOVA). Já a difração de raios X, a termogravimetria e microscopia eletrônica de varredura foram feitas em apenas uma amostra por situação estudada face à dificuldade em compatibilizar repetições com a programação do laboratório. Soma-se a isso, o fato de que por exemplo, para a termogravimetria, há registros de baixa variabilidade na técnica (BERTIOLI, 2007 *apud* QUARCIONI, 2008).

4.13.1 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosimetria por intrusão de mercúrio é o método mais utilizado para a caracterização da porosidade de pastas de cimento, argamassas e concretos, e tem por princípio o fato de que a penetração em poros do material, de um líquido não molhante, líquido cujo ângulo de contato θ é tal que $\pi/2 < \theta \leq \pi$, requer a aplicação de uma pressão hidrostática positiva. O método consiste em determinar o espectro de dimensões de poros de um material, injetando-se

mercúrio sob pressão crescente na amostra previamente seca e submetida a vácuo e medindo-se o volume do líquido penetrante em função da pressão aplicada. A técnica se baseia na relação entre o diâmetro de poro, assumido como sendo cilíndrico, e o volume de mercúrio que pode penetrá-lo em função da pressão aplicada. A equação de Washburn, Equação 9, relaciona a pressão de intrusão com o raio do poro que é intrudido pelo mercúrio naquela pressão (P).

$$r = \frac{-2\gamma \cos\theta}{P} \quad \text{Equação 9}$$

Onde,

r: raio do poro

γ : tensão superficial do líquido, sendo igual a $485 \cdot 10^{-3}$ N/m

θ : ângulo de contato entre o líquido e a superfície

P: pressão hidrostática da coluna de mercúrio na cápsula da amostra, em MPa

As pastas foram moldadas em barras prismáticas, que permaneceram em câmara úmida (UR 100%) até a idade estabelecida para a interrupção da hidratação (1,3, 7 e 28 dias). Em cada idade as amostras, fraturadas do núcleo dos corpos de prova (barras), foram retiradas da câmara úmida, imersas em acetona por 24 h, para paralisação da hidratação, depois colocadas em estufa, a 60° C por 12 horas (procedimento similar foi utilizado por LOUKILI et al., 1999), de onde foram retiradas e armazenadas em sacos plásticos com sílica gel para evitar umidade e cal sodada para evitar carbonatação - até a realização do ensaio, na Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP.

A massa aproximada de cada amostra fragmentada variou entre 1,5 e 2 g e foram ensaiadas no equipamento modelo Autopore II 9220 V3.06, capaz de aplicar uma pressão máxima de intrusão de 445 MPa, com os seguintes parâmetros de ensaios: ângulo de contato entre o mercúrio e o sólido igual a 130°, 13,5335 g/ml de densidade do mercúrio, tensão superficial do mercúrio de 985 dyn/cm.

De uma forma geral, a literatura (SILVA, 2001, entre outros) aponta duas principais críticas ao método: i) suposição de que os poros têm formato cilíndrico, sendo o que é determinado é o diâmetro da entrada do poro, e não o diâmetro do poro propriamente dito, que pode ser várias vezes maior e ii) altas pressões do mercúrio para entrada no poro danifica a estrutura

porosa da amostra, falseando os resultados. Todavia, embora a porosimetria por intrusão de mercúrio não represente fielmente a estrutura porosa dos materiais cimentícios, os resultados podem ser indiretamente relacionados à mesma, sendo um bom parâmetro para caracterização detalhada da microestrutura no que se refere à porosidade, além do que é possível análises comparativas entre diversas amostras, das quais se obtêm as características das estrutura de poros.

4.13.2 Análise termogravimétrica - ATG

De uma forma geral, a análise térmica tem por objetivo verificar o comportamento dos materiais quando submetidos ao aquecimento. No caso de estudos de materiais cimentícios, a análise termogravimétrica têm tido vasta aplicação. A análise por termogravimetria é uma técnica empregada para a determinação de variação de massa de uma amostra, resultante de um transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação) em função da temperatura ou do tempo, quando submetida a um aquecimento controlado. Basicamente, o equipamento consiste em uma microbalança acoplada a um forno resistivo. O material é caracterizado por meio da curva termogravimétrica, que relaciona temperatura com perda de massa no tempo, nesta pesquisa denominada *curva TG*, que dá informações sobre a estabilidade térmica da amostra, velocidades de reação e composição. A partir da curva TG, obtém-se a *curva DTG*, que é a derivada da curva TG em relação à temperatura, que possibilita determinar as temperaturas limites das reações (temperatura inicial e final), além de indicar a ocorrência de reações sobrepostas na mesma faixa de temperatura.

As pastas foram moldadas em barras prismáticas que permaneceram em câmara úmida (UR 100%) até a idade estabelecida para a interrupção da hidratação (1,3, 7, 28 e 90 dias). Em cada idade, as amostras foram retiradas do núcleo das barras, imersas em acetona por 24 h, para paralisação da hidratação, depois armazenadas em sacos plásticos com cal sodada – para evitar carbonatação, então encaminhadas para o Laboratório da COPPE/UFRJ, onde a análise térmica foi realizada. As análises foram feitas em amostras em torno de 10 mg das pastas P80 e P60, nas condições de referência (sem ARR), com 1 e 2% de ARR nas idades acima indicadas. Ensaio-se uma única amostra por idade para cada condição de pasta, dado o baixo coeficiente de variação que caracteriza a técnica, em torno de 0,5%, conforme indicado por Bertoli (2007) *apud* Quarcioni (2008), além da grande demanda por este ensaio no

Laboratório, o que também dificultava o ensaio, no mínimo em duplicata, no prazo que se pretendia.

As curvas de termogravimetria - TG e termogravimetria derivada -DTG foram obtidas do equipamento SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo da TA Instruments, a um taxa de aquecimento de 10,0°C/min até a temperatura máxima de 1000° C, sendo o cadinho de referência de platina. Como o início da desidratação do silicato de cálcio hidratado inicia-se a partir de 50°C na ausência de água livre, as amostras foram submetidas a uma temperatura de 35°C antes do início da análise, para eliminar o excesso de água livre, dessa forma pode-se determinar o teor de água quimicamente combinada de todos os hidratos no intervalo de temperatura entre 50°C e a temperatura final relativa à perda de água combinada do hidróxido de cálcio, de acordo com Dweck et al. (2000).

Os dados foram plotados pelo software do aparelho na forma de gráfico cujos pontos das curvas são obtidos em relação à massa inicial da amostra. Nos gráficos são registrados os pontos onde ocorreram as perdas de massa, identificadas pelos picos obtidos pela curva da DTG.

A retração autógena e as reações de hidratação estão intimamente ligadas e o emprego das análises térmicas mostra-se útil no entendimento do fenômeno (LOUKILI et al., 1999; MELO NETO, 2008;). Dessa forma, a termogravimetria foi definida como indispensável para o estudo do comportamento do aditivo redutor de retração, do ponto de vista da microestrutura, em conjunto com as demais técnicas analíticas empregadas. A partir da caracterização das curvas de TG foram determinadas as variações de massa decorrentes das reações químicas e físicas, enquanto a delimitação dos intervalos de temperatura (inicial e final) das reações foi feita a partir da curva de DTG, que permite uma definição mais precisa dos limites de reação. As faixas de temperatura analisadas, correspondentes às transformações térmicas dos principais produtos hidratados para o cimento Portland, conforme estabelecido por Taylor (1997), foram:

- de 50°C a 245°C que correspondem ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H), gipsita e ao trissulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt), com pico referente na curva DTG entre 103 e 113°C. A transformação térmica desses produtos abrange toda essa faixa de temperatura e conseqüentemente, as reações se sobrepõem;

- 175 °C corresponde à desidratação dos aluminatos de cálcio hidratado (C_4AH_{13} ou C_2AH_8); portanto, se presente, tem o pico da curva DTG coincidente com o do C-S-H;
- de 50 °C aos 600 °C, corresponde ao monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm). Essa reação é mais lenta que as duas anteriores, dando-se a maior parte na faixa de até 200 °C, sendo o pico da curva DTG em torno de 195 °C;
- de 400 °C a 500°C, corresponde ao hidróxido de cálcio (CH), fase de hidratação do C_3S e do C_2S ;
- acima de 600°C, decompõe-se o carbonato, proveniente do fíler calcário do cimento, do agregado calcário ou por carbonatação da amostra exposta ao ambiente. Quando há carbonatação ambiente, a calcita está mal cristalizada e a curva apresenta um pico da curva DTG menor, próximo e anterior ao da calcita natural.

4.13.3 Difração de raios X

A difração de raios-X (DRX) representa o fenômeno de interação entre o feixe de raios-X incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material, relacionado ao espalhamento coerente. A técnica consiste na incidência da radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados, que constituem o feixe difratado. Em um material onde os átomos estejam arranjados periodicamente no espaço, característica das estruturas cristalinas, o fenômeno da difração de raios-X ocorre nas direções de espalhamento que satisfazem a Lei de Bragg (Equação 10).

Admitindo que um feixe monocromático de determinado comprimento de onda (λ) incide sobre um cristal a um ângulo θ , chamado de ângulo de Bragg, tem-se:

$$n \lambda = 2d \sin \theta \quad \text{Equação 10}$$

Onde, θ corresponde ao ângulo medido entre o feixe incidente e determinados planos do cristal, “d” é a distância entre os planos de átomos e “n” a ordem de difração.

As intensidades obtidas em ângulos 2θ , representadas através dos picos nos difratogramas, correspondem à difração do feixe incidente por um determinado conjunto de planos do cristal, que possuem mesma distância interplanar. As informações obtidas de cada pico são a

intensidade, a posição angular (2θ) ou distância interplanar (d) e o perfil. Cada composto cristalino apresenta um padrão difratométrico característico, permitindo sua identificação através das posições angulares e intensidades relativas dos picos difratados (GOBBO, 2003). A técnica de difração de raios X permite a determinação da composição mineralógica dos sólidos cristalinos presentes em um material.

A difração de raios X foi empregada para caracterização de fases cristalinas presentes nos produtos de hidratação de pastas, no intuito de se verificar se estas fases sofrem influência dos aditivos redutores de retração. O equipamento utilizado nas análises foi o difratômetro marca Siemens, modelo D5000, do Laboratório de FURNAS. O procedimento de preparo das amostras para a difração é o mesmo feito para a porosimetria (já descrito) até secagem em estufa a 60°C. Após retiradas da estufa é realizada a moagem das amostras em estufa orbital, utilizando o método do pó não orientado. As análises foram feitas sob voltagem 40 kV e amperagem de 40 mA, em sistema $\theta/2\theta$, com velocidade de varredura de 0,05°/seg, de 2° a 70° 2θ . A fonte de energia é um filamento de tungstênio (catodo) e o tubo de raios-X é de cobre (anodo), cujos comprimentos de onda (λ) são: $K\alpha$ 1,5418 Å e $K\beta_1$ 1,3922 Å. As interpretações foram realizadas em computador, acoplado ao difratômetro, utilizando-se software EVA – Diffrac Plus, versão 5 de 1997, com banco de dados de 1998, contendo cerca de 117 mil fichas, entre minerais, cimento e material cerâmico.

4.13.4 Microscopia eletrônica de varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um aparelho que permite a observação e análise da superfície de amostras espessas através de imagens tridimensionais, com a utilização de elétrons secundários; com o emprego de elétrons retroespalhados, observa-se e analisa-se imagens planas com diferenciação de cor de acordo com o número atômico do elemento. A razão principal de sua utilização está associada à alta resolução que pode ser atingida, atualmente da ordem de 300 nm e à grande profundidade de foco, da ordem de 300 vezes melhor que a do microscópio ótico.

O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi o da marca Leica, modelo S440i, de magnificação 5 x a 300.000 x, resolução de 3,5 nm e voltagem de aceleração de 300 V a 30

kV, que é integrado a um espectrofotômetro de raios-X (microanálise semi-quantitativa através da Espectrofotometria por Energia Dispersiva – EDS).

Nas idades de ensaio (1, 3, 7 e 28), as barras prismáticas de pastas de cimento foram retiradas da câmara úmida, e delas extraídas as amostras, que imediatamente foram colocadas em acetona por 24 horas para paralisação da hidratação. Após esse período as amostras foram coladas no porta-amostra de alumínio e já levadas para o processo de metalização com ouro (visando torná-las condutoras e permitir a passagem de elétrons sobre suas superfícies) onde é utilizado vácuo. Depois foram acondicionadas em dessecador à vácuo com sílica gel e cal sodada, a fim de impedir a umidade e carbonatação das amostras, até as análises. Estas amostras não tiveram nenhum tratamento especial para sua análise, apenas sendo removidas as partículas soltas oriundas da quebra do material.

Utilizou-se os elétrons secundários (SE), que são os mais importantes para formação da imagem no MEV, além de fornecer informações topológicas da amostra. Para identificação e quantificação dos elementos químicos presentes no material foram utilizados os raios-X.

4.14 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A fim de se obter uma melhor interpretação dos resultados, com o enfoque de se verificar a influência do aditivo redutor de retração - ARR nas propriedades do concreto, foi realizada a análise estatística do projeto fatorial, que permite tirar conclusões mais gerais, por meio das análises das interações das variáveis estudadas, e não apenas dos efeitos individuais destas.

A análise estatística foi realizada mediante um projeto fatorial, em geral para retração autógena, por secagem, propriedades mecânicas e elásticas, com três fatores em níveis fixos, quais sejam: classe de concreto (relação a/agl), teor do ARR e idade. O modelo estatístico genérico que expressa essa análise é apresentado pela Equação 11, conforme Nanni e Ribeiro, 1987:

$$x_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha\gamma_{ik} + \beta\gamma_{jk} + \alpha\beta\gamma_{ijk} + \epsilon_{ijk} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

μ = média geral;

α_i = influência do fator A, ou seja, efeito da classe de resistência, $i = 1...3$;

β_j = influência do fator B, ou seja, efeito do teor de ARR, $j = 1...3$;

γ_k = influência do fator C, ou seja, efeito da idade, para a retração autógena $k = 1...11$, para a retração por secagem $k = 1...10$ e as propriedades mecânicas e elástica $k = 1..6$;

$\alpha\beta_{ij}$ = influência da interação dos fatores A e B, ou seja, efeito da interação da classe de resistência e teor de ARR;

$\alpha\gamma_{ik}$ = influência da interação dos fatores A e C, ou seja, efeito da interação da classe de resistência e idade;

$\beta\gamma_{jk}$ = influência da interação dos fatores B e C, ou seja, efeito da interação do teor de ARR e idade;

$\alpha\beta\gamma_{ijk}$ = influência da interação de todos os fatores, ou seja, efeito da interação tripla dos fatores;

ϵ_{ijk} = medida do erro experimental, onde $\epsilon_{ijk} \rightarrow N(0, \sigma)$.

Na análise dos resultados de penetrabilidade por cloretos, absorção por imersão e por capilaridade foram empregados projetos fatoriais com apenas dois fatores (classe de resistência e teor de ARR), não sendo considerado o efeito da idade, já que estes ensaios foram feitos em uma só idade. O modelo estatístico genérico que expressa essa análise é similar ao apresentado na Equação 11, com a diferença de não entrar a parcela da idade, isto é, o fator C é excluído, juntamente com suas interações.

A comparação entre as diferentes situações foi feita por análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$), e, em seguida, pelo teste de comparações múltiplas de médias (método de Duncan). A análise de variância baseia-se na relação da variabilidade das médias entre grupos e da variabilidade das observações dentro dos grupos, e na distribuição de Fischer (F). Admitiu-se como hipótese básica a igualdade entre os valores médios das diferentes situações. Os valores calculados de F são comparados com o valor de F tabelado, em função dos graus de liberdade do tratamento avaliado e do resíduo (erro).

Para os testes de significância destes projetos fatoriais realizados por análise de variância (ANOVA), utilizou-se o programa *Statistica 7.0* da Statsoft.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios realizados em concreto e pastas de cimento Portland são apresentados neste capítulo, que está dividido nos subitens 5.1 – Aditivo Redutor de Retração nos Concretos de Cimento Portland, 5.2 – Aditivo Redutor de Retração em Pastas de Cimento Portland – Estudo da Microestrutura. As discussões, aqui também apresentadas, buscam atribuir explicações aos comportamentos observados a partir de ponderações, comparações, informações existentes na literatura consultada e conhecimento desenvolvido ao longo da pesquisa.

O tratamento estatístico dado às principais propriedades utilizou a Análise de Variância (ANOVA) conjuntamente à Comparação Múltipla de Médias (Teste de Duncan), tendo como objetivo verificar a possível influência dos fatores, principalmente quanto ao teor de ARR, nas variáveis de respostas estudadas, bem como de agrupar os fatores, cujas médias não diferem significativamente entre si e separar as que diferem.

5.1 ADITIVO REDUTOR DE RETRAÇÃO NOS CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND

Neste subitem estão apresentados os resultados e discussões acerca dos ensaios realizados nos concretos classes C80 (relação a/agl igual a 0,3), C60 (relação a/agl igual a 0,4) e C40 (relação a/agl igual a 0,63) fabricados com dois teores de aditivo redutor de retração 1 e 2% em relação à massa de cimento.

A influência do ARR no comportamento do concreto é analisada com base nos ensaios abaixo relacionados, cujos principais resultados individuais encontram-se no Apêndice A:

- concreto fresco: abatimento, teor de ar incorporado e determinação do patamar de percolação;
- concreto endurecido: propriedades mecânicas (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e na flexão), elásticas (módulo de elasticidade), viscoelásticas

(fluência), penetrabilidade a íons cloretos, permeabilidade à água, carbonatação natural e absorção capilar e por imersão

5.1.1 Abatimento e Ar incorporado

Na Figura 50 está apresentada a influência do aditivo redutor de retração - ARR no abatimento e no teor de ar incorporado para os concretos estudados.

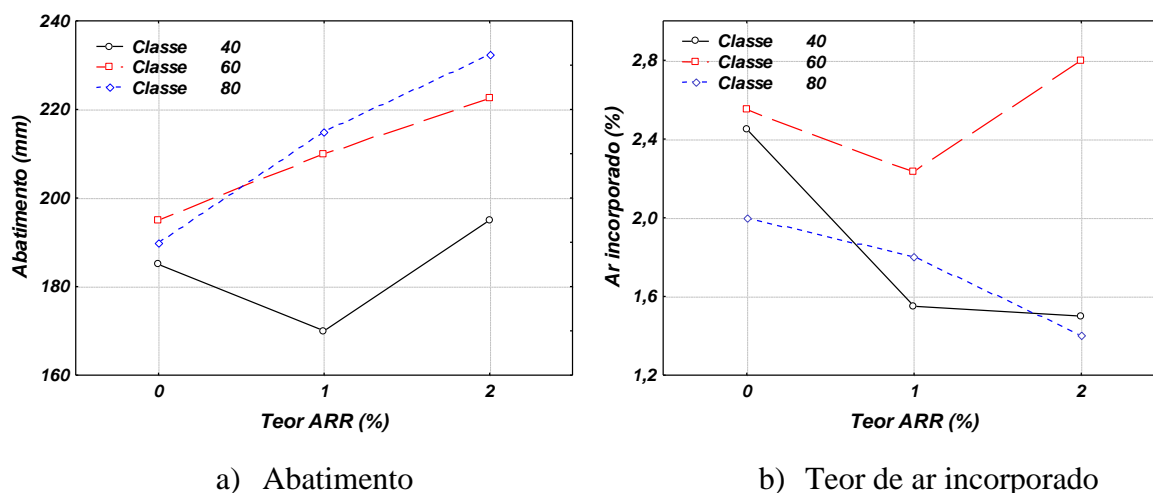


Figura 50 – Influência do ARR no concreto fresco

Um parâmetro balizador definido para as misturas de concreto referência foi o intervalo de *abatimento* igual a 200 ± 20 mm, e conforme pode ser visto na Figura 50a, todos os concretos referência situaram-se dentro do intervalo proposto e apesar do elevado abatimento, os concretos C80 e C60 apresentaram-se coesos e viscosos. Observou-se, entretanto, para estas classes, que à medida que se adicionou o ARR, os abatimentos aumentaram, quando comparados com o de referência (Figura 51).

O concreto classe 40, com relação a/agl igual a 0,63, pertence a extremos da família das classes C80 e C60, e com isso não apresentou aspecto coeso e viscoso, embora o referência tenha atingido o abatimento no intervalo pretendido. É importante esclarecer que, se esta classe de concreto fosse para emprego em uma obra, haveria várias alternativas para ajustá-lo de forma que se tornasse apropriado para aplicação. Entretanto, para efeito desse estudo, não se podia fugir de características e parâmetros já previamente definidos para as demais classes. O de referência apresentou uma leve exsudação. Ao adicionar o ARR, em qualquer dos dois teores, a exsudação foi expressiva, comprometendo o abatimento, com a adição de 1% de ARR (Figura 50a). Embora não tenha sido realizada determinação da perda de abatimento

com o tempo, percebeu-se que os concretos C40, após 30 min (período ainda que se moldavam os corpos de prova) tornaram-se pouco trabalháveis, o que configuraria uma perda rápida de abatimento, diferentemente dos concretos C80 e C60. Uma possível explicação para o comportamento do C40 seja o baixo teor de cimento empregado.



Figura 51 - Aspecto do concreto C80 após abatimento: a) C80_0 e b) C80_2.

Quanto à influência do ARR, conforme visto na revisão bibliográfica, alguns pesquisadores (FONSECA SILVA, 2007, GETTU e RONCERO, 2003) observaram o aumento do abatimento quando incorporado o ARR à mistura. Este comportamento se deve ao fato de não ter se descontado da água da mistura a água do ARR. Segundo estudos de Rixom e Mailvaganam (1999), quando da água da mistura foi abatida a água contida no ARR, a variação no abatimento foi praticamente nula.

A caracterização do ARR utilizado nesta pesquisa detectou que o teor de sólidos é desprezível (Tabela 5, item 4.3.4), mas não contém água livre. De toda forma, a água combinada do aditivo, uma vez não descontada da água da mistura, promoveu um aumento do abatimento dos concretos à medida que se aumentou o teor do aditivo redutor de retração.

Para o *teor de ar* incorporado, observa-se na Figura 51b, de modo geral, uma tendência de diminuição do teor de ar incorporado quando se adiciona o ARR, exceção ao 2% na classe C60. Entretanto, do ponto de vista prático, analisando cada classe de concreto separadamente, verifica-se que a redução em no máximo 1% de teor de ar não foi relevante a ponto de afetar a resistência à compressão. Conforme os estudos de Rixom e Mailvaganam (1999), o ARR afeta o teor de ar do concreto quando combinado com aditivo incorporador de ar e recomenda que dosagem deste aditivo deva ser aumentada na presença do ARR. Os estudos de Fonseca

Silva (2007) e Folliard e Berke (1997) indicaram que o ar incorporado dos concretos não sofreu influência com uso do ARR.

5.1.2 Patamar de percolação ou tempo-zero (t_0)

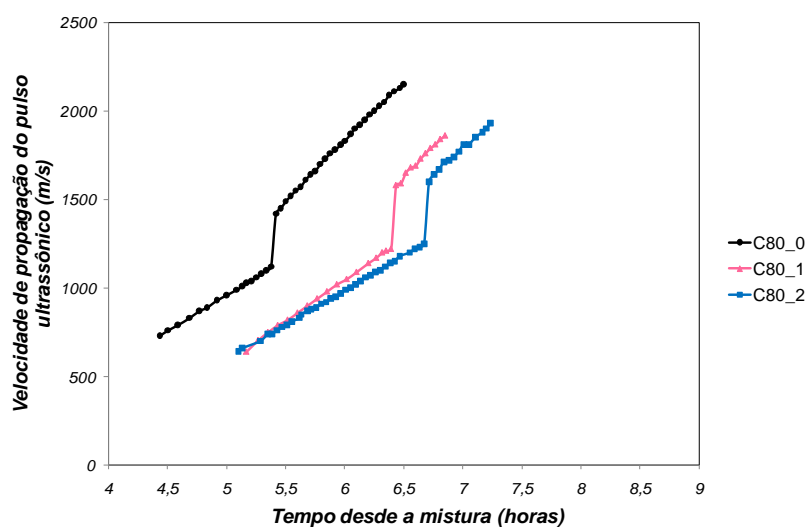
5.1.2.1 Velocidade de onda ultrassônica

A determinação do patamar de percolação (t_0) pela velocidade de onda ultrassônica só foi possível nos concretos C80 e C60. Foi inviável medir velocidade de propagação de onda ultrassônica nos concretos de relação a/agl igual a 0,63 (C40), provavelmente por não se conseguir um contato adequado entre as superfícies do concreto e do transdutor, com o uso do gel de silicone hospitalar. Ao se tentar o acoplamento dos transdutores cobertos com a camada de gel, este se transformava em líquido em contato com a superfície do concreto, não permitindo a propagação da onda. É possível que a elevada relação água/materiais cimentícios - $a/(c+sa) = 0,63$ e a grande quantidade de aditivo superplastificante dessa mistura tenham ocasionado a liquidificação do gel.

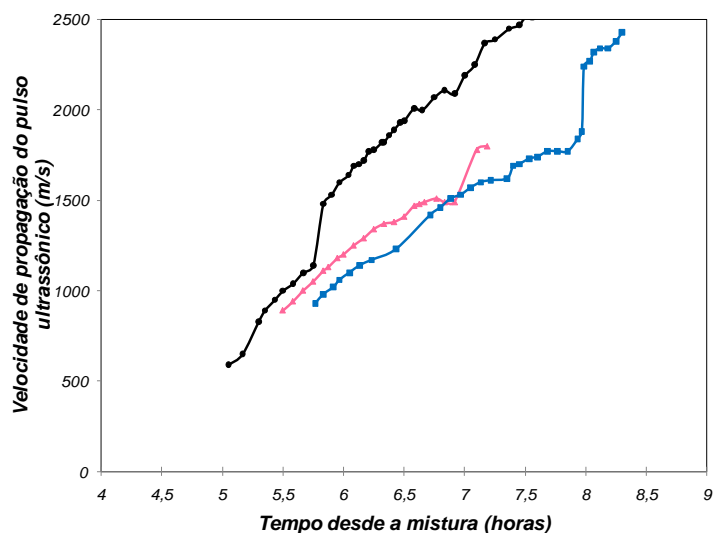
Na Figura 52 estão apresentadas as curvas determinadas experimentalmente. As misturas apresentaram uma velocidade baixa de propagação de onda ultrassônica inicial, seguida de um aumento brusco de velocidade quando aconteceu a pega. Robeyst et al. (2008) observaram um crescimento da velocidade inicial de propagação, durante o período de dormência, como também observado neste estudo. A hipótese levantada por estes autores, é que este aumento na velocidade de propagação no período inicial pode ser atribuída à formação inicial de produtos de hidratação, como a etringita, que embora não dê origem a partículas conectadas e tenha pequena influência sobre o processo de endurecimento, é capaz de preencher os poros e assim diminuir a porosidade, por sua vez possibilitando o aumento da velocidade.

Como verificado por Fonseca Silva (2007), o ARR afetou o tempo t_0 dos concretos, principalmente para o teor mais elevado. Nesta pesquisa, o atraso no tempo de pega foi de 1h, para teor de 1% de ARR em relação ao concreto de referência para ambas as classes de concreto, e respectivamente, de 1:20 h e 2 h para as classes C80 e C60, para o teor de 2% de ARR. Considerando que a velocidade ultrassônica é uma medida da rigidez da amostra de concreto, em processo de endurecimento, pode-se dizer que a rigidez leva um tempo maior

para ocorrer com o aumento de ARR. Este comportamento ou o retardo observado no processo de endurecimento da pasta de cimento com o aditivo redutor pode ser explicado, segundo Maltese et al. (2005) e Rajabipour et al. (2008) pelo fato de que o ARR, sendo constituído por moléculas orgânicas hidrofóbicas, poderia reduzir a capacidade da água em dissolver sais, principalmente o K_2SO_4 e Na_2SO_4 , responsáveis por acelerar a hidratação.



(a)



(b)

Figura 52 – Determinação do patamar de percolação com ultrassom para os concretos: a) C80 e b) C60.

O efeito da relação água/materiais cimentícios sobre o tempo t_0 evidenciou ligeiro retardo de tempo de início de pega nos concretos C60 em relação ao C80, tal qual ocorreu nos estudos realizados por Fonseca Silva (2007).

5.1.2.2 Comparação entre velocidade de onda ultrassônica e método de Vicat

Na Tabela 13 são apresentados os resultados de tempo de início de pega para os concretos C80 e C60, pelo método de Vicat, usando a pasta correspondente dos concretos e não a de consistência normal, e aqueles determinados pela velocidade de onda ultrassônica.

Tabela 13 – Tempo de início de pega determinado pelo método da agulha de Vicat e velocidade de onda ultrassônica

Teor de ARR	Concretos C80 (h:min)		Concretos C60 (h:min)	
	Vicat	Ultrassom	Vicat	Ultrassom
0	9:45	5:25	10:20	5:50
1	10:15	6:25	10:45	6:55
2	10:45	6:45	11:00	7:50

Em todas as misturas, o aumento brusco da velocidade de pulso ultrassônico ocorreu antes da resistência à penetração. Segundo Fonseca Silva *et al.* (2010), o comportamento está de acordo com o obtido por Robeyst *et al.* (2008). Segundo estes pesquisadores, a velocidade da onda ultrassônica começa a aumentar com a formação dos produtos de hidratação, os quais preenchem os espaços capilares criando uma estrutura mais densa e, portanto, um maior módulo de elasticidade volumétrico ou módulo de compressibilidade (K). A força determinada pela agulha de Vicat está relacionada diretamente com o módulo de cisalhamento (G) e dificilmente com o módulo volumétrico. Portanto, um aumento no módulo volumétrico acarreta um aumento na velocidade de propagação da onda de compressão e não na resistência à penetração. O ensaio de ultrassom é sensível a esta mudança na microestrutura, enquanto que a resistência à penetração (devido ao desenvolvimento do módulo de cisalhamento), somente mais tarde consegue mensurar o efeito da interligação dos conjuntos contínuos de grãos ligados mecanicamente (VOIGT *et al.* 2005). Este ponto a partir do qual a agulha de Vicat foi capaz de detectar o enrijecimento pela resistência à penetração ocorreu com um atraso próximo à 4h, para as misturas de referência e para as misturas contendo ARR, nas duas classes de concreto estudadas. Robeyst *et al.* (2000) relatam uma diferença de 30

minutos de atraso entre a determinação em concreto usando pulso ultrassônico e o da resistência à penetração da argamassa, determinado pelo ensaio da ASTM C 403 (2000), ambos sem ARR. Cabe mencionar que a argamassa utilizada por Robeyst *et al.* (2000), para fins comparativos, não foi a mesma dos concretos. Substituiu-se a fração de agregado graúdo pela quantidade de areia, com igual área específica, e ajustou-se o teor de água devido à diferença de absorção entre o agregado graúdo e a areia.

Também pelo método de Vicat observou-se que a presença do ARR retardou o tempo de início de pega, em relação aos respectivos concretos de referência. O comportamento foi mais fortemente evidenciado no teor de 2% de ARR, cujo atraso foi em média de 50 minutos, o dobro do verificado para a dosagem com 1% de ARR. Usando o método da agulha de Vicat, Rixom e Mailvaganam (1999) observaram retardamento de cerca de 1h no tempo de pega dos concretos com 2% de ARR, comparado com o de referência e Folliard e Berke (1997) também constataram aumento no tempo de pega dos concretos contendo 1,5% de ARR (em relação à massa de cimento e sílica ativa) comparado ao concreto de referência.

Do ponto de vista do efeito da relação a/c sobre t_0 , o comportamento observado pelo método do ultrassom, evidenciando um retardo nos concretos C60 (0, 1 e 2% de ARR), em relação aos respectivos concretos C80, foi constatado também pelo método da penetração mecânica, com a agulha de Vicat.

5.1.3 Retração Autógena

Na Figura 53a, 53b e 53c estão apresentados os resultados médios que demonstram o comportamento da variação de comprimento dos concretos C80, C60 e C40, respectivamente, causada pela retração autógena livre ao longo do tempo, descontado o efeito da deformação de origem térmica. Estipulou-se que a medida de retração autógena poderia ser terminada se a perda de massa de água das espécies excedesse a 0,5% do seu valor inicial. Considerando todos os concretos, a maior perda de massa foi de 0,2% para a Classe C60 com 2% de ARR até os 180 dias, como pode ser visto na Figura 53d, indicando uma eficiente selagem dos corpos de prova e que a retração apresentada é eminentemente autógena.

Conforme pode ser visto no comportamento das curvas (Figura 53), em consonância com a literatura, a magnitude da retração autógena de todas as classes de concreto foi reduzida com a presença do aditivo redutor de retração. Nos concretos C80 o comportamento dos concretos com 1 e 2% de ARR foi muito próximo, não justificando o uso da dosagem maior, para fins de redução de retração autógena (Figura 53a); nos concretos C60 a mistura com 2% de ARR foi mais promissora (Figura 53b) e nos concretos C40, embora tenha havido a redução da retração autógena com o uso do ARR, o concreto referência já não apresentou retração relevante. Este comportamento do C40 comprova que para relações a/agl altas (neste caso, 0,63), a retração autógena é desprezível.

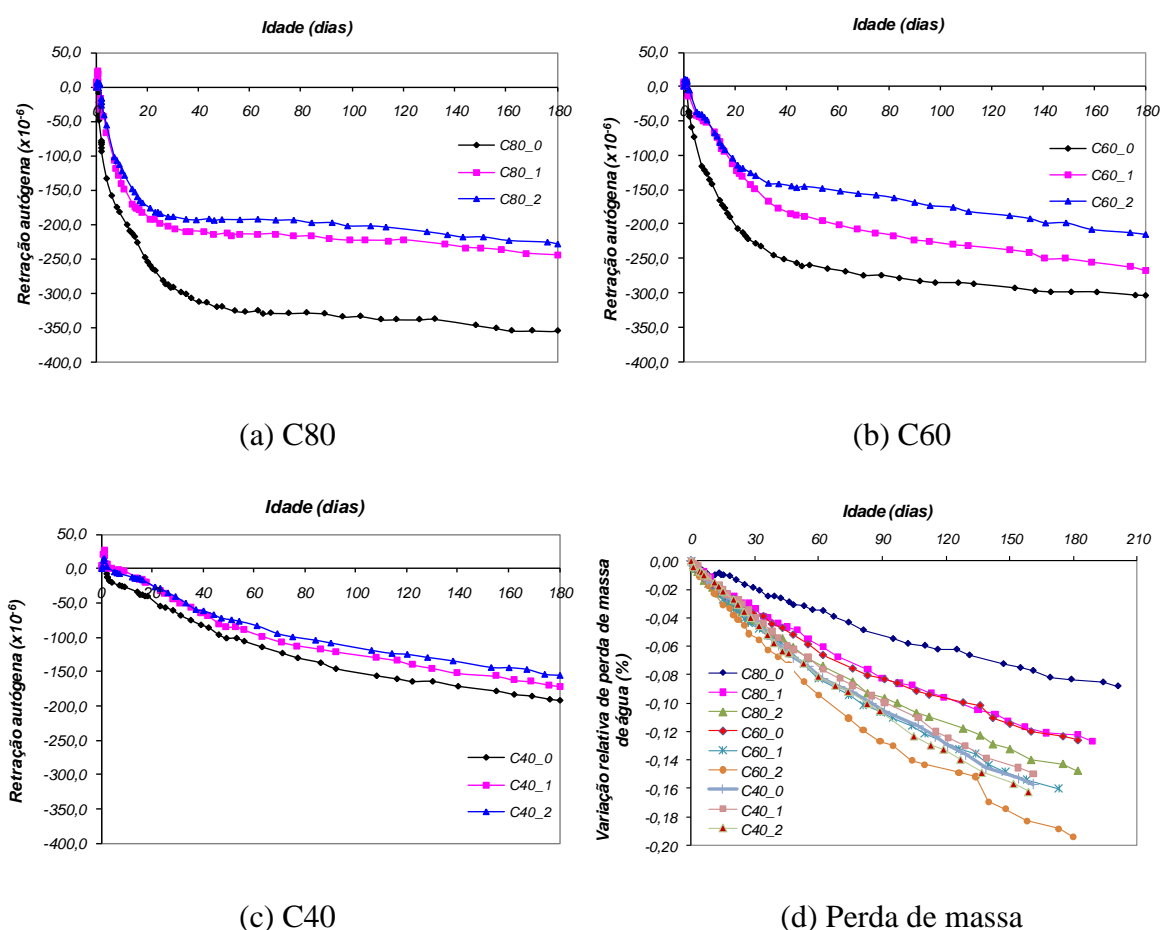


Figura 53 - Retração autógena livre dos concretos estudados em função do tempo (a, b e c) e resultados médios de variação de massa de água em relação à massa inicial, em corpos de prova prismáticos, selados, para os concretos estudados (d)

A Figura 53d mostra os valores médios de perda de massa de água dos corpos de prova selados em relação à massa inicial. A variação entre dois corpos de prova foi mínima, demonstrando boa repetibilidade do ensaio. Em geral, pode-se verificar que a perda de água aumenta com a incorporação do aditivo redutor de retração, sendo este comportamento

particularmente evidenciado nos concretos classe C80 e C60. Acredita-se que isto se deve à redução na tensão de superfície da água do poro, provocada pelo uso do ARR, que facilita a movimentação da água. Esta é uma explicação possível para a ação do ARR nos concretos estudados, considerando que para cada classe, há quase a mesma quantidade de água do poro nas misturas com e sem ARR e assumindo também como desprezíveis as diferenças na parte sólida da estrutura do poro para os tipos de concreto, com e sem ARR. O comportamento observado está em consonância com aquele obtido por Ribeiro et al. (2006).

A Tabela 14 resume a análise de variância (ANOVA) dos resultados de retração autógena nas idades de 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56, 90, 120, 150 e 180 dias.

Tabela 14 – Análise de variância dos resultados de retração autógena

$R^2_{\text{mod}} = 0,99$						
Fonte	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor-p	Resultado
Efeitos principais						
A: Classe	401580	2	200790	1878,74	0,000000	Significativo
B: Teor de ARR	163963	2	81982	767,08	0,000000	Significativo
C: Idade	1388717	10	138872	1299,38	0,000000	Significativo
Interações						
AB	35864	4	8966	83,89	0,000000	Significativo
AC	81319	20	4066	38,04	0,000000	Significativo
BC	21780	20	1089	10,19	0,000000	Significativo
ABC	11464	40	287	2,68	0,000040	Significativo
Erro (resíduo)	10581	99	107			
Total	2115269	197				

Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não; R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo.

A análise de variância demonstra que os efeitos individuais dos efeitos principais (classe, teor de ARR e idade) são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%, indicando que cada uma das variáveis independentes, tomadas isoladamente, exerce influência na retração autógena. Quanto à intensidade dessa influência, pode-se constatar (Teste F) que a classe dos concretos é o fator de maior relevância estatística, em segundo, a idade e de menor influência, embora ainda significativa, o teor de ARR. A significância estatística das interações duplas e a tripla demonstra que o efeito que uma variável exerce sobre a retração autógena é dependente da outra variável associada a ela.

Tendo em vista a influência significativa das variáveis classe, teor de ARR e idade, realizou-se a comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, cujos resultados destas análises estão expostos e discutidos nos itens 5.1.3.1 e 5.1.3.2 a seguir.

5.1.3.1 Influência da classe (relação a/agl)

A Figura 54 mostra o efeito da classe (relação a/agl) na retração autógena, sendo que em (a) apresenta-se também o resultado do agrupamento de médias, pelo teste de Duncan, onde as linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem estatisticamente, e em (b) os valores médios por teor de ARR em função da classe (interação classe x teor de ARR).

Uma vez que a indicação da classe significa o f_{ck} aos 28 dias, quanto maior o nível de resistência da classe, maiores são seus valores de retração autógena (Figura 54a e 54b). Considerando que maiores resistências estão associadas à diminuição da relação a/c e, conseqüentemente, ao aumento do consumo de cimento, esse resultado está em conformidade com a literatura consultada (MAK *et al.* 1999, BROOKS *et al.*, 1999, KOJIMA *et al.*, 2001; FONSECA SILVA, 2007; entre tantos outros). O aumento da retração pode ser explicado pelo aumento da tensão capilar da água dos poros, decorrente do refinamento da porosidade com a diminuição da relação a/c.

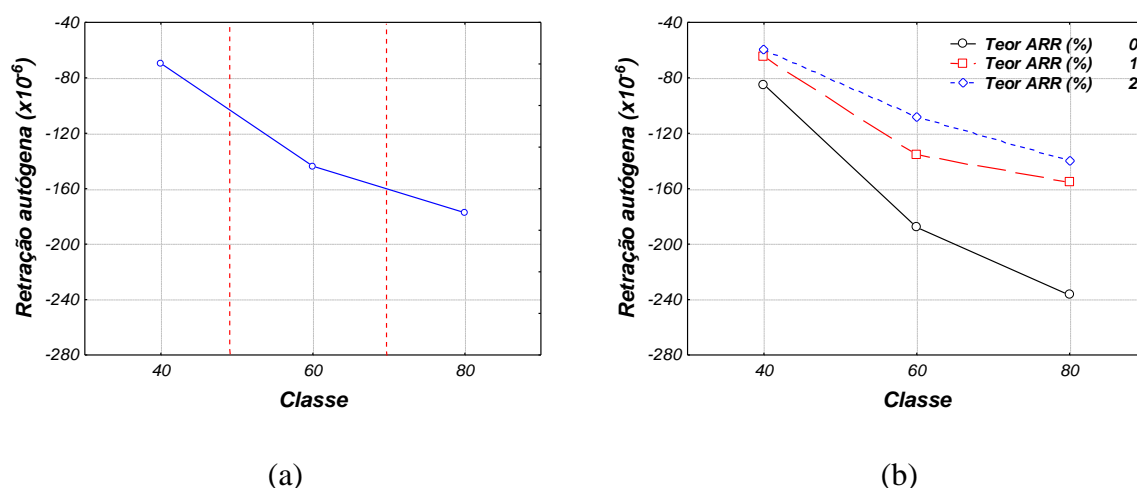


Figura 54 – Efeito da classe na retração autógena dos concretos: (a) valores médios globais de retração autógena em função da classe (relação a/agl) (b) valores médios por teor de ARR em função da classe.

Tal comportamento é esperado tomando como referência a equação de Kelvin-Laplace (Equação 5), na qual pode-se verificar que para misturas com relação a/c baixa, a saída de

água, devido à autodessecação, provoca o esvaziamento de poros cada vez mais delgados, levando a uma diminuição intensa na umidade relativa interna e a uma depressão capilar elevada, aumentando a magnitude da retração autógena. Quanto mais estreitos forem os poros capilares (r) em processo de esvaziamento, maior a intensidade da depressão capilar ($p_v - p_c$), pois são grandezas inversamente proporcionais. A explicação para esse fenômeno pode ser obtida nos estudos realizados por Buil (1990) *apud* Boivin (2001) em pastas com relação $a/(c+sa)$ igual a 0,40 e 0,30. Tal autor verificou que aos 20 dias de idade, o valor de $p_v - p_c$ aumentou de 6,9 MPa para 17,3 MPa, enquanto r reduziu de 210 Å para 84 Å.

5.1.3.2 Influência da idade e teor de ARR

A Figura 55 apresenta a influência da idade (1, 2, 3, 7, 14, 28, 56, 90, 120, 150 e 180 dias) em função da classe e do teor de ARR na retração autógena dos concretos investigados.

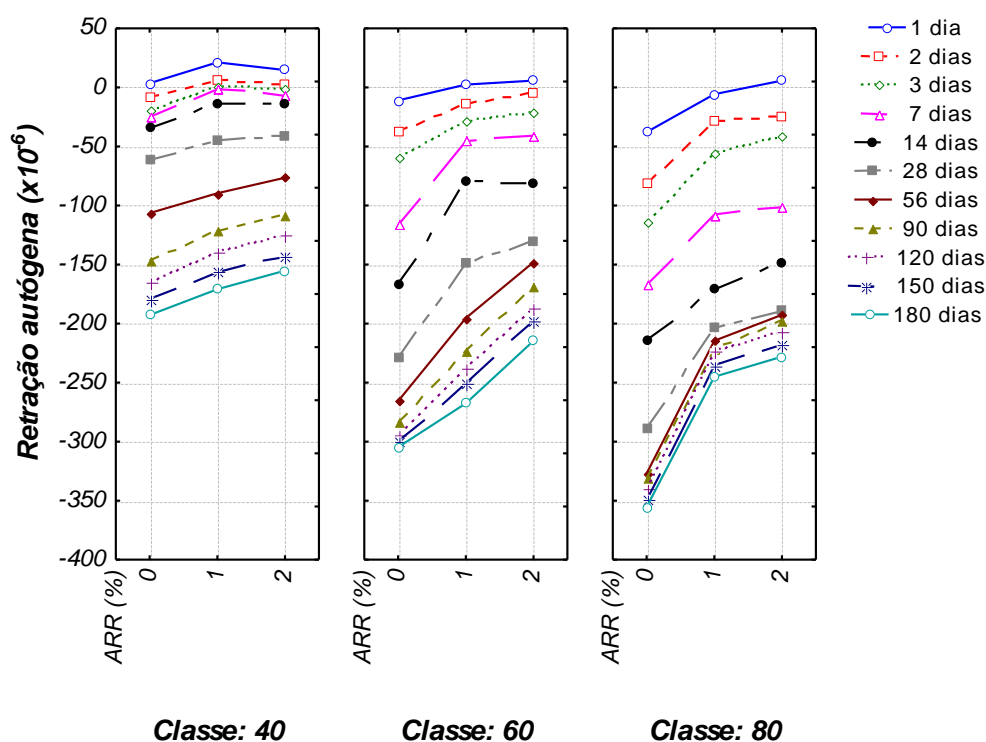


Figura 55 – Variação da retração autógena em função do teor de aditivo, nas diversas idades, para as classes de concreto estudadas

Com base nas Figuras 53 e 55, observa-se que a retração autógena tem um crescimento mais acentuado nas idades iniciais, tendendo a se tornar constante em idades mais avançadas, principalmente para o C60 e C80.

A Figura 56 mostra o efeito do teor do ARR na retração autógena, sendo que em (a) apresenta-se também o resultado do agrupamento de médias, onde as linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem estatisticamente, e em (b) os valores médios por classe em função do teor de ARR.

Quanto ao ARR, de uma forma geral, observa-se a eficácia do aditivo em reduzir a retração autógena (Figuras 53 e 56), sendo o teor de 2% mais promissor nessa redução do fenômeno. Após uma análise de variância (ANOVA) englobando todas as classes, fizeram-se novas análises por classe de concreto, para se verificar a influência do teor de ARR no fenômeno investigado, a partir das quais podem-se fazer as seguintes considerações: para o concreto C80, embora estatisticamente os teores de ARR tenham dado diferentes, do ponto de vista prático, parece razoável utilizar o 1%, uma vez que a redução do 2%, comparativamente ao 1%, não é expressiva. No concreto C60, os três teores pertencem a grupos distintos e o teor de 2% é mais eficaz na redução da retração autógena. Já para os concretos C40, apesar da análise estatística ter demonstrado que os três teores (0, 1 e 2%) são significativamente diferentes, sob o ângulo da engenharia, não há necessidade de utilizar ARR para fins de redução de retração autógena; o concreto de referência já apresentou baixa retração autógena, representando 21% do valor do C80 e 26% do C60, aos 28 dias. Nesta idade, para o C40, embora a redução tenha ficado em média 32% para ambos os teores, o valor de retração continua baixo, assim como o de referência, não configurando vantagem técnica e financeira o emprego do ARR.

As Figuras 54b e 56b mostram ainda que, para a classe C40, o efeito do ARR não é tão importante quanto para as classes de resistências maiores (C60 e C80), onde as retrações são mais intensas, ou seja, o efeito do ARR é dependente da resistência do concreto, e é tanto mais eficiente quanto maior a classe do concreto.

Na Tabela 15 apresentam-se os valores médios de retração autógena nas idades de 1, 3, 7, 28, 90 e 180 dias e o percentual de redução deste fenômeno com o emprego dos teores de 1 e 2% de ARR em relação ao concreto de referência.

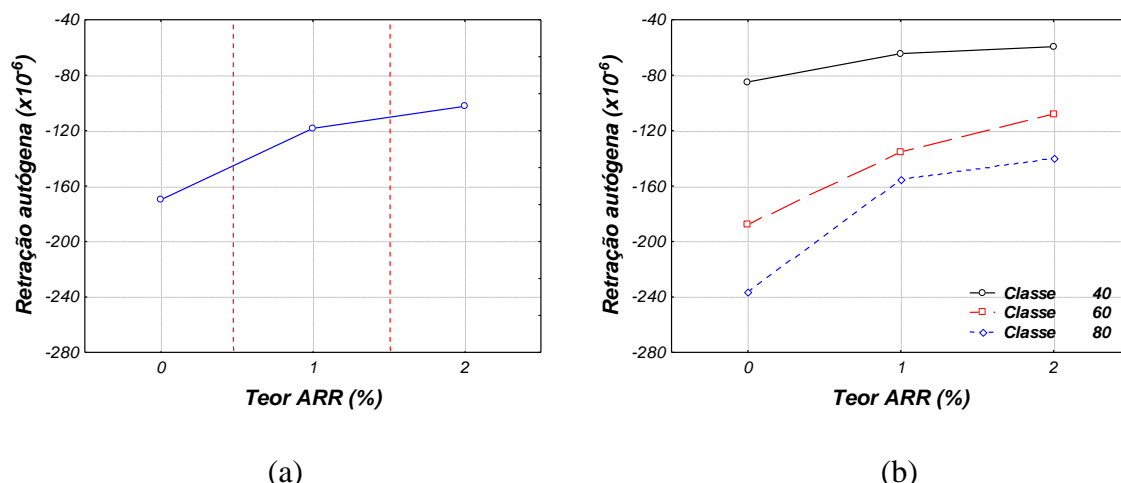


Figura 56 – Efeito do teor de ARR na retração autógena dos concretos: (a) valores médios globais de retração autógena em função do teor de ARR e (b) valores médios por classe função do teor do ARR.

Tabela 15 – Resultados médios da retração autógena em várias idades e o efeito do ARR

	Idade (dia)	C80_0	C80_1	C80_2	C60_0	C60_1	C60_2	C40_0	C40_1	C40_2
Retração autógena ($\times 10^{-6}$)	1	-49	6	5	-11	-1	5	4	21	15
	3	-114	-94	-40	-59	-24	-16	-19	1	1
	7	-167	-108	-102	-117	-46	-41	-25	-2	-7
	28	-289	-203	-188	-229	-149	-130	-62	-44	-41
	90	-330	-222	-197	-283	-223	-169	-144	-120	-108
	180	-356	-244	-227	-305	-268	-215	-193	-171	-155
Variação da retração autógena relativa ao concreto referência (%)	1	0	-113	-111	0	-93	-140	0	485	306
	3	0	-17	-65	0	-60	-74	0	-105	-102
	7	0	-36	-39	0	-61	-65	0	-94	-71
	28	0	-30	-35	0	-35	-43	0	-29	-34
	90	0	-33	-40	0	-21	-40	0	-17	-25
	180	0	-31	-36	0	-12	-30	0	-11	-19

De acordo com a Tabela 15 e Figura 55, verifica-se, de uma forma geral, o efeito máximo do aditivo nas idades mais jovens, diminuindo com o avanço do tempo. As reduções do fenômeno da retração autógena com o teor de 2% de ARR são bastante expressivas nas primeiras idades, com destaque para o C80 e C60, da ordem 111% e 140% para 1 dia e 65% e 74% para 3 dias de idade, respectivamente. Dos 7 para os 28 dias, o teor de 2% de ARR

diminuiu, respectivamente, de 39% para 35%, para o C80, de 65% para 43% para o C60 e de 71% para 34% para o C40. Este comportamento está consistente com os dados apresentados por Weiss (1999), Fonseca Silva (2007), Melo Neto (2008) e Schäffel (2009).

Entretanto, após o período de 28 dias até a idade de 180, não houve substancial variação do efeito do ARR na redução de retração, isso significa dizer que a diferença de retração autógena entre o concreto referência e aqueles com o ARR (com 1 e 2%) tende a se tornar constante. Esta observação sugere que o ARR utilizado nesta pesquisa é mais eficaz quando a umidade relativa interna é mais alta ou quando ainda não houve um refinamento da estrutura de poros do material. Para Bentz e Jensen (2004) é razoável que a eficiência do ARR decresça com o tempo, uma vez que as moléculas do redutor de tensão superficial são absorvidas pelos produtos de hidratação. Importa observar, além disso, que a quantidade de reações químicas de hidratação do cimento decrescem com o tempo, principalmente em um cimento ARI.

5.1.3.3 A expansão nas primeiras idades

O fenômeno da expansão nas primeiras idades é bem conhecido na literatura. Vários autores (BENTZ e STUTZMAN, 1994; LURA, 2003; BAROGHEL-BOUNY et al. 2004; FONSECA SILVA, 2007, entre outros) registraram expansões em uma variedade de concretos usando diferentes métodos de medição, apesar de os valores de expansão diferirem substancialmente.

Nesta pesquisa também foi observada uma expansão inicial (Figura 53 e Tabela 15). Nos concretos de menores relações a/agl, C80 ($a/agl = 0,3$) e C60 ($a/agl = 0,4$) tal expansão ocorreu do patamar de percolação até cerca de 24 h, sendo pouco expressiva nestes concretos e não verificado em todos os teores de ARR. Já para o concreto C40, de maior relação a/agl, igual a 0,63, a expansão, com valores superiores às demais classes, ocorreu para todos os teores de ARR e se estendeu por até cerca de 4 dias após a moldagem.

Baroghel-Bouny et al. (2004) perceberam expansões por aproximadamente duas semanas, após pega, em pastas de cimento de relação a/c = 0,60. Segundo os autores, tal fenômeno pode ser atribuído à formação e ao crescimento de grandes cristais de $Ca(OH)_2$ (e também agulhas de etringitas), enquanto se processam as reações de hidratação do cimento. Durante este período, a expansão é proeminente, apesar de todas as reações químicas levarem à diminuição no volume do sólido e contribuir com a retração química. De uma forma mais detalhada, o crescimento dos cristais gera uma pressão de cristalização nas paredes dos poros,

que pode induzir expansões na microestrutura (com a criação da porosidade). Em misturas com relação a/c alta, os grandes cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (e agulhas de etringitas) tem tempo suficiente, quantidade de água e espaço para crescer, antes de a resistência da matriz e o processo de autodessecação tornarem fortes o suficiente para balancearem a pressão de cristalização, e antes da autodessecação tornar-se preponderante (quando a fase gás aparece nos poros capilares).

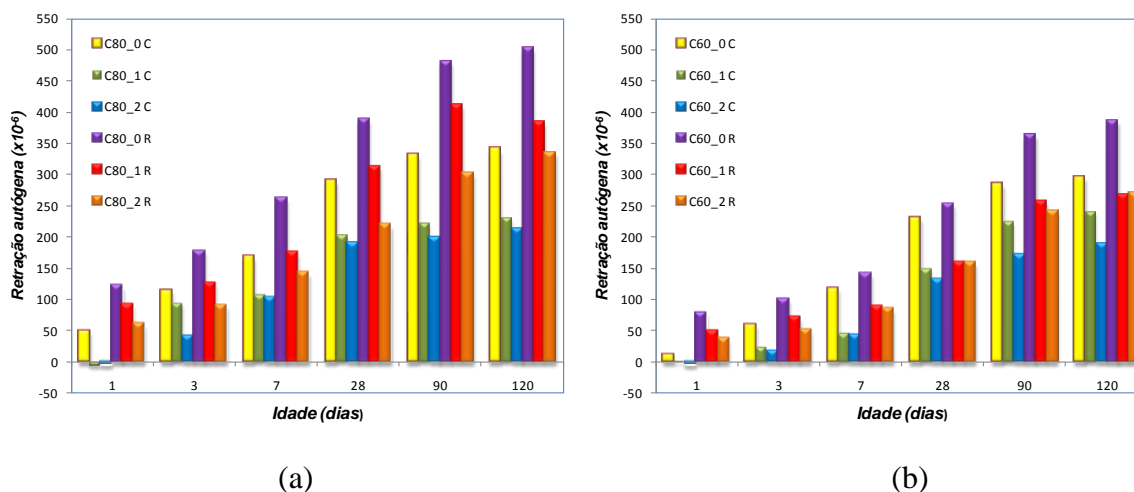
Por outro lado, outra possível explicação para a expansão, notadamente na classe C40, pode ser atribuída à reabsorção da água de exsudação. Bjontegaard (1999), citado por Lura (2001), observou que remover a água de exsudação reduz a expansão, mas não a elimina totalmente. A expansão residual poderia ocorrer em função da exsudação interna na mistura. Nesta pesquisa, para a classe C40 foi observada exsudação externa, principalmente para as misturas com ARR. Assim, supõe-se que uma exsudação interna possa ter ocorrido, provocando as expansões autógenas até a idade de 04 dias.

5.1.3.4 Comparação com outros pesquisadores

Como visto na literatura, um dos grandes desafios dos estudiosos da retração autógena é padronizar a técnica de medidas desse fenômeno. É uma tarefa exaustiva interpretar resultados com base em técnicas de medição diversas. Essa falta de padronização de procedimento de ensaio dificulta em muito a predição da retração autógena a partir de modelos predefinidos. Dentre os pontos que geram discrepância nos resultados, citam-se: início da medição, imediatamente após a moldagem (majora a retração), ou no patamar de percolação (tempo zero), outros somente após 24 h da moldagem (minora a retração, quando uma parcela expressiva da retração ocorre no primeiro dia) e, os variados tipos de dispositivos utilizados nas medições.

Para exemplificar a diferença de magnitude de resultados, é válido, aqui, fazer um comparativo entre os resultados obtidos nesta pesquisa, onde se empregaram extensômetros tipo Carlson, embutidos, e aqueles obtidos por Fonseca Silva (2007), que utilizou relógios comparadores, conforme o procedimento da norma japonesa. As misturas de concreto desenvolvidas nas duas pesquisas são bastante próximas, diferenciando-se pelo fato de serem produzidas em betonadas diferentes e lotes também diferentes dos materiais constituintes, o

que não invalida a comparação. O aspecto principal a se ressaltar é a magnitude da retração autógena obtida empregando-se 02 dispositivos de medição distintos. Na Figura 57, está apresentado o comparativo para os concretos C80 e C60 produzidos por aquela autora e os desta pesquisa.



(a) (b)
 Figura 57 – Retração autógena determinada por métodos de medição distintos: com extensômetros elétricos (C) e relógios comparadores (R) – a) concreto classe C80 e b) concreto classe C60

A magnitude dos valores de retração autógena determinados com relógios comparadores são superiores àqueles determinados com extensômetros elétricos, para todas as idades. Tomando como base o concreto C80 de referência, o valor de retração autógena medido com relógio comparador ficou em média 50% maior que o medido com extensômetro elétrico embutido; exceção à idade de 1 dia, no qual essa diferença foi de 146%. Para o concreto C60, essa diferença teve uma maior variação, com os valores de retração autógena medidos com relógios comparadores dando 10% aos 28 dias e 70% aos 3 dias superiores àqueles determinados com extensômetro elétrico. Acredita-se que a restrição de deslocamento em função do confinamento do extensômetro elétrico embutido, como o utilizado nesta pesquisa (tipo Carlson), possa explicar as medidas de deformação inferiores quando comparados com o método direto de medida de deformação, como o preconizado pela norma japonesa (relógios comparadores). No estudo realizado por Kojima et al. (2001) foi observado que os resultados de retração autógena determinados segundo a norma japonesa (JIS 1129-1993) foram superiores aos determinados com extensômetros elétricos embutidos: para o concreto de $f_{c28} = 76$ MPa essa diferença de retração autógena foi da ordem de 30% na idade de 120 dias.

5.1.3.5 Predição da retração autógena

Sendo a retração autógena o fenômeno objeto desta pesquisa, tornou imprescindível a determinação de modelos que relacionassem as variáveis independentes (resistência do concreto a j dias, o teor de ARR e a idade – t) a essa variável de resposta. Inicialmente, submeteram-se os dados resultantes das três classes de concreto (C40, C60 e C80), nas três condições (referência, sem o ARR, e com 1 e 2% do ARR), considerando ainda a evolução da retração no tempo, a uma análise de regressão múltipla não linear. Para a qual obteve-se o modelo abaixo descrito (Equação 12), com coeficiente de determinação (R^2) = 0,76.

$$\varepsilon_s = (0,185 \cdot ARR - 1) \cdot [53,76 \cdot \ln(t) + 0,25 \cdot \ln(fc_j)] \quad \text{Equação 12}$$

Onde: ε_s = retração autógena, (deformação específica - $\times 10^{-6}$)

ARR = teor do aditivo, neste estudo com intervalo de 0 a 2%

t = tempo em dias

fc_j = resistência à compressão do concreto obtida na idade t , em MPa

A Figura 58 apresenta a comparação entre os valores determinados em ensaio (observado) e aqueles preditos pelo modelo da Equação 12. É possível perceber que há boa aderência entre os valores observados e os preditos para o concreto C60 e para o C80, embora com uma tendência de subestimar a retração autógena nas idades mais avançadas do C80_0 e C80_2. Para o concreto classe C40, apesar de o comportamento dos valores preditos e observados serem semelhantes, porém em magnitude, para todas as situações, o modelo majora a retração autógena.

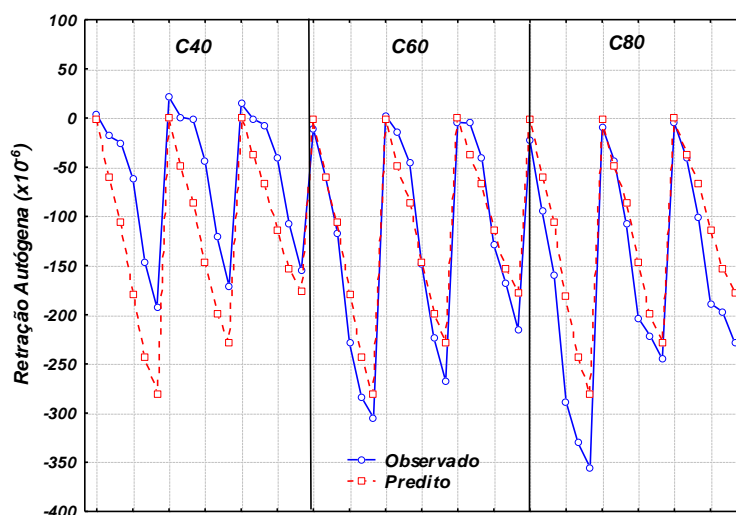


Figura 58 – Comparação entre os valores de retração autóloga determinado em ensaio (observado) e os preditos pelo modelo considerando todas as classes de resistência C40, C60 e C80.

Os resultados experimentais demonstraram que o concreto classe C40 referência (sem ARR) apresenta baixa retração autóloga e que o ARR, embora diminua a magnitude do fenômeno, o seu emprego não constitui uma relação custo/benefício vantajosa (vide item 5.1.3.2). Desta forma e ainda tendo em vista que a retração autóloga dos concretos referência das classes C60 e C80 apresentaram magnitudes importantes, fez-se nova regressão não-linear desprezando a classe C40, a partir da qual se obteve o modelo (Equação 13), com coeficiente de determinação (R^2) = 0,94:

$$\varepsilon_s = (0,197 \cdot ARR - 1) \cdot [64,94 \cdot \ln(t) + 1,01 \cdot \ln(fc_j)] \quad \text{Equação 13}$$

Onde: ε_s = retração autóloga (deformação específica - $\times 10^{-6}$)

ARR = teor do aditivo, neste estudo com intervalo de 0 a 2%

t = tempo em dias

fc_j = resistência à compressão do concreto obtida na idade t . Modelo válido para classe de resistência superior a 60 MPa.

A comparação entre os valores de retração autóloga obtidos experimentalmente e os preditos pela Equação 13 está demonstrada na Figura 59.

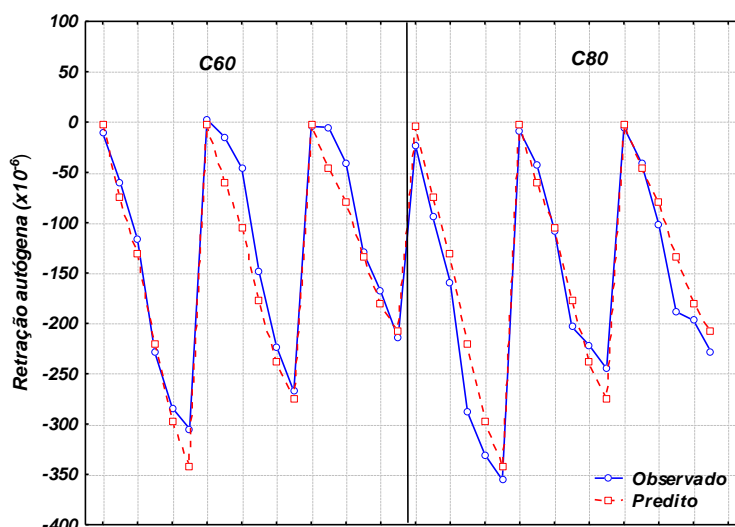


Figura 59 – Comparação entre os valores de retração autóloga determinado em ensaio (observado) e os preditos pelo modelo considerando os concretos C60 e C80.

Observa-se pela Figura 59 uma aderência satisfatória entre os valores obtidos experimentalmente e os preditos pelo modelo (Equação 13), comprovada pelo alto coeficiente de determinação, o que demonstra ser este modelo o mais consistente para a predição da retração autóloga quando se tratar de concretos com classe de resistência superior à 60 MPa.

5.1.3.6 Custo

O preço do aditivo redutor de retração – ARR empregado nesta pesquisa é de R\$ 12,00/kg, base novembro/2010, conforme informado pelo fabricante do produto. Desta forma, levando em conta a adição de 2% de ARR - teor de maior eficiência para a redução da retração autóloga – tem-se o acréscimo por metro cúbico, comparativamente ao concreto referência (sem ARR), de R\$ 108,00 para o concreto classe C80 e de R\$ 86,40 para o concreto classe C60, valores estes relativamente altos. Todavia, em se considerando que o emprego do ARR pode minimizar o risco de fissuração pela redução da retração autóloga nos concretos de alta resistência, parece razoável o seu emprego, haja vista a relação custo/benefício, com a perspectiva de obtenção de um material mais durável. A análise de risco de fissuração apresentada no item 5.1.11 demonstra a eficácia do uso de 2% de teor de ARR em reduzir a tensão gerada pelas deformações de origem autóloga, diminuindo sobremaneira o risco de fissuração.

5.1.4 Umidade relativa interna

Neste trabalho a umidade relativa interna foi medida nos concretos classe C60, referência e com 2% de ARR, sob condições seladas. O resultado médio de 02 (dois) corpos de prova para cada concreto está apresentado na Figura 60.

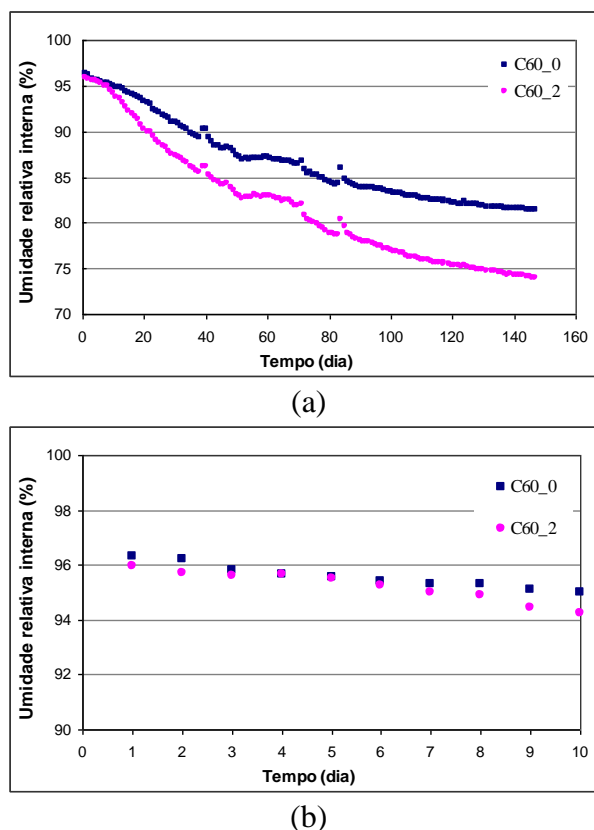


Figura 60 - Umidade relativa interna do concreto em função do tempo para os concretos C60_0 (sem ARR) e C60_2 (com 2% ARR) sob condições seladas: (a) ao longo de 150 dias e (b) nos primeiros 10 dias.

A queda da UR interna pode ser observada desde as primeiras idades, de forma moderada, no entanto, para o C60_2, acentua-se um pouco mais a partir do 10º dia, em comparação ao referência. Com o avanço da hidratação, a umidade relativa interna tende a se tornar estável, em torno dos 140 dias, com valores médios de 81,5% para o C60_0 e 74,3% para o C60_2, resultados estes semelhantes ao obtidos por Fonseca Silva (2007), ao medir a umidade relativa interna do concreto classe C80, relação a/agl igual a 0,3. Baseado nos estudos de Baroghel-Bouny (1994), mencionados na revisão bibliográfica, pode-se afirmar que o mecanismo preponderante nesse processo de queda de umidade relativa interna (*autodessecação*) é o da água capilar (mecanismo da depressão capilar), considerando $UR > 76\%$. Abaixo desse valor e com poros menores que $r_p \approx 50 \text{ \AA}$, um outro mecanismo de

retração por secagem deve predominar e a queda de umidade relativa pode ser explicada pela diminuição da camada de água adsorvida, sendo o início da porosidade do gel C-S-H. Assim, se a umidade relativa baixar desse limite, é água dos hidratos que está sendo retirada. É ainda mencionado pela autora que, abaixo de cerca de 80% de umidade relativa interna, a autodessecação do material pode dar continuidade, pois quando a água nos poros capilares está ausente, os grãos de cimento anidro, mais hidrófilos que os hidratos, utilizam a água adsorvida desses últimos, para se hidratar, sendo a cinética da reação bem mais lenta.

A cinética da diminuição da umidade relativa interna até os 10 dias é praticamente a mesma (Figura 60b). A partir daí, a autodessecação do concreto com ARR (Figura 60a) foi ligeiramente maior, de forma que a UR em relação ao concreto referência, até os 145 dias, variou de 1 a 9,2% (Figura 61). Fonseca Silva (2007), trabalhando com concreto de relação a/agl igual a 0,3 e f_{c28} de 90 MPa, com 2% de ARR, obteve resultados de secagem da mistura com ARR muito próximos, da ordem de 1%, 5% e 9% aos 30, 60 e 140 dias, em relação ao referência. Resultados similares aos obtidos nesta pesquisa, tendo em vista principalmente as diferenças de concreto estudadas. Por outro lado, Schäffell (2009), em estudos com pastas com e sem ARR, verificou que, aos 91 dias, foi atingido o estado de equilíbrio quanto à UR interna, e que nesta idade, a redução da autodessecação com o ARR, para as pastas de relação a/c igual a 0,25 e 0,42, variou entre 4% e 7% para dois concretos estudados, em relação ao referência. Sob condições seladas, pode ser assumido que a menor queda da umidade relativa interna na pasta de cimento endurecida, causada pelo emprego de ARR, leva a uma menor autodessecação, o que contribui para a redução da retração autógena, conclui o autor. Já Bentz *et al.* (2001), em estudos com pastas de cimento, com 2% de ARR e de referência, obtiveram duas situações na determinação da UR até a idade de 11 dias: nas primeiras 24h (até idade de 1 dia), a queda da UR da pasta de cimento com ARR foi ligeiramente maior que a de referência (comportamento semelhante ao obtido nesta pesquisa para o ensaio – 145 dias), a que os autores atribuem ao provável efeito de diluição (lei de Raoult) citado por Albery e Daniels (1980); a partir desta idade até o fim do ensaios, com 11 dias, a autodessecação das pastas com ARR teve uma leve redução (3%).

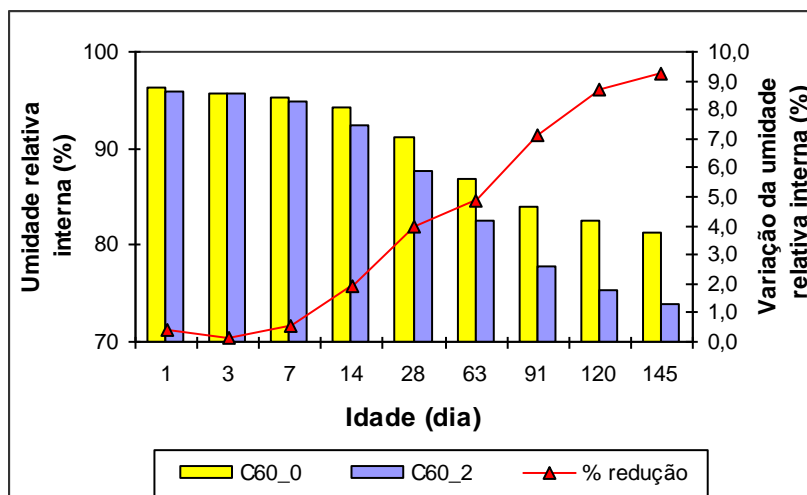
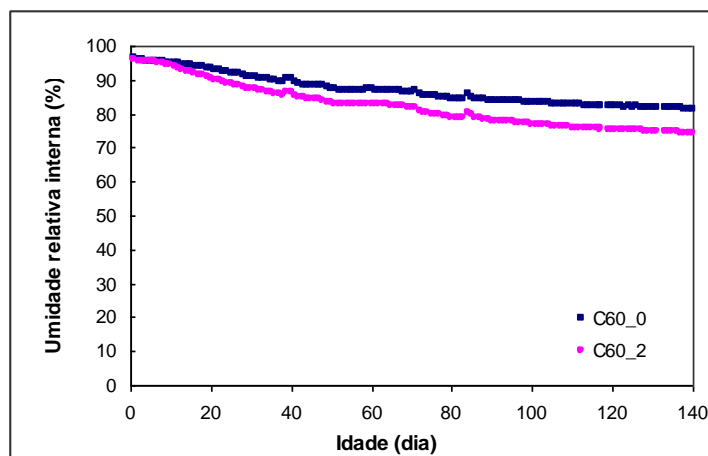


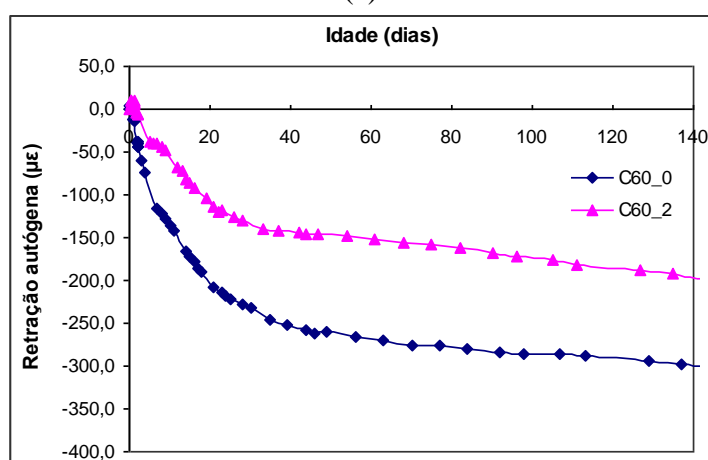
Figura 61 - Umidade relativa interna do concreto em várias idades e o efeito do ARR.

A Figura 62 apresenta uma comparação entre a umidade relativa interna e a retração autóloga para o concreto C60 com e sem ARR. Conforme já anteriormente citado, observa-se que não houve variação considerável da umidade relativa interna, mas por outro lado, a redução da retração autóloga foi substancial. Sabe-se que a retração autóloga está relacionada à queda da umidade relativa interna (autodessecação) consumida nas reações de hidratação e ao surgimento de tensões capilares com a formação de meniscos nos vazios. Dessa forma, a diminuição na tensão superficial nos poros capilares, causada pela ação do ARR, é a responsável pela redução da retração autóloga obtida. Da mesma forma, para a variação de umidade relativa interna que ocorreu nos materiais cimentícios contendo ARR, quando comparado com o referênciã, a provável explicação é que a menor tensão de superfície naqueles materiais promove uma maior secagem, o que resulta em menor umidade relativa interna comparativamente ao concreto de referênciã.

É importante destacar a seguinte constataçã, já observada por outros pesquisadores, entre eles Fonseca Silva (2007), de que a retração autóloga e a umidade relativa interna estão intimamente relacionadas de tal forma que “à medida que a hidratação avança, a magnitude da retração autóloga se eleva e a umidade relativa dentro do concreto diminui, ou seja, a autodessecação aumenta”.



(a)



(b)

Figura 62 - Comparação entre a umidade relativa interna e a retração autógena do concreto C60 com e sem ARR, até a idade de 140 dias; (a) umidade relativa interna e (b) retração autógena.

5.1.5 Retração por secagem

A norma ASTM 157 (1991) utilizada para este ensaio preconiza a determinação experimental da retração da secagem mais o incremento da retração autógena, após 28 dias de cura submersa. Como hipótese simplificadora, considera-se desprezível a contribuição da retração autógena, razão porque é empregado apenas o termo “retração por secagem” para denominar o resultado desse ensaio em muitos trabalhos encontrados na literatura técnica. Para efeito desta pesquisa o termo *retração por secagem* é utilizado, todavia sabe-se que há uma parcela embutida de deformações de origem autógena e térmica.

5.1.5.1 Resultados com 28 dias de cura submersa

A deformação dos corpos de prova, determinada imediatamente, após os 28 dias de cura submersa, situou-se dentro do intervalo de - 15 a - 30 $\mu\epsilon$ (concretos C40), de - 20 a - 60 $\mu\epsilon$ (concretos C60) e de - 75 a - 100 $\mu\epsilon$ (concretos C80). Essa retração é a soma de duas parcelas: autógena e térmica, em relação à leitura inicial, realizada com 24 horas após a moldagem. Isso significa que as deformações térmica e autógena, durante as primeiras 24 horas, não são incluídas, segundo o procedimento da norma ASTM C 157 (1991).

A diferença na magnitude de retração autógena, determinada aos 28 dias de cura submersa e no ensaio com corpos de prova selados, apresentados no item 5.1.3, é bastante expressiva. Os resultados obtidos por Fonseca Silva (2007) situaram-se dentro do intervalo de - 15 a - 30 $\mu\epsilon$ (concretos C60) e de - 40 a - 60 $\mu\epsilon$ (concretos C80), demonstrando também a surpreendente diferença de magnitude da retração autógena entre as duas formas de determinação. Gettu *et al.* (2001) obtiveram pequena expansão (30 $\mu\epsilon$ a 50 $\mu\epsilon$) nos concretos com $a/c = 0,45$, sem adição mineral, no concreto de referência e nas misturas contendo ARR (1,5% e 2%). Como observado, a cura com água foi eficaz na minimização da retração autógena, até para o concreto com relação a/agl igual a 0,3. Aïtcin (1999a) defende que, enquanto uma fonte externa de água (cura úmida) estiver conectada ao sistema de poros gerados durante a hidratação, os meniscos não são formados no sistema capilar. O autor explica que a água retirada dos poros capilares para a hidratação da pasta de cimento é substituída pela mesma quantidade de água da fonte externa; assim, como não há menisco dentro do sistema capilar, forças de tração não são geradas dentro dos poros capilares, evitando desta forma a autodessecação e por, consequência, a retração autógena. Porém, enfatiza o autor, para que a retração autógena seja evitada, a cura com água deve ser iniciada imediatamente no início das reações de hidratação e tão logo quanto se mantenha a continuidade de água nos poros. Entretanto, esse assunto é controverso. Bentur (2001) citando Tazawa e Miyazawa e Seigner *et al.* relata que a cura externa com água é parcialmente efetiva: em pequenas seções transversais, a cura é eficiente, pois a água pode penetrar mais profundamente, evitando a autodessecação, desde o núcleo da seção. Mas já em corpos de prova, colocados continuamente em cura submersa, com dimensões de seções maiores que 5 cm, a retração ocorreu. O fato é que a cura contínua com água em estruturas reais tem suas limitações e por essa razão diferentes estratégias são desenvolvidas e estudadas para minimizar a retração autógena como a cura interna e o uso do aditivo redutor de retração.

5.1.5.2 Resultados de retração por secagem e perda de massa

A Figura 63 (a, b e c) apresenta as curvas médias de retração por secagem, na qual a idade zero corresponde a 28 dias, após os corpos de prova terem permanecido submersos em água saturada com cal, quando se inicia a secagem. A retração por secagem de cada concreto corresponde à média aritmética de dois corpos de prova. Os corpos de prova em processo de secagem eram pesados periodicamente, para se obter a variação de massa de água em relação à massa total de água do corpo de prova após 28 dias de cura submersa (Figura 63d). Tanto na retração por secagem quanto na variação de perda de massa os resultados individuais apresentaram-se muito próximos, demonstrando um bom controle nas operações de ensaio.

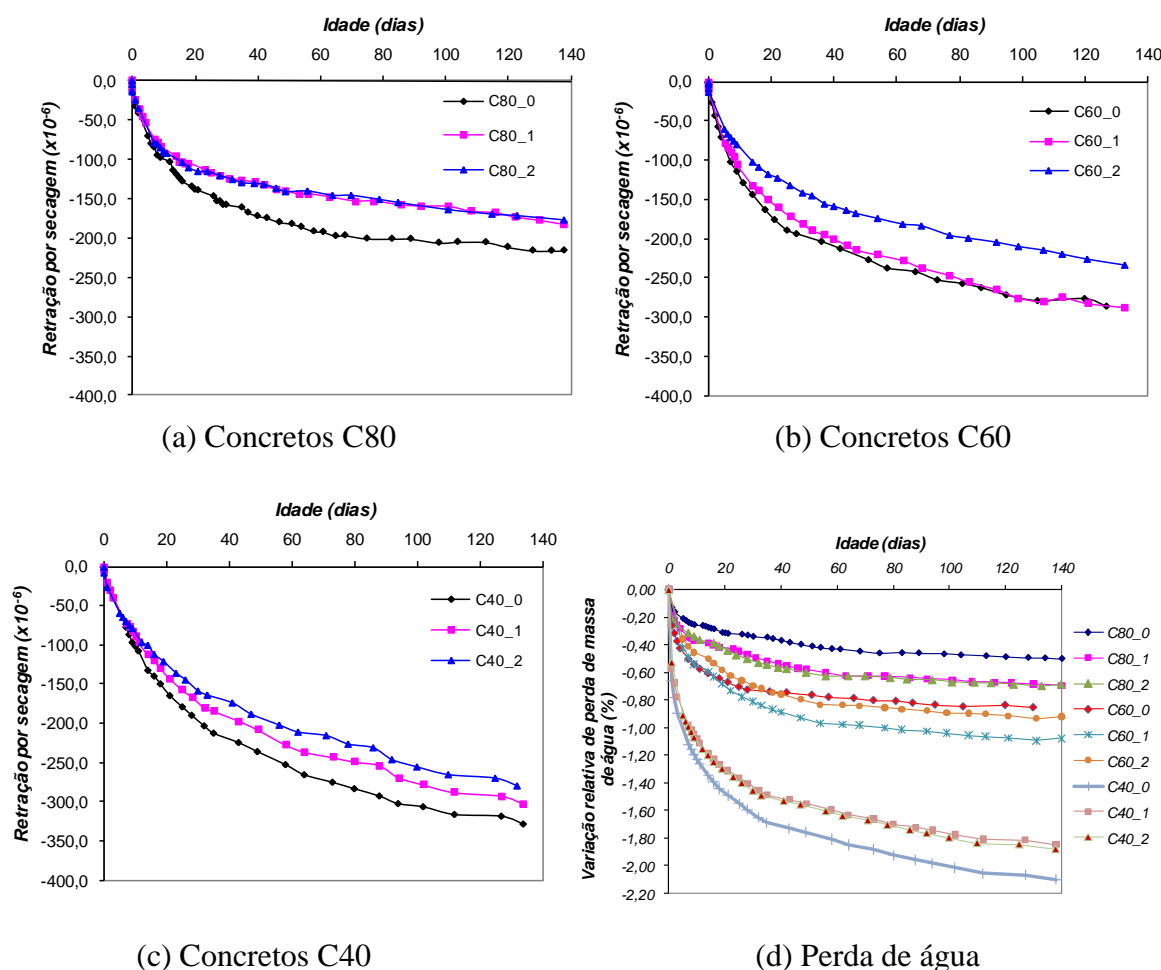


Figura 63 - Resultados médios de retração por secagem determinados em corpos de prova prismáticos de 10mm x 10mm x 30mm, após 28 dias de cura submersa: (a) C80, (b) C60 e (c) C40 e (d) resultados médios de variação de massa de água em relação à água inicial, determinados em corpos de prova prismáticos curados ao ar.

As Figuras 63a, 63b e 63c mostram que o uso do aditivo redutor de retração – ARR pode promover a redução da retração por secagem. Ainda, observa-se que o crescimento dessa propriedade é maior nas idades iniciais, tendendo a se tornar relativamente constante com o avanço da hidratação.

No que se refere à perda de massa de água (Figura 63d), pode ser visto que notadamente para os concretos C80 e C60, a variação relativa de perda de água foi, em geral, maior para as misturas com o ARR. Este comportamento sugere que o ARR, por reduzir a tensão superficial na água do poro, pode aumentar a secagem. Fonseca Silva (2007) obteve comportamento semelhante ao desta pesquisa, e cita o livro de físico-química de Alberty e Daniels (1980), explicando que quanto menor a tensão superficial, maior a velocidade de secagem. Essa hipótese pode justificar os resultados obtidos. Entretanto, nos estudos realizados por Bentz *et al.* (2001) a pasta de cimento de relação a/agl igual a 0,35 contendo 2% de ARR teve reduzida a velocidade de perda de massa em relação à referência. Similarmente ao obtido por Bentz *et al.* (2001) e contrariando o comportamento dos concretos classe C80 e C60, tem-se a variação de perda de massa de água do concreto C40. O concreto referência apresentou perda de massa de água maior que os concretos com 1 e 2% de ARR. Para este caso, é importante observar que no C40_0 (referência) a tensão superficial é baixa face à alta a/agl (=0,63), muito provavelmente próxima às misturas com ARR, e assim é possível não valer o descrito por Alberty e Daniels (1980).

Com o objetivo de verificar estatisticamente a influência da classe e do teor de ARR sobre o fenômeno da retração por secagem, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) nas idades de 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56, 90, 120 e 130 dias. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 16.

Todos os fatores e as interações de dois ou mais fatores exercem influência significativa, mas o fator C (Idade) exerce o efeito mais marcante, o que era de se esperar. O próximo fator em importância é a classe de resistência. Contrariamente à retração autógena, em termos globais, a magnitude da retração por secagem apresentou-se maior na medida do aumento das relações a/agl (de 0,30 para 0,63), ou na diminuição dos níveis de classe de resistência. Na superfície do concreto de alta resistência (menor relação a/agl), a secagem desenvolve-se mais lentamente, porque o refinamento da estrutura de poros é maior, e também em razão de a água já ter sido drenada pelo processo de autodessecação. Por esse motivo, a retração por secagem é tão mais elevada quanto maiores forem as relações a/agl ou menores as classes de

resistência. Este comportamento é mostrado na Figura 64a, onde as linhas tracejadas verticais separam os grupos que diferem significativamente, obtidos a partir do teste de Duncan, com a comparação múltipla de médias.

Tabela 16 – Análise de variância dos resultados de retração por secagem

$R^2_{\text{mod}} = 0,99$						
Fonte	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor-p	Resultado
Efeitos principais						
A: Classe	59598	2	29799	1392,1	0,000000	Significativo
B: Teor de ARR	26421	2	13210	617,1	0,000000	Significativo
C: Idade	1307850	9	145317	6788,5	0,000000	Significativo
Interações						
AB	4945	4	1236	57,7	0,000000	Significativo
AC	73189	18	4066	189,9	0,000000	Significativo
BC	13042	18	725	33,8	0,000000	Significativo
ABC	3758	36	104	4,9	0,000040	Significativo
Erro (resíduo)	1927	90	21			
Total	1490728	179				

Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não; R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo.

O teor de aditivo redutor de retração - ARR também é um fator estatisticamente significativo, para um nível de significância de 0,05. Pode-se afirmar, então, que o teor de ARR exerce influência sobre o fenômeno da retração por secagem, formando três grupos distintos, pelo teste de comparação múltipla de médias, conforme apresentado na Figura 64b. Os valores médios globais para cada teor revelam que ao se adicionar o ARR aos concretos, consegue-se diminuir a retração por secagem. Este comportamento pode ser assim explicado (RONGBING e JIAN, 2004): quando a água evapora dos poros capilares do concreto endurecido durante a secagem, a tração no líquido é transferida para as paredes, resultando em retração; para uma dada estrutura de poro, a tensão interna gerada pela evaporação é proporcional à tensão superficial da solução do poro. *O ARR reduz a retração por secagem por diminuir a tensão superficial da água do poro no concreto.*

Na Figura 65 é mostrado, graficamente, o efeito da interação entre a classe de resistência e o teor de ARR. Para os concretos C40 e C60, 2% de ARR é mais eficaz para minimizar a retração por secagem, enquanto para o C80, os resultados médios de 1% e 2% mostraram-se praticamente iguais, sendo indiferente utilizar um ou outro destes dois teores; isto foi comprovado pelo teste de agrupamento de médias (Duncan) realizado para cada classe

independentemente, donde se obtiveram 03 grupos distintos de teor de ARR (0 ≠ 1 ≠ 2) para os concretos C40 e C60 e 02 grupos distintos [0 ≠(1= 2)] para os concretos C80. Vale aqui mencionar que este comportamento é similar ao comportamento dos resultados da retração autógena, demonstrando que os mecanismos de saída de água dos capilares para o ambiente ou para o processo de hidratação são semelhantes, como sugerido na revisão bibliográfica.

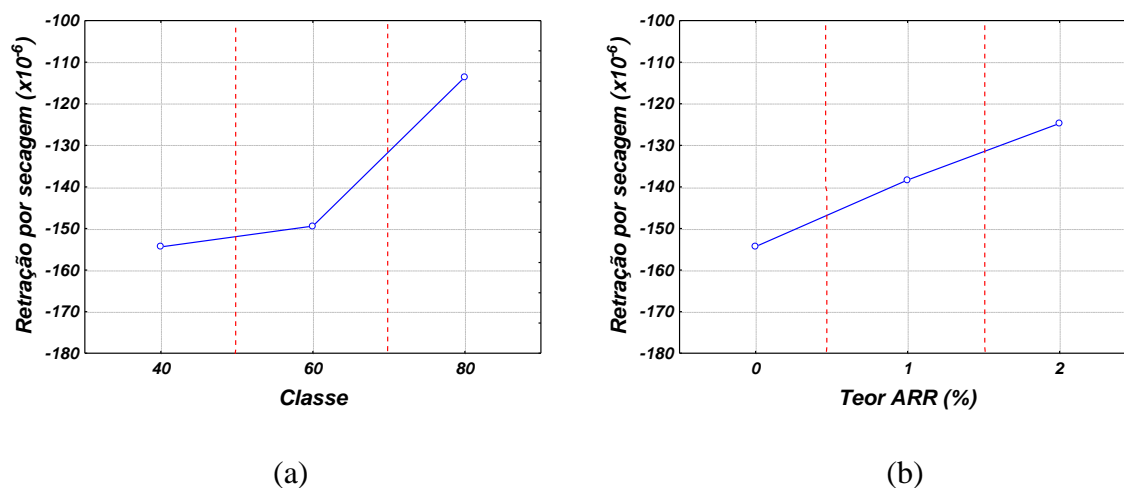


Figura 64 – Efeito da classe de resistência e do teor de ARR na retração por secagem dos concretos: (a) valores médios globais em função da classe de resistência e (b) valores médios globais em função do teor do ARR.

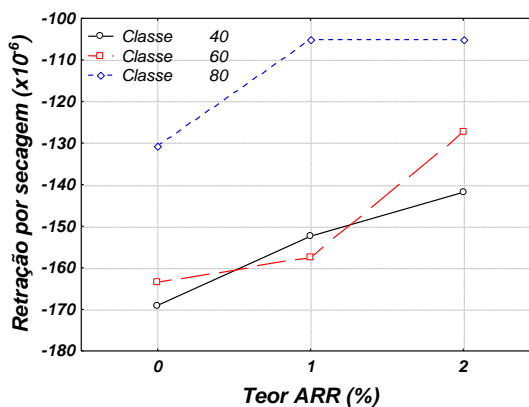


Figura 65 – Efeito da interação entre classe de resistência e teor de ARR na retração por secagem dos concretos estudados.

Na Tabela 17 estão apresentados os resultados médios da retração por secagem em diversas idades e o efeito do ARR em termos percentuais para cada uma dessas idades. Observa-se que aos 28 dias, a incorporação de 1% de ARR no concreto C80 e de 2% para as demais classes promoveu uma redução que variou de 21 a 30% em relação ao concreto referência (0%); aos 90 dias, a redução foi da ordem de 22% e aos 130 dias, 17%. Estes resultados estão próximos daqueles obtidos por Fonseca Silva (2007), nas mesmas idades: a autora, trabalhando com os

concretos C80 e C60, obteve com a adição de 2% de ARR uma redução média de 30% aos 7 e 28 dias, da ordem de 20% aos 90 dias e 15%, aos 120 dias.

A partir do emprego de 2% de ARR em argamassas e concreto, Rongbing e Jian (2005) obtiveram redução da retração por secagem variando de 30 a 40% aos 60 dias. Os estudos realizados por Quangphu *et al.* (2008) em concretos revelaram que ao se adicionar 1, 2 e 4% de ARR, obtém-se redução após 120 dias de secagem quando comparados com o concreto sem ARR, de 21, 35 e e 38% para relação a/c = 0,4 e 30, 37 e 41 % para a relação a/c = 0,22. Gettu *et al.* (2001), trabalhando com concretos com a/c = 0,45, sem adição mineral e teores de 1,5% e 2% de ARR (em relação à massa de cimento), obtiveram redução de até 50% na retração em relação ao concreto de referência. Ainda mencionam que os resultados obtidos para dosagem de 1,5% e 2% são praticamente idênticos, não justificando o uso da dosagem maior.

Tabela 17 – Resultados médios da retração por secagem em várias idades e o efeito do ARR

	Idade (dia)	C80_0	C80_1	C80_2	C60_0	C60_1	C60_2	C40_0	C40_1	C40_2
Retração por secagem ($\times 10^{-6}$)	1	-33	-25	-25	-26	-27	-24	-21	-21	-26
	3	-57	-46	-46	-57	-49	-54	-40	-40	-40
	7	-85	-74	-79	-102	-90	-71	-77	-76	-69
	28	-153	-121	-120	-195	-180	-136	-190	-166	-151
	90	-201	-157	-159	-272	-265	-205	-300	-262	-246
	130	-216	-177	-176	-287	-287	-234	-328	-298	-280
Varição da retração por secagem relativa ao concreto referência (%)	1	0	-24	-24	0	4	-8	0	0	24
	3	0	-19	-19	0	-14	-5	0	0	0
	7	0	-13	-7	0	-12	-30	0	-1	-10
	28	0	-21	-22	0	-8	-30	0	-13	-21
	90	0	-22	-21	0	-3	-25	0	-13	-18
	130	0	-18	-19	0	0	-18	0	-9	-15

5.1.5.3 Retração total (autógena + secagem)

Na Tabela 18 é apresentada uma estimativa da retração autógena + secagem dos concretos, com algumas hipóteses simplificadoras. A retração autógena é o resultado experimental determinado, desde o patamar de percolação, até a idade de 28 dias, em corpos de prova selados, descontando-se a deformação térmica. A retração por secagem é o resultado experimental, determinado a partir de 28 dias de cura submersa, até o término do ensaio (cerca de 130 dias).

Considerando inicialmente os concretos de referência, observa-se que a retração total dos concretos C80 e C60 é bastante próxima. Porém, a retração autógena do C80 é 20% maior que a do C60, enquanto para a secagem, o C80 apresentou-se menor 25%. Este comportamento pode tornar o C80 mais suscetível a fissurar nas primeiras idades (até 28 dias), caso não sejam tomadas medidas apropriadas no que se refere a projeto estrutural (ex: dimensões do elemento estrutural), técnicas construtivas, dosagem do concreto, temperatura de lançamento do concreto, uso de aditivo químico ou outra solução mitigadora da retração, conforme mencionado por Fonseca Silva (2007). O concreto C40 apresentou retração total cerca de 23% inferior às demais classes de concreto; entretanto, o valor de retração total não foi tão baixo devido à retração por secagem. Dessa forma para os concretos de relação a/agl mais altos, cuidados devem ser tomados para minimizar esse fenômeno. A incorporação de 2% de aditivo redutor de retração – ARR resultou na redução da retração total de aproximadamente 29% para os concretos C80 e C60 e de 18% para o C40.

Tabela 18 – Estimativa da retração autógena + retração por secagem dos concretos, com 130 dias, a partir dos resultados experimentais, $\times 10^{-6}$.

Concreto	Retração autógena (patamar até 28 dias)	Retração por secagem (de 28 dias a 130 dias)	Total
C80_0	-289	-216	-505
C60_0	-229	-287	-516
C40_0	-62	-328	-390
C80_2	-188	-176	-364
C60_2	-130	-234	-364
C40_2	-41	-280	-321

Observa-se portanto, que à medida que a resistência aumenta, a retração autógena aumenta e a retração por secagem diminui, tanto para concreto com como sem ARR. No entanto, a retração total se aproxima para as diferentes classes de concreto quando na presença do ARR, enquanto para os concretos sem ARR a retração total, de forma geral, aumenta com o aumento da classe de resistência do concreto.

5.1.6 Resistência à compressão

Na Tabela 19 estão apresentados os resultados médios de resistência à compressão determinada nas idades de 1, 3, 7, 28, 90 e 180 dias em corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm, bem como a variação percentual da resistência dos concretos com incorporação de 1 e 2% de ARR em relação ao concreto de referência. Os resultados individuais e os parâmetros estatísticos básicos encontram-se no Apêndice A.

Tabela 19 – Resistência à compressão nas várias idades e a influência do teor de ARR para todas as classes de concreto estudadas.

	Idade (dia)	C80_0	C80_1	C80_2	C60_0	C60_1	C60_2	C40_0	C40_1	C40_2
Resistência à compressão (MPa)	1	53,2	50,4	37,5	34,1	38,9	30,5	15,1	14,3	10,4
	3	68,5	65,4	64,8	54,5	47,8	48,1	28,5	26	23,4
	7	79,0	75,9	74,3	64,7	60,7	57,0	35,7	33,5	32,0
	28	90,3	90,2	85,5	71,4	76,2	70,6	50,2	40,1	43,7
	90	93,6	97,8	86,7	76,8	78,0	76,7	50,4	46,9	40,5
	180	90,9	89,9	93,4	77,2	76,9	77,5	46,4	48,2	44,3
Varição da resistência à compressão em relação ao referência (%)	1	0	-5	-30	0,0	14	-11	0	-5	-31
	3	0	-5	-5	0,0	-12	-12	0	-9	-18
	7	0	-4	-6	0,0	-6	-12	0	-6	-10
	28	0	0	-5	0,0	7	-1	0	-20	-13
	90	0	5	-7	0,0	2	0	0	-7	-20
	180	0	-1	3	0,0	0	0	0	4	-5

De uma maneira geral, observa-se que dada uma determinada idade, há uma perda de resistência maior para o teor de 2% de ARR para todas as classes de concreto. Esta redução na resistência à compressão é mais pronunciada nas primeiras idades.

Os resultados individuais de resistência à compressão foram submetidos à análise estatística de variância (ANOVA), buscando-se verificar, notadamente, a influência do ARR nessa propriedade. Na Tabela 20 resumem-se os resultados desta análise.

Tabela 20 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão

$R^2_{\text{mod}} = 0,99$						
Fonte	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor-p	Resultado
Efeitos principais						
A: Classe	51559,5	2	25779,8	5478,8	0,00000	Significativo
B: Teor de ARR	658,7	2	329,3	70,0	0,00000	Significativo
C: Idade	35857,0	5	7171,4	1524,1	0,00000	Significativo
Interações						
AB	70,6	4	17,6	3,7	0,00649	Significativo
AC	691,3	10	69,1	14,7	0,00000	Significativo
BC	305,5	10	30,5	6,5	0,00000	Significativo
ABC	479,5	20	24,0	5,1	0,00000	Significativo
Erro (resíduo)	583,5	124	4,7			
Total	95151,5	177				

Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não; R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo.

Como se pode observar, a classe e idade são os efeitos principais que afetam de forma mais significativa a variável de resposta – resistência à compressão, o que já era de se esperar. O teor de ARR também exerce influência significativa, embora menos intensa que os demais efeitos, assim como as interações duplas e triplas dos efeitos principais. As Figuras 66a e 66b demonstram a tendência de comportamento dessa propriedade quando incorporado o aditivo redutor de retração aos concretos estudados: a resistência à compressão diminui com o aumento do teor de ARR. Entretanto, pelo fato de as interações entre os efeitos principais terem dado também significativas, não se pode determinar claramente a intensidade dessa redução de resistência à compressão (Figura 66b). Na Figura 66a, as linhas verticais separam os três grupos de teor de ARR que diferem de forma significativa entre si, resultado da comparação múltipla de médias.

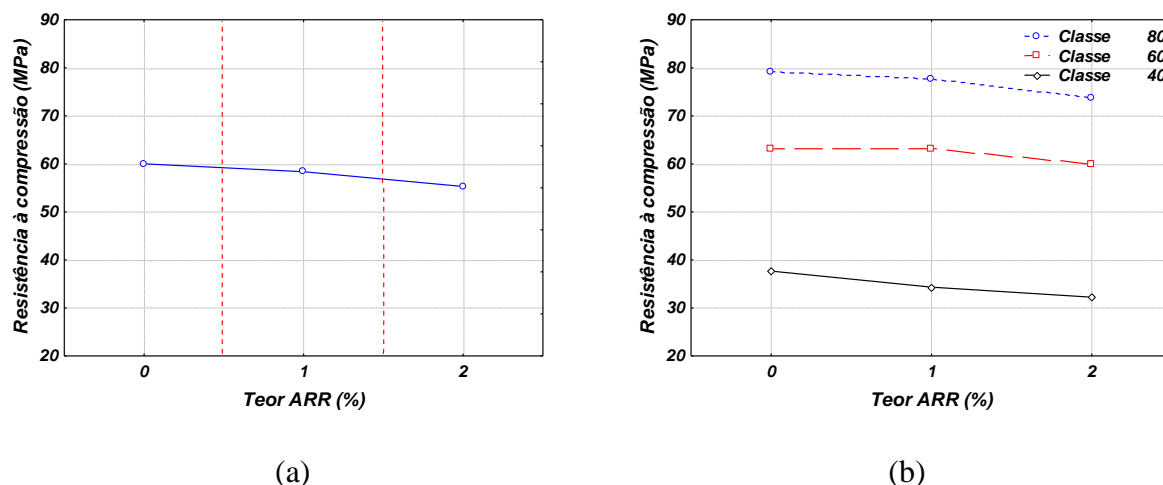


Figura 66 - Efeito do teor de ARR na resistência à compressão dos concretos: (a) valores médios globais em função do teor de ARR e (b) valores médios por classe em função do teor do ARR.

O efeito da interação entre teor de ARR, classe de resistência e idade (dias) está apresentado na Figura 67. Uma vez que a idade deu significativa para a propriedade estudada, o teste de Duncan, considerando todas as classes de concreto e todos os teores de ARR, indicou que as idades de 1, 3 e 7 dias formam 03 grupos distintos (diferem significativamente entre si), e as idades de 28, 90 e 180 dias formam um grupo somente, denotando que a resistência à compressão nestas idades são iguais, ou em outras palavras, não há crescimento significativo de resistência de 28 para 180 dias, como claramente demonstrado na Figura 67. Outro aspecto a ser comentado é que a incorporação do ARR praticamente não mudou a evolução da resistência com a idade, assim como observado também por Fonseca Silva (2007) nos seus concretos C60 e C80.

Considerando a variação da resistência à compressão em relação aos concretos sem ARR, conforme apresentado na Tabela 19, verifica-se que, de uma forma geral, o emprego do ARR resultou em maior redução da resistência à compressão para as classes de concreto C60 e C40, principalmente. Isso equivale dizer que à medida que se aumentou a relação a/agl , o efeito do ARR de comprometimento da resistência à compressão se tornou mais pronunciado. Esse efeito foi também observado nos estudos de Melo Neto (2008), nos quais o autor, trabalhando com argamassas com relações a/agl iguais a 0,40, 0,48 e 0,56 e teores de 0,5, 1, 1,5 e 2% de ARR, observou que o efeito conjunto do aumento do teor de ARR e o aumento da relação a/agl maximizou a redução da resistência à compressão.

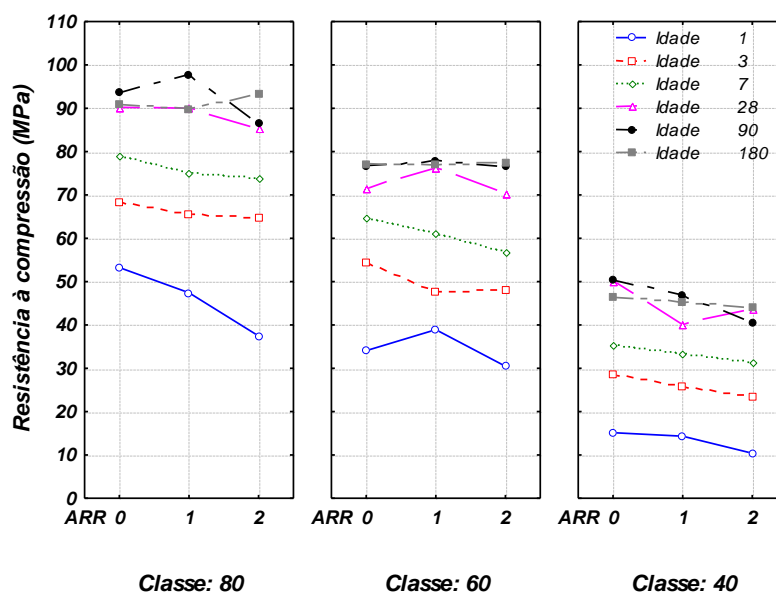


Figura 67 - Efeito da interação entre teor de ARR, classe de resistência e idade (dias) para os concretos investigados.

A perda de resistência à compressão dos concretos com o emprego do ARR (notadamente com teor de 2%), sendo o efeito ainda mais pronunciado nas primeiras idades, pode ser atribuída aos efeitos do ARR na hidratação inicial do cimento. De forma simplificada, este comportamento pode estar relacionado com a interferência do ARR que dificulta a dissolução dos álcalis, responsáveis por acelerar a hidratação, ocasionando uma redução na velocidade de hidratação (RAJABIPOUR et al., 2008) e por consequência, diminuindo também a resistência à compressão. Esta explicação é melhor discutida nos itens 5.1.2.1 e 5.2.2.

Embora a análise estatística acuse a influência significativa na resistência à compressão quando empregado o ARR, do ponto de vista prático, levando-se em conta a idade de controle, considerado para projeto - 28 dias, para os concretos C80 e C60 com 2% de ARR, a perda de resistência à compressão pode ser considerada pouco representativa face ao ganho com a diminuição da retração autóloga. Para a classe C40, o comprometimento da resistência à compressão é expressivo, notadamente aos 28 dias para o teor de 1% e para todas as idades com o teor de 2%; neste caso, o uso de ARR não é recomendado haja vista também a pouca eficiência do ARR em reduzir a retração.

Os estudos realizados por Fonseca Silva (2007) revelaram que aos 28 dias de idade, os concretos C80 apresentaram resistência à compressão média de 89,3, 90,7 e 84,5 MPa, enquanto os concretos C60 valores iguais à 67,3, 69,1 e 65,2, respectivamente para os concretos contendo 0, 1 e 2% de ARR. Nota-se que os resultados de resistência à compressão

dos concretos contendo ARR foram muito próximos aos valores dos respectivos concretos de referência (diferença inferior à 5%). Gettu e Roncero (2003) observaram que a incorporação de 1% e 2% de ARR a concretos de relação a/c igual a 0,4 resultou em redução de 6 e 9%, respectivamente, de resistência à compressão quando comparados ao referência, aos 365 dias de idade.

Folliard e Berke (1997), trabalhando com concreto de relação a/c igual a 0,35 e 8% de sílica ativa, verificaram que a adição de 1,5% de ARR tendeu a uma redução na resistência à compressão, especialmente com 1 dia de idade. Entretanto, em idades posteriores, a perda de resistência à compressão dos concretos contendo ARR foi somente de 8 a 9% menor que o concreto referência. Da mesma forma, Ribeiro *et al.* (2006), em estudos com argamassas contendo 1,5 e 2% de ARR, obteve uma diminuição na resistência à compressão destas argamassas comparada à de referência, da ordem de 13% com 2 dias e de 3% aos 28 dias de idade. O comportamento apresentado por estes pesquisadores está de acordo com o obtido nesta pesquisa.

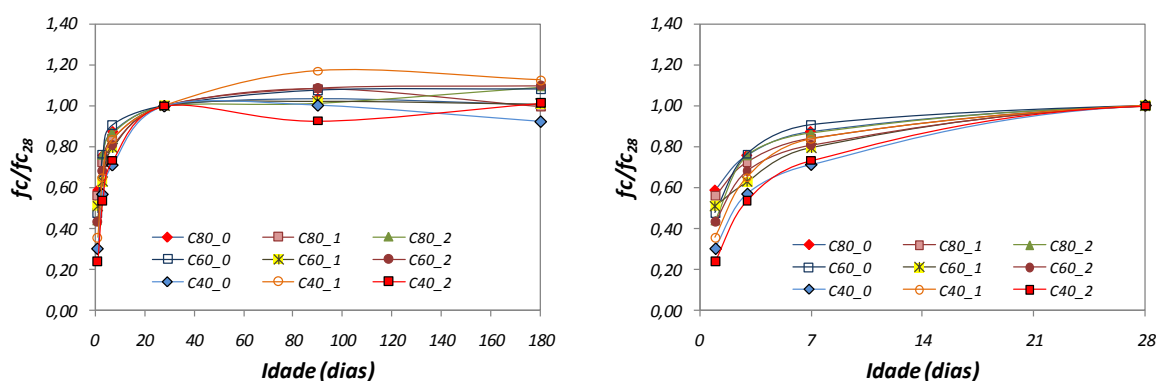
Cabe mencionar que com o propósito de avaliar a influência do ARR nas diversas propriedades, propôs-se manter a relação a/agl em todos os traços. Dessa forma, como no ARR a água está toda combinada, não se descontou da água da mistura, a água do aditivo redutor. Ao se adicionar 2% de ARR, obteve-se redução da resistência à compressão em maior ou menor grau para todas as classes de concreto. Principalmente para o C80 e C60, o abatimento foi ligeiramente maior. Com isso, se a quantidade de água da mistura for diminuída para atingir o abatimento mais próximo ao do concreto de referência, possivelmente a diferença na resistência à compressão poderia ser menos evidente.

5.1.6.1 Evolução da resistência à compressão em relação à idade de 28 dias

A Tabela 21 apresenta as resistências à compressão relativas à idade de 28 dias e a Figura 68 apresenta essa variação da relação f_c/f_{c28} , em função da idade para os concretos estudados. Como normalmente a idade de 28 dias é a referenciada, pois é quando assume-se que a estrutura pode suportar a totalidade do carregamento, a determinação deste parâmetro (f_c/f_{c28}) é importante do ponto de vista estrutural e para o planejamento de processos construtivos (desforma, escoramento e protensão).

Tabela 21 – Evolução da resistência à compressão em relação aos 28 dias (f_c/f_{c28})

Idade (dia)	C80_0	C80_1	C80_2	C60_0	C60_1	C60_2	C40_0	C40_1	C40_2
1	0,59	0,56	0,44	0,48	0,51	0,43	0,30	0,36	0,24
3	0,76	0,73	0,76	0,76	0,63	0,68	0,57	0,65	0,54
7	0,87	0,84	0,87	0,91	0,80	0,81	0,71	0,84	0,73
28	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
90	1,04	1,08	1,01	1,08	1,02	1,09	1,00	1,17	0,93
180	1,01	1,00	1,09	1,08	1,01	1,10	0,92	1,12	1,01



(b)

Figura 68 – Evolução do crescimento da resistência relativa aos 28 dias de idade: (a) nas diversas idades e (b) até 28 dias.

A evolução do crescimento de resistência relativo, em termos gerais, é próxima para os concretos classe C80 e C60. Já a do C40, mostra-se mais lenta em relação às demais classes, nas idades iniciais, provavelmente devido à alta relação a/agl . Quanto ao emprego do ARR, à exceção da idade de 1 dia, é possível observar para cada classe uma tendência muito próxima na evolução do crescimento da resistência para os concretos com teor de 0, 1 ou 2% de ARR, demonstrando que este aditivo não alterou a tendência de crescimento dos concretos. O comportamento obtido nesta pesquisa para os concretos C80 e C60 estão bastante coerentes com aqueles obtidos por Fonseca Silva (2007).

5.1.7 Resistência à tração

Os resultados de resistência à tração por compressão de diametral e na flexão são apresentados e discutidos a seguir, buscando verificar qual a influência sobre essas propriedades quando incorporado aos concretos o aditivo redutor de retração. Além disso, também são apresentadas as correlações entre estas propriedades e a resistência à compressão.

5.1.7.1 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados médios de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Tabela 22, bem como a variação relativa ao concreto de referência. No Apêndice A, encontram-se os valores individuais e os parâmetros estatísticos básicos.

Tabela 22 - Resistência à tração na compressão diametral dos concretos nas várias idades

	Idade (dia)	C80_0	C80_1	C80_2	C60_0	C60_1	C60_2	C40_0	C40_1	C40_2
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	1	3,9	3,4	3,5	2,7	2,9	2,8	1,7	1,9	1,5
	3	3,9	4,5	4,0	4,0	3,8	3,4	2,6	2,4	2,8
	7	5,1	4,9	4,5	3,9	4,1	3,9	3,3	2,9	2,9
	28	5,4	4,9	5,6	4,8	4,8	4,5	3,8	3,6	4,1
	90	5,7	5,2	5,5	4,5	5,3	4,8	3,6	3,7	3,8
	180	5,6	5,1	6,1	5,1	5,0	4,7	4,0	3,6	3,7
Varição da resistência à tração na compressão em relação ao referência (%)	1	0	-13	-10	0	7	4	0	12	-12
	3	0	15	3	0	-5	-15	0	-8	8
	7	0	-4	-12	0	5	0	0	-12	-12
	28	0	-9	4	0	0,0	-6	0	-5	8
	90	0	-9	-4	0	18	7	0	3	6
	180	0	-9	9	0	-2	-8	0	-10	-8

Considerando os concretos referência observa-se uma tendência de diminuição da tração por compressão diametral à medida que diminui a classe de resistência, como esperado. No que se refere ao efeito do aditivo redutor de retração – ARR, não há uma tendência clara de comportamento quanto a esta propriedade. Então, com o fim de se esclarecer, principalmente a influência do ARR na resistência à tração por compressão diametral, os valores individuais foram submetidos à análise de variância (ANOVA), cujos resultados estão resumidos na Tabela 23.

A análise estatística mostrou que o modelo fatorial (apresentado na Equação 11, item 4.14) adotado é significativo, e explica 91% da variação dos dados, uma vez que o $R^2_{\text{mod}}=0,91$. A análise de variância mostra que somente os efeitos principais - classe em maior grau e idade em menor grau - são estatisticamente significativos a um nível de 95% de confiança. A

presença de ARR nas misturas não influencia significativamente a resistência à tração por compressão diametral. Isto indica que os resultados para os concretos com 1 e 2% de ARR não são diferentes de forma significativa daqueles sem ARR.

Tabela 23 – Análise de variância dos resultados de resistência à tração por compressão diametral

$R^2_{\text{mod}} = 0,91$						
Fonte	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor-p	Resultado
Efeitos principais						
A: Classe	85,27	2	42,63	282,46	0,000000	Significativo
B: Teor de ARR	0,40	2	0,20	1,33	0,268451	Não Signif.
C: Idade	89,66	5	17,93	118,80	0,000000	Significativo
Interações						
AB	1,60	4	0,40	2,64	0,036921	Significativo
AC	1,026	10	0,103	0,68	0,741383	Não Signif.
BC	1,620	10	0,162	1,07	0,388027	Não Signif.
ABC	4,841	20	0,242	1,60	0,062549	Não Signif.
Erro (resíduo)	17,962	119	0,151			
Total	206,307	172				

Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não; R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo.

Na literatura encontram-se poucos estudos sobre a influência desse aditivo na resistência à tração por compressão dos concretos; notadamente nas primeiras idades, os estudos são raros. Entretanto, conclusão similar ao desta pesquisa foi obtido por Gettu e Roncero (2003), que não encontraram alteração significativa na resistência à tração por compressão diametral dos concretos de relação a/agl igual a 0,4, quando utilizados 1 e 2% de ARR. Os estudos realizados por Naik *et al.* (2006), que tinham por objetivo verificar a eficácia de 03 tipos de ARR em reduzir retração autógena e secagem de concretos com 35% de cinza volante e relações a/agl 0,3 e 0,4, também mostraram que, de forma geral, a resistência à tração por compressão diametral não foi afetada na presença do ARR. Por outro lado, Quangphu *et al.* (2008) encontraram perdas sistemáticas da resistência à tração por compressão diametral nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias com o emprego do ARR comparado ao concreto referência: da ordem de 3 a 9% para 1% de ARR, de 3 a 16% para 2% de ARR e de 5 a 19% para 4% de ARR para concretos com relação a/agl igual a 0,4 e 0,2.

As Figuras 69a e 69b mostram, respectivamente, a influência da classe (ou relação a/agl) e da idade na resistência à tração por compressão diametral. Para a classe, as linhas verticais definem os 03 grupos distintos que diferem significativamente entre-si: esta propriedade aumenta com a diminuição da relação a/agl, ou com o crescimento da classe de resistência,

comprovando o que já era esperado. Com relação à idade, a comparação múltipla de médias revelou que os resultados nas idades de 1, 3 e 7 dias são diferentes e cada uma forma um grupo distinto; no entanto, as idades de 28, 90 e 180 dias formam um só grupo. Assim como na resistência à compressão, não há crescimento significativo de resistência à tração por compressão diametral de 28 para 180 dias, como pode ser verificado na Figura 69b.

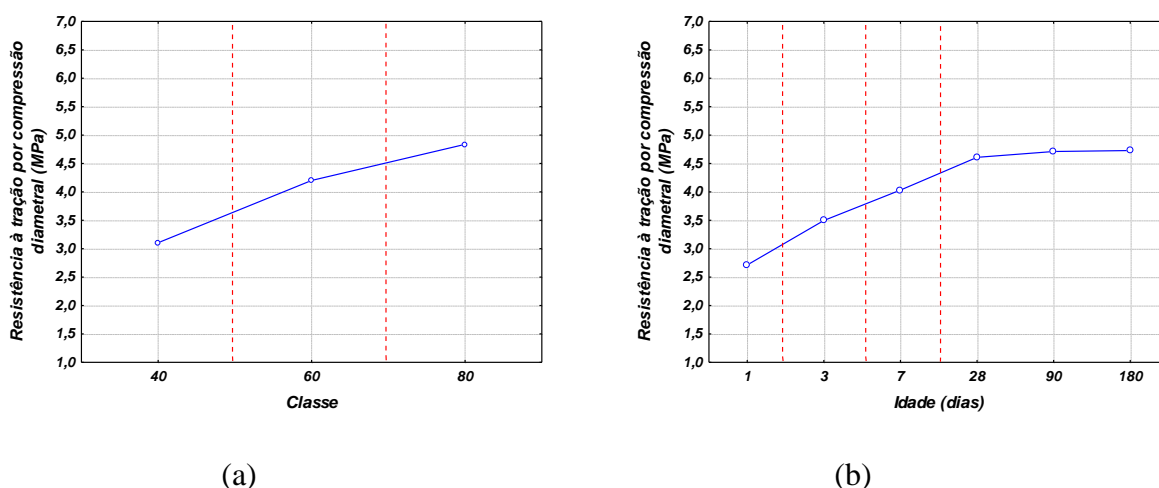


Figura 69 – Influência da classe (a) e da idade (b) na resistência à tração por compressão diametral dos concretos .

5.1.7.2 Resistência à tração na flexão

Na Tabela 24 veem-se os resultados médios da resistência à tração na flexão nas várias idades e a influência do teor de ARR, em termos de variação relativa ao concreto sem ARR, para todas as classes de concreto estudadas. Os resultados individuais encontram-se no Apêndice A.

Assim como na resistência à tração por compressão diametral, na resistência à tração na flexão não há uma tendência definida de comportamento quanto à utilização do ARR. Tampouco, a influência do aditivo redutor na resistência à tração na flexão foi similar à resistência à tração por compressão diametral. É importante comentar que para essa propriedade mecânica foram utilizados 02 corpos de prova para praticamente todas as idades, com exceção para 28 dias, para a qual utilizaram-se 04 corpos de prova. O fato de utilizar 02 corpos de prova não invalida a análise tendo em vista que em geral a variabilidade não foi tão expressiva (a maioria dos resultados muito abaixo de 10%, e apenas 04 resultados médios com variabilidade entre 10 e 14%), além disso, uma análise estatística do projeto fatorial,

contemplando todos os resultados individuais - amostra representativa com 107 pontos bem distribuídos - permite tirar conclusões gerais tanto dos efeitos individuais das variáveis estudadas como das interações entre elas.

Tabela 24 – Resistência à tração na flexão nas várias idades e a influência do teor de ARR para todas as classes de concreto estudadas

	Idade (dia)	C80_0	C80_1	C80_2	C60_0	C60_1	C60_2	C40_0	C40_1	C40_2
Resistência à tração na flexão (MPa)	3	6,5	5,7	5,7	5,3	4,8	4,6	3,0	3,8	3,9
	7	6,7	6,1	6,6	6,0	5,4	5,1	3,6	4,2	4,2
	28	7,9	8,1	8,0	7,3	7,5	7,5	5,6	4,6	5,1
	90	8,5	9,2	8,9	7,2	7,2	6,3	4,8	5,2	5,6
	180	7,5	8,4	9,2	7,7	7,2	6,8	5,4	5,1	5,1
Variação da resistência à tração na flexão em relação ao referênci a (%)	3	0	-12	-12	0	-9	-13	0	27	30
	7	0	-9	-2	0	-10	-15	0	17	17
	28	0	3	1	0	4	4	0	-18	-9
	90	0	8	5	0	0	-13	0	8	17
	180	0	12	23	0	-7	-12	0	-6	-6

A análise de variância (ANOVA), a que os resultados individuais de resistência à tração na flexão foram submetidos, pode contribuir para considerações mais consistentes sobre a influência dos efeitos principais – classe e idade, mas principalmente sobre o ARR nas misturas, objeto principal do estudo. A Tabela 25 resume os resultados.

Tabela 25 – Análise de variância dos resultados de resistência à tração na flexão

$R^2_{\text{mod}} = 0,97$						
Fonte	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor-p	Resultado
Efeitos principais						
A: Classe	141,616	2	70,808	717,20	0,000000	Significativo
B: Teor de ARR	0,060	2	0,030	0,30	0,738469	Não Signif.
C: Idade	83,777	4	20,944	212,14	0,000000	Significativo
Interações						
AB	3,732	4	0,933	9,45	0,000005	Significativo
AC	5,717	8	0,715	7,24	0,000001	Significativo
BC	0,913	8	0,114	1,16	0,339677	Não Signif.
ABC	9,445	16	0,590	5,98	0,000000	Significativo
Erro (resíduo)	6,121	62	0,099			
Total	262,950	106				

Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não; R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo.

Com base na análise de variância, constata-se que não houve diferença significativa entre os resultados de resistência à tração na flexão dos concretos sem ARR e aqueles com 1 ou 2% de ARR, para um nível de significância de 0,05. Em outras palavras, assim como na resistência à tração por compressão diametral, a presença de ARR revelou não exercer influência sobre a resistência à tração na flexão dos concretos estudados.

Entretanto, os demais efeitos individuais - *classe* e a *idade* – como esperado, mostram-se significativos para a propriedade analisada, sendo a classe o efeito de maior relevância estatística. Quanto maior o nível de resistência da classe ou menor relação a/agl, maior a resistência à tração na flexão. A Figura 70a apresenta este efeito e mostra ainda as 03 classes formando 03 grupos distintos definidos pelo agrupamento de médias (Teste de Duncan), separados pelas linhas tracejadas verticais. A comparação múltipla de médias para a idade acusa 03 grupos distintos, diferindo significativamente entre eles: as idades de 3 e 7 dias, cada uma formando um grupo, isto revela que os resultados de resistência à tração em cada uma dessas idades são diferentes; por outro lado as idades de 28, 90 e 180 dias formam um só grupo, demonstrando que os resultados nestas idades não diferem entre si e que não há crescimento de resistência à tração de 28 para 180 dias, assim como ocorreu na resistência à tração na compressão diametral. Este comportamento pode ser visto na Figura 70b.

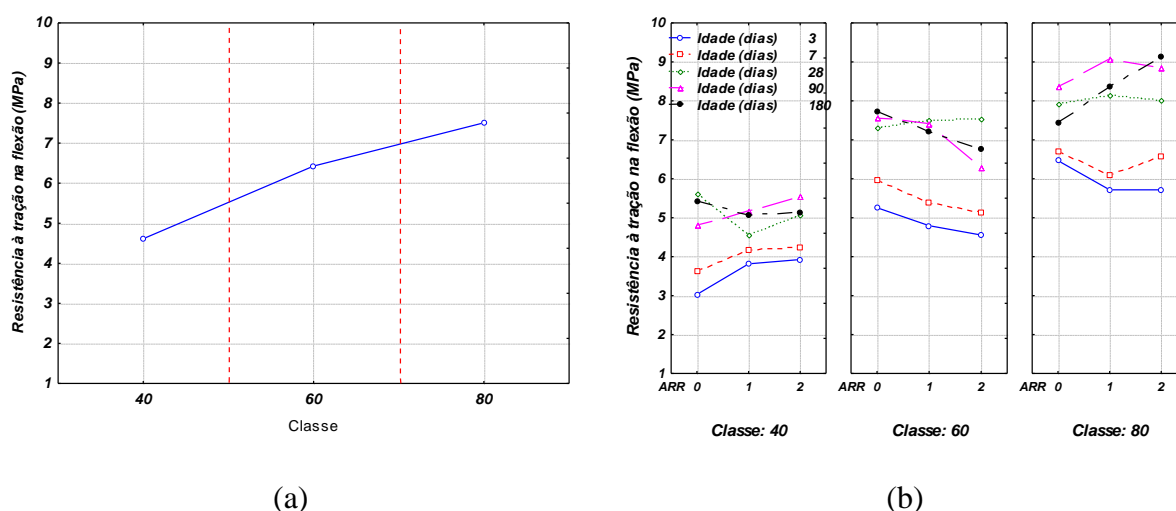


Figura 70 – Influência da classe (a) e a interação dos 03 fatores (b) na resistência à tração na flexão dos concretos

Quanto às interações duplas e triplas, verifica-se uma sinergia de fatores, evidenciada pelo resultado estatisticamente significativo das interações classe com ARR, classe com idade, e

entre os três fatores, demonstrando que o efeito que uma variável exerce sobre a resistência à tração na flexão depende da outra variável associada a ela.

É indispensável mencionar que uma das contribuições desta pesquisa é a influência do aditivo redutor de retração nas propriedades do concreto, principalmente na resistência à tração nas idades iniciais. Quanto à resistência à tração na flexão, há muito pouca informação dessa natureza na literatura. Encontraram-se os estudos desenvolvidos por Melo Neto (2008), em sua tese de doutorado avaliando a influência do aditivo redutor de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada. Para a resistência à tração na flexão, trabalhou com argamassas com relações a/c igual a 0,4, 0,48 e 0,56 com teores de 0,5%, 1%, 1,5% e 2% do ARR. De uma forma geral, ocorreu redução na resistência à tração na flexão para todas as relações a/c, gradativamente maior à medida que se aumentou o teor de ARR, quando comparado ao concreto de referência. Este comportamento foi muito mais acentuado para a idade de 1 dia.

5.1.8 Relação entre resistência à tração na compressão diametral e resistência à compressão

Embora não seja o objetivo principal deste estudo, a correlação entre as grandezas é importante sob o ponto de vista prático, uma vez que nem sempre é possível a realização de ensaios para a determinação de todas as propriedades, e considerando a base de dados obtida nesta pesquisa não se pode prescindir deste tipo de análise, pela contribuição que pode ser dada em aumentar a base de dados para se encontrar a real correlação entre tais grandezas. Assim, a partir dos resultados médios obtidos experimentalmente para todas as condições de concretos estudadas, estabeleceu-se a correlação geral entre a resistência à tração por compressão diametral ($f_{t_{sp}}$) e a resistência à compressão (f_c), apresentada na Figura 71, juntamente com a equação determinada por regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados.

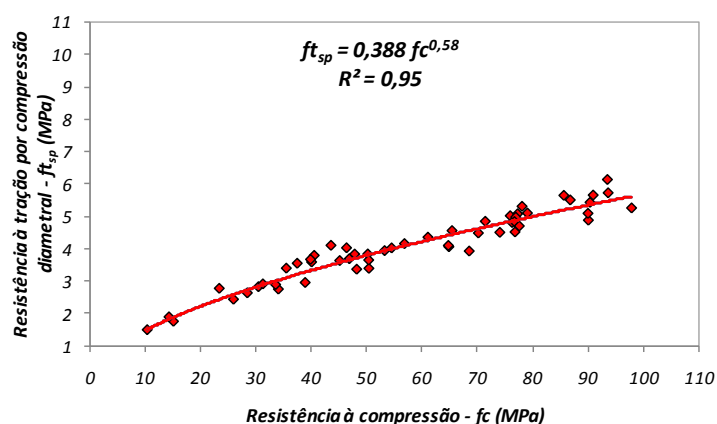


Figura 71 – Correlação entre os valores de $f_{t_{sp}}$ e f_c obtidos experimentalmente e a equação A Equação 14 expressa com consistência a relação entre estas duas propriedades, o que reflete no alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,95$). Na Figura 72 é mostrada uma comparação entre a correlação $f_{t_{sp}}$ e f_c obtida neste trabalho e aquelas obtidas na literatura técnica. Vale lembrar que as expressões de correlação disponíveis na literatura foram determinadas para concretos com classes de resistência diferentes das desta pesquisa e com materiais constituintes também diferenciados.

$$f_{t_{sp}} = 0,388 f_c^{0,58} \quad \text{Equação 14}$$

A curva proposta neste trabalho é muito próxima das curvas propostas por Carrasquillo et al. (1981) e Ahmad e Shah (1985) citados por Aïtcin (2000) e Fonseca Silva (1997), porém nota-se que o ACI 363 (1984) superestima os valores de $f_{t_{sp}}$ a partir da resistência à compressão quando comparados aos demais estudos. Cabe aqui citar que as expressões de Fonseca Silva (1997) são estabelecidas para concretos com f_c variando de 35 – 110 MPa, as de Carrasquillo et al. (1981) e ACI 363 (1984) para o intervalo de 20 – 90 MPa aproximadamente e Ahmad e Shah (1985) para f_c menores que 84 MPa. Dessa forma, os valores previstos de $f_{t_{sp}}$ a partir de f_c fora do intervalo de resistência à compressão especificado por cada pesquisador são na verdade extrapolações das equações propostas para que fosse possível a comparação entre as diversas formulações.

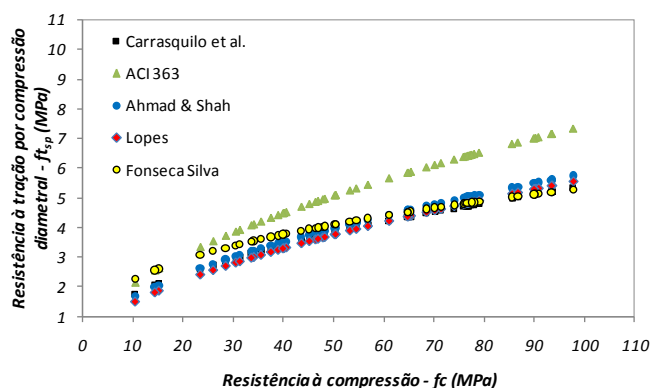


Figura 72 – Comparação entre os modelos de previsão de resistência à tração por compressão diametral ($f_{t_{sp}}$) a partir da resistência à compressão (f_c)

Ainda é importante comentar sobre a relação $f_{t_{sp}} / f_c$, dada em percentual. A literatura (MEHTA e MONTEIRO, 2008, entre outros) indica que esta relação diminui com o aumento da resistência à compressão. Este comportamento é bastante consistente com os encontrados neste estudo (Figura 73): para os concretos classe C80, a $f_{t_{sp}}$ ficou em torno de 6% da f_c , a classe C60, com $f_{t_{sp}} / f_c$ aproximadamente igual a 7%, e a classe C40, com esta relação variando em torno de 9%. Para os concretos C80 e C60, não há diferença expressiva entre os concretos com e sem ARR, mas para a classe C40, há alguma dispersão entre os concretos com e sem ARR, para a relação aqui discutida; ressalte-se que para estes concretos na idade de 1 dia, $f_{t_{sp}} / f_c$ variou de 11 a 13%.

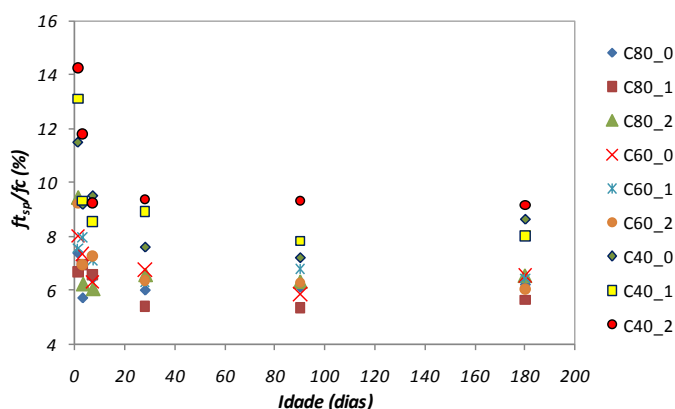


Figura 73 – Variação da relação $f_{t_{sp}} / f_c$ em função da idade para os concretos estudados.

A relação média entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão, aos 28 dias, variou de 6 a 9%, dentro do intervalo de 5% a 10% obtido por outros pesquisadores entre eles Lopes (1999) e Fonseca Silva (1997).

5.1.8.1 Relação entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão

Correlacionando-se os valores médios obtidos de resistência à tração na flexão (ou módulo de ruptura) - f_r com a resistência à compressão - f_c para todas as situações de concretos estudadas, obteve-se a Equação 15.

$$f_r = 0,071f_c + 1,696 \quad \text{Equação 15}$$

Na Figura 74 apresenta-se a correlação entre os valores obtidos experimentalmente nesta pesquisa e a respectiva expressão matemática, determinada por regressão linear a partir do método dos mínimos quadrados.

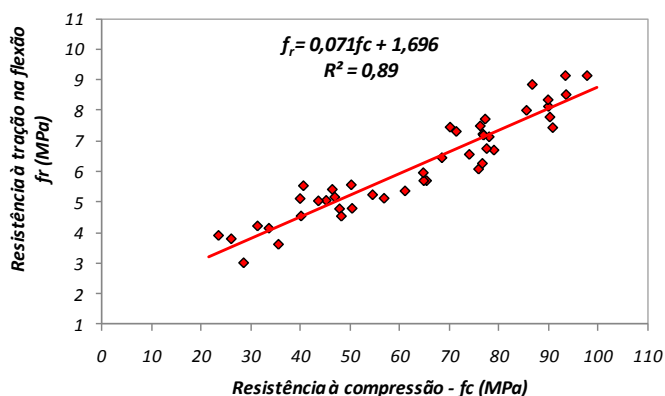


Figura 74 - Correlação entre os valores de f_r e f_c obtidos experimentalmente

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,89$) expressa uma correlação forte entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão dada pela Equação 15. A comparação entre o modelo de predição de f_r obtido a partir de f_c desta pesquisa com as de outros estudos está apresentada na Figura 75.

A curva proposta neste trabalho se aproxima daquelas propostas por Fonseca Silva (1997) e Khayat et al.(1995) citado por Aïtcin (2000) até cerca de 60 MPa de resistência à compressão. A partir daí, a curva subestima os valores de f_r , embora não de forma expressiva, quando comparados aos demais pesquisadores.

A relação f_r/f_c dos concretos aqui estudados ficou em torno de 9% para os concretos C80 e C60 e de aproximadamente 12% para os concretos C40, conforme demonstrada na Figura 76.

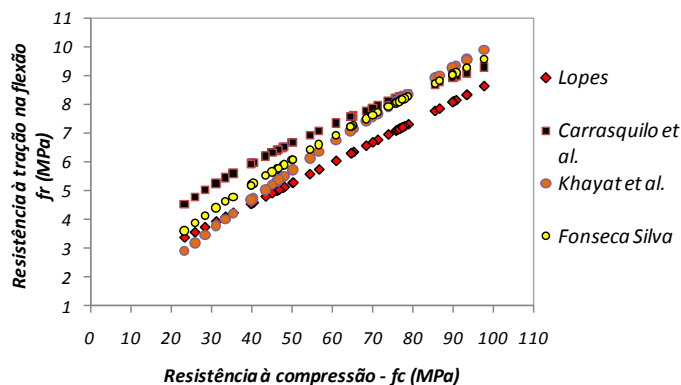


Figura 75 – Comparação entre os modelos de predição de resistência à tração na flexão (f_r) a partir da resistência à compressão (f_c)

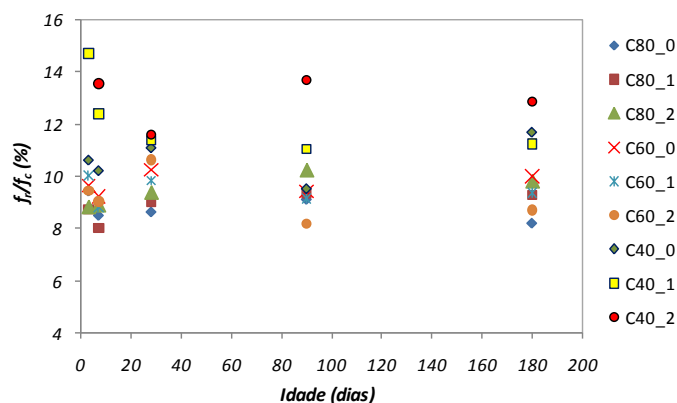


Figura 76 – Variação da relação f_r/f_c em função da idade para os concretos estudados.

Sobre as correlações entre a resistência à compressão e a resistência à tração indireta (seja por compressão diametral ou na flexão) apresentadas com a determinação de expressões matemáticas, é válido ressaltar que são úteis porque normalmente os projetistas reduzem as propriedades mecânicas às correlações com a resistência à compressão. Nisto se baseia a correlações previstas nos códigos (ABNT, ASTM, ACI, entre outros). Todavia, sempre que possível, em se tratando de concretos de altas resistências, não se deve prescindir das determinações diretas das propriedades mecânicas.

5.1.9 Módulo de elasticidade

Os valores médios do módulo de elasticidade estão apresentados na Tabela 26, bem como a variação desta propriedade dos concretos com aditivo redutor de retração – ARR em relação ao concreto referência – sem ARR. Os resultados individuais e parâmetros estatísticos encontram-se no Apêndice A. Utilizaram-se 03 corpos de prova por idade e os coeficientes de

variação em geral apresentam-se baixos (intervalo de 0 a 9,3%). Com o teste de Dixon, os valores espúrios (em duas situações) foram excluídos das análises.

Tabela 26 – Módulo de elasticidade nas várias idades e a influência do teor de ARR para todas as classes de concreto estudadas

	Idade (dia)	C80_0	C80_1	C80_2	C60_0	C60_1	C60_2	C40_0	C40_1	C40_2
Módulo de elasticidade (GPa)	1	27,0	27,2	23,3	23,3	21,9	23,1	15,1	16,1	14,4
	3	30,4	30,6	28,9	28,1	27,1	26,5	21,0	19,5	19,5
	7	30,9	32,7	31,1	31,1	28,1	28,6	24,3	21,7	24,5
	28	35,2	34,7	34,0	32,5	32,1	31,7	28,7	29,0	27,2
	90	34,9	34,7	33,9	32,9	31,3	31,5	31,0	28,1	29,9
	180	34,9	35,6	35,1	32,1	31,6	32,6	31,3	37,1	34,4
Varição do módulo de elasticidade em relação ao referência (%)	1	0	1	-14	0	-6	-1	0	7	-5
	3	0	1	-5	0	-4	-6	0	-7	-7
	7	0	6	1	0	-10	-8	0	-11	1
	28	0	-1	-3	0	-1	-2	0	1	-5
	90	0	0	-3	0	-5	-4	0	-9	-3
	180	0	2	0	0	-1	1	0	18	10

Como se pode constatar a incorporação do aditivo redutor de retração tanto no teor de 1% quanto como no de 2% parece não influenciar de forma muito expressiva o módulo de elasticidade. Embora existam diferenças numéricas entre os valores encontrados para os concretos com ARR e o concreto referência, tais valores estão próximos e não diferenciam de forma relevante entre si. Este comportamento é observado para todas as classes de concreto. A maior redução (13,7%) ocorreu com 2% de ARR para o C80 com 1 dia de idade, quando para o concreto de referência atingiu-se 27 GPa de módulo de elasticidade contra os 23,3 GPa para o concreto com 2% de ARR. Ainda para o C80, houve um pequeno incremento de módulo aos 7 dias de idade para o concreto com 1% de ARR, porém aos 28 dias, houve uma irrelevante redução no módulo para ambos os teores, ao se comparar com o referência.

Para a classe de concreto C60, praticamente em todas as idades para os dois teores de ARR, ocorreu uma redução de módulo, contudo mais pronunciado aos 7 dias, com 10% e 8% para 1 e 2% de ARR em relação ao concreto sem ARR, respectivamente. Nas demais idades, o uso do ARR incorreu em valores ligeiramente inferiores de módulo comparado ao concreto de referência. Já na classe C40, houve uma maior redução aos 7 e 91 dias com 1% de ARR. Aos 28 dias, o uso de ARR praticamente não comprometeu o valor do módulo. Os resultados com ARR aos 180 dias são totalmente inesperados, não havendo uma explicação satisfatória para tal comportamento.

A fim de melhor esclarecer o comportamento dos concretos estudados frente à incorporação do ARR, no tocante ao módulo de elasticidade, submeteram-se os resultados individuais à uma análise de variância (ANOVA), cujo resumo encontra-se na Tabela 27.

Tabela 27 – Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade

$R^2_{\text{mod}} = 0,96$						
Fonte	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor-p	Resultado
Efeitos principais						
A: Classe	1242,2	2	621,1	411,99	0,000000	Significativo
B: Teor de ARR	17,8	2	8,9	5,92	0,003658	Significativo
C: Idade	2951,4	5	590,3	391,55	0,000000	Significativo
Interações						
AB	24,6	4	6,1	4,07	0,004107	Significativo
AC	372,4	10	37,2	24,70	0,000000	Significativo
BC	51,1	10	5,1	3,39	0,000712	Significativo
ABC	74,7	20	3,7	2,48	0,001517	Significativo
Erro (resíduo)	161,3	107	1,5			
Total	4999,8	160				

Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não; R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo.

Todos os efeitos principais e interações entre eles mostraram-se significativos, porém dos efeitos principais, a classe de resistência e a idade apresentaram maior relevância estatística. O teor de ARR exerce influência sobre o módulo de elasticidade, mas em pequena intensidade. A partir desse resultado, fez-se o teste de Duncan (comparação múltipla de médias) para os efeitos principais, do qual se obteve que quanto ao ARR, formam-se dois grupos, um com o teor de 0 e 1% e o outro com o 2%, denotando que não há diferença significativa entre os concretos sem ARR e aqueles com 1% de ARR, entretanto, o teor de 2% de ARR tende a provocar uma leve redução no módulo de elasticidade. A Figura 77a apresenta o efeito do teor de ARR no módulo e a linha tracejada vertical separa os dois grupos. Há que se ressaltar, contudo, que embora estatisticamente tenha se obtido diferenças

no módulo de elasticidade para concretos com 2% de ARR e os concretos referência – 0% ARR, do ponto de vista da engenharia, os resultados obtidos para ambos são bastante similares.

No que se refere à classe, a comparação múltipla de médias, conforme esperado, apontou 03 grupos distintos, cada um diferenciando-se significativamente entre si. Quanto à idade, tem-se 04 grupos: as idades de 1, 3 e 7 formam cada uma um grupo, as idades de 28 e 90 pertencem ao mesmo grupo, e a idade de 180 dias, forma um outro grupo. Entretanto, esse resultado de 180 dias é devido aos resultados questionáveis de módulo dos concretos classe C40 com ARR. Tomando por base somente os concretos classe C60 e C80, as idades de 28, 90 e 180 dias formam um só grupo, indicando que não há crescimento expressivo de módulo de elasticidade de 28 para 180 dias, conforme pode ser visto na Figura 77b.

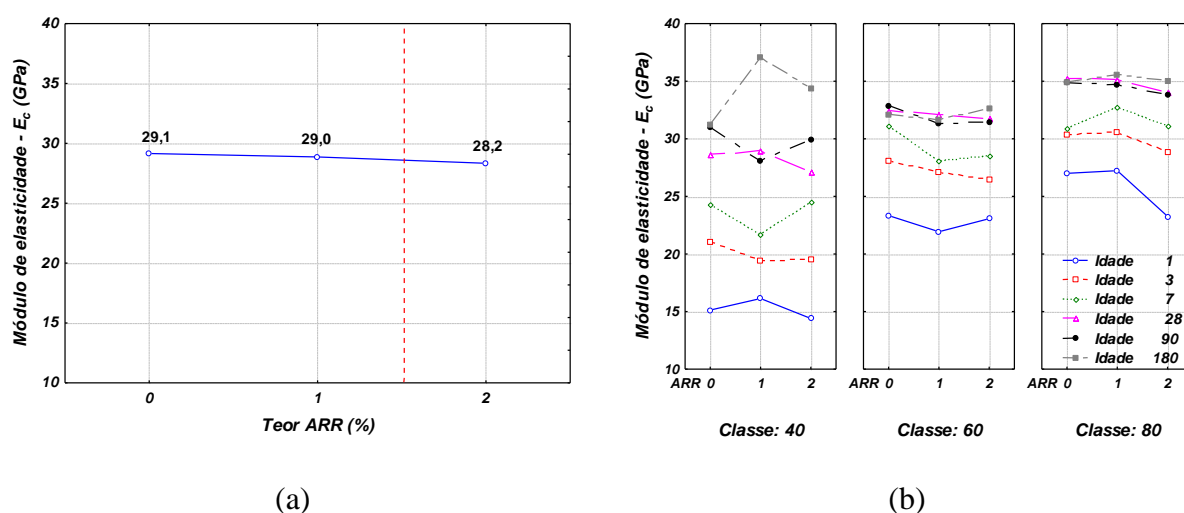


Figura 77 – Influência do ARR (a) e a interação dos 03 fatores – ARR, idade (dias) e classe de resistência (b) no módulo de elasticidade dos concretos

Folliard e Berke (1997) obtiveram redução de módulo de elasticidade para concretos de relação a/c igual a 0,35 com 1,5% de ARR da ordem de 7%, comparado ao concreto de controle. Já os concretos de relação a/c igual a 0,3 e 8% de sílica ativa, contendo aditivo redutor, apresentaram módulo de elasticidade 8% inferior ao concreto de referência, aos 28 dias. Fonseca Silva (2007) obteve para os concretos C80_0, C80_1 e C80_2, aos 28 dias, valores de módulo de elasticidade iguais a 35,9 GPa, 34,8 GPa e 35,8 GPa, e para os concretos C60_0, C60_1 e C60_2, 30,3 GPa, 30,1 GPa e 30,2 GPa, respectivamente. Nos concretos C80 e C60, a diferença percentual entre o maior e o menor valor foi de no máximo

3%, indicando que a presença do ARR não alterou o módulo de elasticidade dos concretos, nos teores usados na pesquisa. Quangphu *et al.* (2008) trabalharam com concretos de relação a/c igual a 0,4 e 0,22, com teores de ARR de 1%, 2% e 4%. O módulo de elasticidade foi determinado na idade de 7 e 28 dias para todas as 08 misturas. A conclusão dos pesquisadores foi que o efeito da incorporação do ARR é insignificante para as misturas com 1% e 2%, isto é, o módulo pouco se altera com o uso do aditivo redutor de retração. Tal conclusão é a mesma desta pesquisa.

5.1.9.1 Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão

Assim como nas correlações entre resistência à tração indireta e resistência à compressão, embora não sendo o objetivo inicial, é útil estabelecer a correlação entre o módulo de elasticidade e resistência à compressão, para situações em que a determinação do módulo é impraticável, e quando as situações – níveis de resistência e materiais constituintes, por exemplo, forem similares aos desta pesquisa. Com isto, levando-se em conta os resultados médios obtidos para todos os concretos estudados, definiu-se a correlação entre módulo de elasticidade (E_c) e resistência à compressão (f_c), nos termos da Equação 16.

$$E_c = 5,5381f_c^{0,4088} \quad \text{Equação 16}$$

A Figura 78 apresenta a comparação entre a curva proposta de predição do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão obtida nesta pesquisa e a NBR 6118 (2003) e outros pesquisadores (CARRASQUILLO *et al.*, 1981 e ACI 363, GARDNER e ZHAO, 1991, citados por AÏTCIN, 2000).

Em geral, observa-se que o modelo de predição definido nesta pesquisa determina valores de módulo de elasticidade abaixo dos outros pesquisadores e das normas. Apesar de que apresenta uma tendência de crescimento similar aos dos pesquisadores mencionados. Quanto à norma brasileira – NBR 6118, a equação nela apresentada deve ser aplicada, no máximo, para classes de concreto C50; assim, a curva acima de 50 MPa representa uma extrapolação para efeito de comparação.

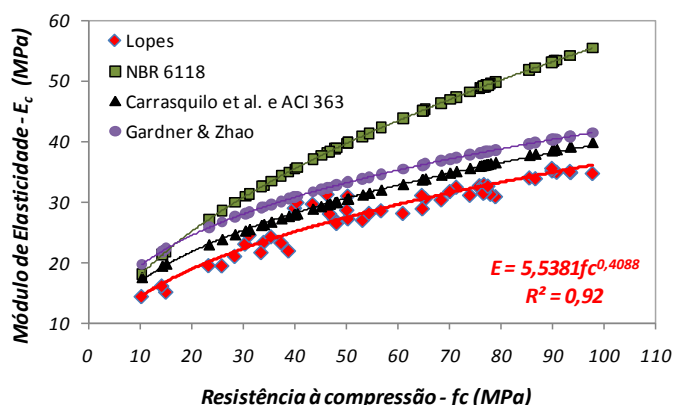


Figura 78 – Correlação entre o módulo de elasticidade (E_c) e a resistência à compressão (f_c) obtidos experimentalmente e a comparação com outros pesquisadores e a NBR 6118.

5.1.10 Fluência básica dos concretos

A fluência total, que é o resultado da soma da *fluência básica* (deformação que ocorre ao longo do tempo sob ação de um carregamento e sem trocas de umidade com o meio) mais a *fluência por secagem* (deformação adicional de um concreto sob carregamento e exposto a um ambiente de baixa umidade relativa), é comumente designada como fluência, ou seja, é a deformação sob carga. Entretanto, a fluência determinada no ensaio, objeto desta análise, é a fluência básica que será retratada por meio de um coeficiente obtido a partir do ajuste de uma curva em relação aos resultados de ensaios. Segundo Santos (2010), este coeficiente (F_j) representa a taxa com que o concreto se deforma por fluência básica junto ao logaritmo do tempo para uma determinada idade de início de aplicação da carga de ensaio j , conforme ilustrado na Figura 79. A expressão, denominada função de fluência ($J(t-t_0)$), composta por esse coeficiente (F_j) retorna a fluência específica, que equivale à deformação pela fluência por unidade de tensão, admitindo o princípio da superposição de efeitos, válido para representar o fenômeno da fluência em outros níveis de tensão dentro do limite de linearidade, normalmente aceito até no máximo 30% a 40% da resistência mecânica do concreto na idade de início do carregamento.

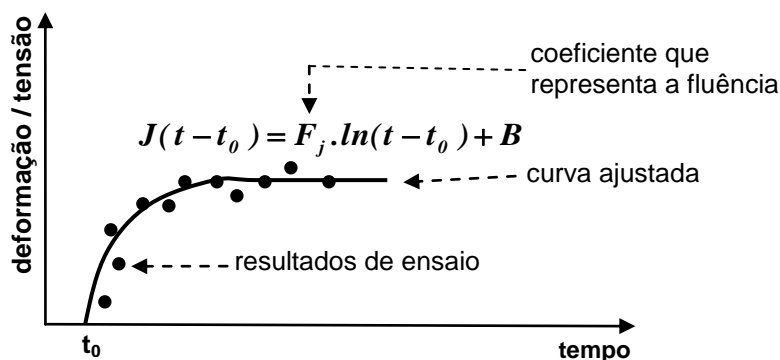


Figura 79 – Representação da fluência básica a partir dos resultados dos ensaios (SANTOS, 2010)

Os resultados de fluência constam da Tabela 28 e da Figura 80. Os resultados apresentados sofreram dois tratamentos: foi descontado o efeito da retração autógena e ainda, para que a relação tensão aplicada pela resistência fosse mantida fixa, os resultados de fluência foram corrigidos levando-se em conta o crescimento de resistência à compressão (nas várias idades), uma vez que por limitação do ensaio, a carga no início do ensaio, em torno de 40% da resistência à compressão, é aplicada e mantida constante até a idade de 90 dias. Esta correção é defendida por Neville (1997) e Santos (2010), pois, uma vez não realizada, os resultados de fluência podem ser subestimados.

Considerando-se a idade de início de carregamento (t_0) de 7 dias, observa que há uma diferença bastante relevante entre os concretos C80 e C60 em relação ao emprego do aditivo redutor de retração – ARR. Para o concreto classe C80, o ARR, independentemente do teor, não afeta o comportamento dos concretos frente à fluência. As taxas de deformação por fluência básica para os concretos nas três situações (sem ARR, 1% e 2% de ARR) se equivalem. Todavia, a situação é bastante diferente para o concreto classe C60: houve um aumento substancial da fluência $t_0=7$ dias (>70%) para o concreto classe C60 ao adicionar 1% de ARR. Ao aumentar o teor de aditivo no concreto classe C60 para 2%, ocorreu uma leve redução (15%) do fenômeno da fluência básica $t_0=7$ dias em relação ao teor de 1%, porém ainda superior (45%) ao concreto de referência.

Já para a idade de início de carregamento de 28 dias o aditivo no teor de 2% reduziu levemente a fluência básica (11%) do concreto classe C80.

Tabela 28 – Resultados médios de fluência básica – F_j (10^{-6} /MPa)

	C80_0	C80_1	C80_2	C60_0	C60_1	C60_2
Idade de carregamento = 7 dias	2,67	2,59	2,60	2,04	3,49	2,97
Coefficiente de variação (%)	13	19	2	6	7	1
Idade de carregamento = 28 dias	2,00	-	1,79	-	-	-
Coefficiente de variação (%)	2	-	8	-	-	-

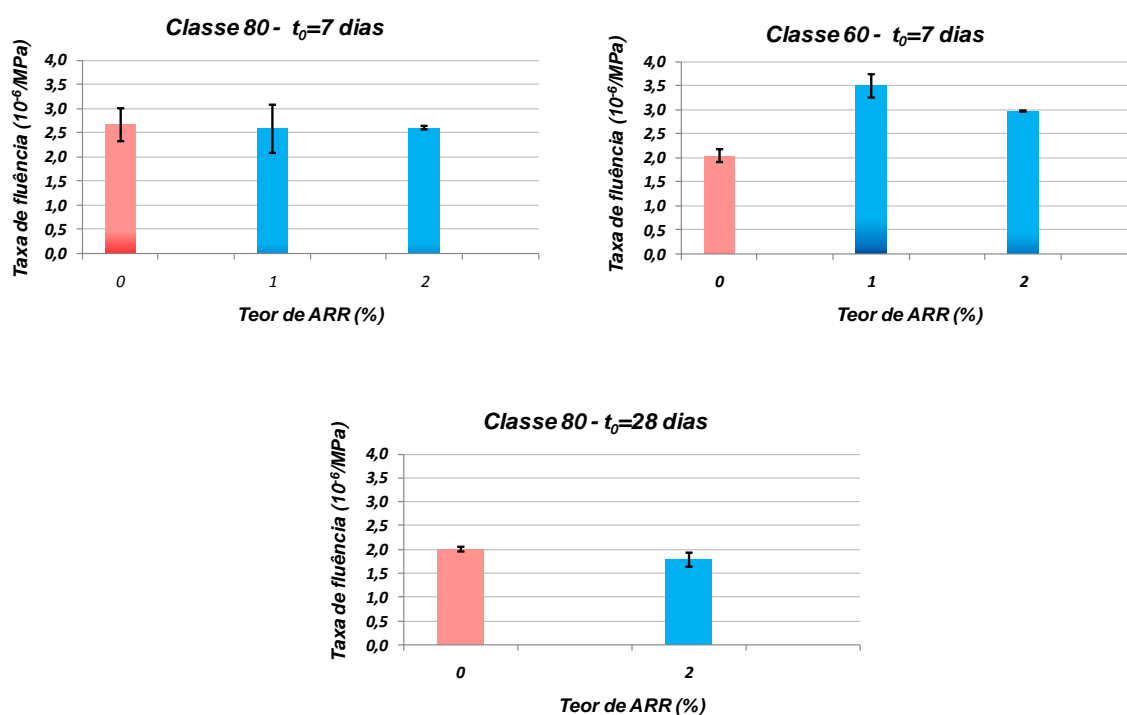


Figura 80 – Taxa de fluência básica (F_j) dos concretos C80 e C60, com e sem ARR, e os respectivos desvios padrão.

Weiss (1999), trabalhando com concreto de relação a/c igual a 0,4, idade de 3 dias de início de carregamento e teor de 5% de aditivo redutor de retração, observou que a deformação por fluência (deformação devido ao carregamento) dos concretos, com e sem ARR, era bastante similar. Os estudos de Gettu (2003), em concretos com relação a/c igual a 0,4, revelaram que há uma redução expressiva no coeficiente de fluência por secagem em concretos com ARR comparado ao referência, de 22% no concreto com 1% de ARR e 33% no concreto com 2% de ARR. Entretanto, ressalta o autor, a fluência básica não é afetada pelo uso do aditivo redutor de retração. Por outro lado, os estudos conduzidos por D'Ambrosia *et al.* (2001)

demonstraram que a adição de 1% de ARR em um concreto com relação a/c igual a 0,45 resultou numa redução de 17% no coeficiente de fluência, na tração, quando comparado ao concreto referência. Concluíram também que o ARR afeta a fluência e a retração em diferentes formas.

Com base na literatura apresentada, pode-se perceber uma relativa similaridade de comportamento dos concretos classe C80 desta pesquisa, nas duas idades de carregamento, 7 e 28 dias, com aqueles estudados por Weiss (1999) e Gettu (2003). A fluência básica para o concreto C80, nas duas idades de carregamentos praticamente não foram afetadas pelo uso do ARR. Contudo, os resultados do concreto classe C60 não guardam coerência com qualquer referência da literatura, já que o uso do ARR resultou no acréscimo da fluência básica. O que também não invalida o resultado e o ensaio. Se de fato houver um acréscimo de fluência com ARR para estes concretos, isso significa que na prática se deve tomar cuidado ao utilizar esse aditivo, pois pode reduzir o fenômeno deformacional da retração, mas ganhar em deformação por fluência, implicando, por exemplo, em perda de protensão em concretos protendidos.

Vale mencionar que a literatura é bastante escassa sobre o efeito do aditivo, objeto deste estudo, na fluência. Sabe-se e confirmou-se que o ARR reduz retração autógena e retração por secagem, mas o efeito na fluência não é tão direto quanto naqueles outros fenômenos, até porque os mecanismos motores são diferentes, embora todos estejam relacionados à movimentação de água na matriz cimentícia. Os poucos resultados existentes sobre o ARR na fluência (incluem-se os citados acima) são de difícil comparação principalmente pela falta de uma padronização internacional no procedimento de ensaio e dificuldade na distinção e no entendimento dos vários fenômenos deformacionais que ocorrem simultaneamente no concreto (retração por secagem, retração autógena, fluência básica e por secagem, entre outros).

Na verdade, os resultados obtidos não são conclusivos, mas somados aos apresentados pela literatura são suficientes para se afirmar que é indispensável um programa intensivo e representativo de ensaios sobre o efeito do ARR na fluência que possa trazer resultados mais abrangentes e confiáveis. Isto é particularmente importante na medida em que a fluência é a propriedade indispensável para estimar a possibilidade de fissuração devido às tensões térmicas e de retração nas primeiras idades.

Partindo da importância da fluência para estimativa de risco de fissuração, um estudo de análise de tensões foi realizado para o concreto classe C80, com e sem ARR, a partir dos resultados obtidos, que é apresentado no item 5.1.11, em seguida, que dá uma ideia mais prática e didática da necessidade da determinação das propriedades do material o mais próximo do real.

5.1.11 Análise do risco de fissuração

Uma das principais razões em determinar as diversas propriedades de um material é poder empregá-las em previsões do comportamento daquele material, a partir da análise de evolução de tensões, com o fim de se tomar ações para manter baixos os níveis de fissuração, que comprometem a vida útil e durabilidade da estrutura.

Considerando-se as propriedades como resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, fluência e autógena, partiu-se para uma análise de tensões do concreto C80, sem e com 2% de ARR, para se verificar o risco de fissuração desses dois concretos. Em essência, a proposta é observar se a adição de 2% de ARR pode minimizar o risco de fissuração.

A análise das tensões pode ser realizada por meio de um método numérico de resolução direta da Equação 17, levando em consideração o comportamento viscoelástico linear com envelhecimento do concreto e com emprego do modelo logarítmico para descrever o efeito da fluência do concreto. Admitida a aplicabilidade do princípio da superposição de Boltzmann-McHenry, a equação constitutiva do modelo viscoelástico linear com envelhecimento do concreto, utilizada no cálculo da história das tensões é a seguinte (Equação 17):

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t f(z, t-z) \cdot \sigma(t) \quad (t \geq z) \quad \text{Equação 17}$$

onde $\varepsilon(t)$ é a história das deformações, neste caso, de origem autógena. Para efeito dessa análise desconsiderou-se o efeito térmico, partindo-se da premissa que concretos dessa ordem de resistência à compressão – Classe C80 - são utilizados em estruturas esbeltas e que o efeito térmico não é o preponderante para o surgimento de fissuras.

A resolução numérica da Equação 18 pode ser feita da seguinte maneira:

$$\varepsilon_j = \sum_{i=1}^j f_{ij} \cdot \Delta\sigma_i \quad (t \geq z) \quad \text{Equação 18}$$

Podendo ainda representar a Equação 18 acima, na forma matricial, conforme abaixo:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\sigma_j \end{bmatrix} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

$\begin{bmatrix} \varepsilon_j \end{bmatrix}$ = vetor (n) de deformações de origem autógena

$\begin{bmatrix} f_{ij} \end{bmatrix}$ = matriz (n, n) cujo elemento da linha j e da coluna $i \geq j$ é a fluência do concreto na idade t_j , com nascimento na idade z_i . De uma maneira mais simplificada, pode-se dizer que a matriz $f_{i,j}$ é triangular com a parte superior nula, cujas colunas são um ensaio de fluência com nascimento em z_i , onde a diagonal representa o início do ensaio da fluência, isto é $f_{i,i} = 1/E(z_i)$.

Para a determinação da tensão de origem autógena, basta isolar $\Delta\sigma$ na idade t_j da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ij} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_j \end{bmatrix} \quad \text{Equação 20}$$

Ou:

$$\begin{pmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_2 \\ \Delta\sigma_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta\sigma_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f1 & & & & & & \\ & f2 & & & & & \\ & & f3 & & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & fn \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \varepsilon_v \end{pmatrix}$$

Onde: f_{ij} = fluência na idade j com nascimento na idade i

A superposição das tensões conduz ao cálculo das tensões em qualquer época t_n :

$$\sigma(t_n) = \sum_{j=1}^n \Delta\sigma_j \quad \text{Equação 21}$$

Dessa forma, os dados obtidos nos ensaios para determinação das propriedades de resistência à compressão, fluência, módulo de elasticidade e retração autógena foram aplicados no modelo acima descrito, donde foi determinada a história das tensões de origem autógena. A evolução das tensões comparadas com a evolução, no tempo, da resistência à tração na flexão e direta do concreto, permite a análise da segurança contra a fissuração de origem autógena. Ressalte-se que esse mesmo procedimento é realizado quando se deseja analisar ao risco de fissuração de origem térmica.

Se $\sigma <$ tração (na flexão (f_{t_f}) ou direta (f_{t_d})), o risco de fissuração é bastante minimizado, do contrário, medidas devem ser tomadas para se evitar a fissuração.

Na Figura 81 apresenta-se o resultado da análise de tensões instaladas em um ponto de uma estrutura, a partir dos resultados deformacionais de fluência e retração autógena determinados nesta pesquisa para o concreto classe C80, sem e com 2% de aditivo redutor de retração, comparando-as com a capacidade destes concretos de resistirem à tração na flexão e à tração direta apresentada de três formas: a evolução da resistência à tração direta de *Fonseca Silva (2007)* considera os valores obtidos experimentalmente para estes mesmos concretos C80_0 e C80_2, utilizando os dispositivos e corpos de prova desenvolvidos por COPPE e FURNAS. *Farias et al. (2003)* levantaram praticamente todos os resultados de tração direta determinados no Laboratório de Concreto de FURNAS, chegando a uma amostra de aproximadamente 850 resultados; após análise estatística foi observado que a resistência à tração direta equivalia à 60% da resistência à tração na flexão, ou seja, $f_{ct} = 0,6x f_{ct,f}$, um pouco abaixo do preconizado pela *NBR 6118 (2003/Emd1:2007)*, que recomenda empregar como estimativa da resistência à tração direta, 70% da resistência à tração na flexão. As idades apontadas no gráfico representam a idade a partir da qual a tensão instalada é superior à capacidade de resistência do material, à tração.

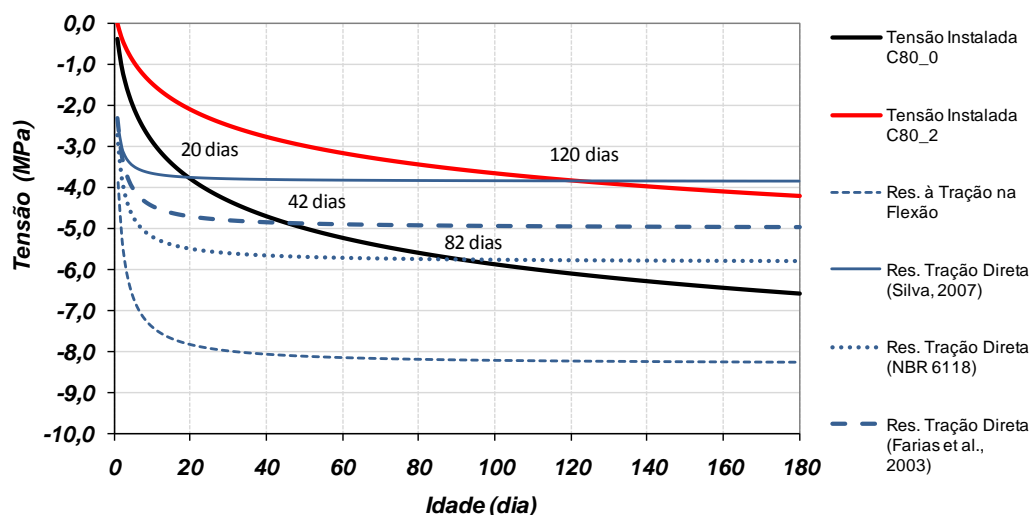


Figura 81 – Evolução da tensão instalada em um ponto de estrutura comparada com as evoluções das resistências à tração direta e à flexão para o concreto C80 referência (C80_0) e C80 com 2% de ARR (C80_2).

Ainda é importante esclarecer que a evolução de tração tanto na flexão como direta representa o resultado médio de tração do C80_0 e C80_2, haja vista que a presença de ARR na mistura não alterou significativamente tais propriedades, conforme discutido nos itens 5.1.7.1 e 5.1.7.2.

Uma análise detalhada da Figura 81 mostra que a tensão de origem autógena, tanto para o concreto referência como com 2% de ARR, é inferior à capacidade do concreto de resistir à tração na flexão; uma peça submetida a este esforço tem pouca probabilidade de fissuração devido unicamente à retração autógena. Deve-se atentar também que o uso de 2% de ARR minimiza em muito esta probabilidade.

Por outro lado, ao se comparar com a tração direta, determinada por Silva (2007), o risco de fissuração é altíssimo para o concreto de referência – C80_0, com 20 dias de idade a tensão de origem autógena deste concreto já ultrapassa a capacidade do concreto de resistir à tração direta. Enquanto o uso do ARR no teor de 2% minimiza esse risco, podendo ocorrer fissuração em idades superiores, por volta de 120 dias ou até mesmo, o que demonstra a Figura 81, a tensão tender a se igualar à capacidade de resistência.

A resistência à tração direta, determinada com base em Farias et al. (2003) e conforme NBR 6118, é ultrapassada pela tensão de origem autógena nas idades em torno de 40 e 80 dias respectivamente para o concreto C80, sem qualquer adição de aditivo redutor de retração. Este comportamento demonstra a tendência à fissuração deste concreto a partir destas idades. De outra forma, é importante observar o excelente desempenho do uso de 2% de ARR no

concreto C80; a eficácia desse aditivo em reduzir o efeito da retração autógena promove por consequência o decréscimo da tensão, diminuindo sobremaneira o risco de fissuração, quando se leva em conta a resistência à tração direta, seja tomada como 60 ou 70% da resistência à flexão.

A análise linear para o cálculo de tensões aqui realizada considera o material viscoelástico com envelhecimento, para a qual outros efeitos como o térmico, por exemplo, foram isolados de forma a simplificá-la. Consideraram-se somente as deformações devidas ao fenômeno da retração autógena, objeto da presente pesquisa, como geradoras da tensão. Correlacionando estas tensões geradas com as respectivas resistências desenvolvidas em um ponto do sólido de concreto é possível obter informação sobre o risco de fissuração, conforme se fez acima. Ressalte-se, entretanto, que se considerado o efeito da temperatura, a superposição de efeitos, peso próprio, esforços mecânicos, formato do elemento estrutural e das suas dimensões entre outros, as tensões geradas poderão ser ainda maiores, estando a estrutura sujeita a elevado risco de fissuração. De toda forma, o uso de 2% de ARR para concretos nesse nível de resistência pode favorecer a minimização de ocorrência de fissuras, já que diminui a retração autógena. Obviamente, incorporados outros efeitos no cálculo das tensões geradas, medidas adicionais para minimizar ou até mesmo evitar a fissuração devem ser tomadas, como por exemplo, no caso do efeito térmico, otimizar a fase construtiva, como reduzir a espessura das camadas de concretagem e aumentar o intervalo de lançamento entre duas camadas consecutivas.

5.1.12 Propriedades ligadas à durabilidade

A integridade de uma estrutura por toda sua vida útil é dependente não só de suas propriedades mecânicas, mas também daquelas ligadas à durabilidade, tendo-se em mente que a durabilidade do concreto está intimamente relacionada com o ingresso e deslocamentos de agente agressivos no seu interior, notadamente em presença de água. Desta forma, a avaliação da *permeabilidade à água, da penetração de íons cloretos, de carbonatação e da absorção capilar e total* torna-se relevante na estimativa da durabilidade de uma estrutura construída com os materiais estudados, com destaque para o emprego do aditivo redutor de retração – ARR. A fim de minimizar a escassez de informações no meio técnico sobre a influência do

ARR na durabilidade dos concretos, são apresentados a seguir os resultados obtidos e discussões quanto às propriedades mencionadas.

5.1.12.1 Resistência à penetrabilidade de íons cloretos

Os resultados individuais dos ensaios de penetrabilidade de íons cloretos determinados aos 90 dias estão apresentados no Apêndice A.. As análises são realizadas de acordo com os critérios de classificação definidos pela ASTM C1202: 1992 (ASTM, 2000), conforme mostrado na Tabela 29.

Tabela 29 – Critérios de avaliação dos valores de penetrabilidade de íons cloretos de acordo com ASTM C 1202:1992 (ASTM, 2000)

Carga passante (C)	Penetração de íons cloretos
> 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 – 2000	Baixa
100 – 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

Na Figura 82 está apresentada a interação do teor de ARR com a classe dos concretos, a partir dos resultados médios de carga passante (C) dos ensaios de penetrabilidade de íons cloretos, aos 90 dias de idade e a classificação de acordo com a ASTM C1202:1992 (ASTM, 2000).

Tomando como referência a Tabela 29, todos os concretos nas diferentes classes, com e sem o aditivo redutor de retração, são considerados de *muito baixa* penetração a íons cloretos, pois apresentaram cargas passantes de íons cloretos entre 100 e 1000 C.

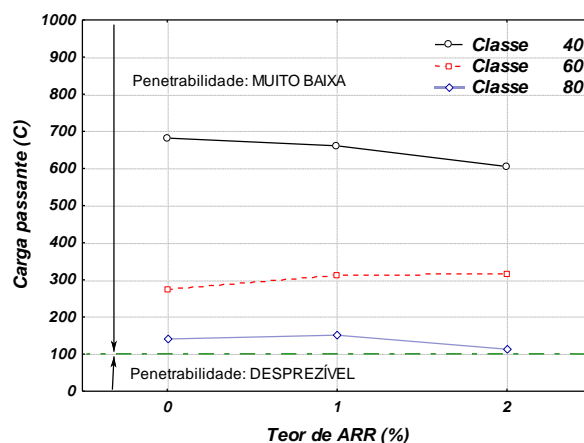


Figura 82 – Valores médios de penetrabilidade de íons cloreto para cada classe em função do teor de ARR, na idade 90 dias.

A seguir é apresentada a abordagem estatística dos resultados individuais de penetrabilidade de íons cloreto (vide Apêndice A), com a exclusão dos valores espúrios, fundamentada na análise de variância (ANOVA) dos valores de carga passante, cujos resultados estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Análise de variância dos resultados de penetrabilidade a íons cloretos

$R^2_{\text{mod}} = 0,99$						
Fonte	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor-p	Resultado
Efeitos principais						
A: Classe	1013078	2	3199760	30500,22	0,000000	Significativo
B: Teor de ARR	3755	2	506539	4828,34	0,000000	Significativo
Interações						
AB	8724	4	2181	20,79	0,000002	Significativo
Erro (resíduo)	1888	18	105			
Total	1056629	26				

Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não; R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo.

Como já esperado, o efeito principal classe, função da relação a/agl, mostrou-se significativamente influente. O aditivo redutor de retração, embora bem menos, apresentou-se também estatisticamente significativo. Com isso realizou-se a comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, cujos resultados estão expostos na Figura 83. As linhas vermelhas verticais tracejadas definem os grupos que diferem estatisticamente. Na Figura 84 é apresentada a correlação entre resistência à compressão e a carga passante.

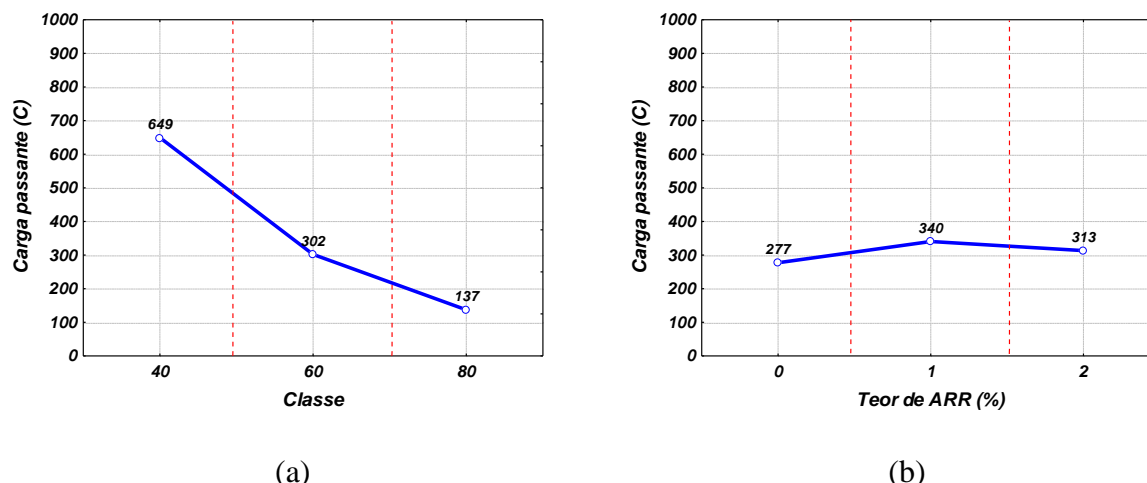


Figura 83 – Valores médios globais em função da classe (a) e em função do teor de ARR(b)

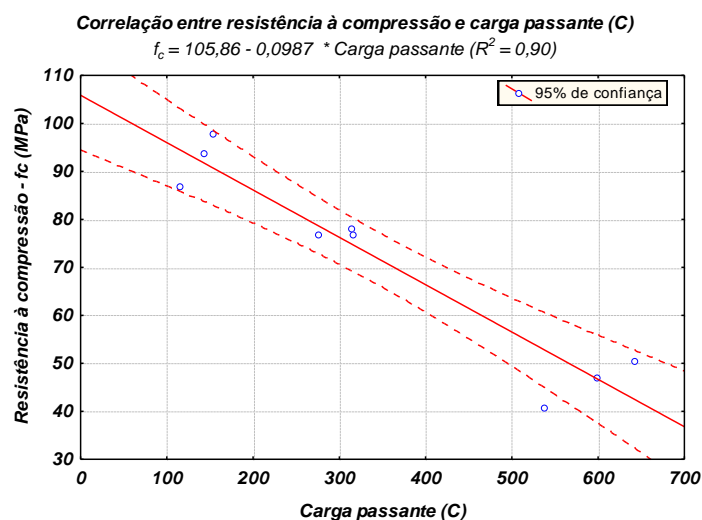


Figura 84 – Correlação entre resistência à compressão dos concretos estudados e a carga passante do ensaio de penetrabilidade de cloretos.

Como já esperado nesses ensaios, as Figuras 83a e 84 demonstram um comportamento bastante definido caracterizado pelo crescimento do valor de carga passante com a diminuição da classe de resistência, em outras palavras, com o aumento da relação a/agl . Esta relação é considerada o fator preponderante de controle numa eventual corrosão induzida por cloretos, na medida em que determina as características de porosidade, capacidade de absorção e permeabilidade da pasta de cimento hidratada.

A Figura 84 mostra a forte correlação ($R^2 = 0,90$) inversamente proporcional entre a carga passante no ensaio de penetrabilidade de cloretos e a resistência à compressão (intimamente relacionada à relação a/agl), demonstrada pela Equação 22:

$$f_c = 105,86 - 0,0987 * \text{Carga passante}$$

Equação 22

Quanto à influência do ARR, a análise de variância com o agrupamento de médias mostrou que os teores de aditivo redutor de retração formam 03 grupos distintos, promovendo um acréscimo na penetrabilidade de íons cloretos, em termos globais da ordem de 13% na carga passante quando se usa principalmente o teor de 2% de ARR. De toda forma, mais uma vez é importante frisar que, sob o ponto de vista prático, quanto à resistência a agentes agressivos, neste caso, íons cloretos, os três concretos - referência e com ARR (1 e 2%) são similares; o ARR não comprometeu o desempenho dos concretos, uma vez que os valores de carga passante deram próximos dentro da faixa da ASTM (Tabela 29), como de muito baixa penetrabilidade. Weiss (1999), trabalhando com concretos de relação a/c de 0,5 e 0,29 contendo 2% de ARR, obteve para as misturas com ARR uma redução aproximada de 25% de penetrabilidade a cloretos, em relação ao concreto de referências. O autor explica que este mecanismo que reduziu a penetrabilidade a íons cloretos é desconhecido, embora possa ser atribuído a microfissuras internas ou mudanças nas propriedades de transporte como resultado de mudanças nas forças de sucção capilar. De outra forma, Folliard e Berke (1997) analisaram o comportamento dos concretos contendo ARR frente à ação de cloretos e observaram que o efeito do ARR não foi tão significativo ao serem submetidos à penetrabilidade a cloretos.

5.1.12.2 Permeabilidade à água

Os valores do coeficiente de permeabilidade obtidos para os concretos de todas as classes estudadas submetidos ao ensaio de percolação de água sob pressão estão apresentados na Tabela 31. Nota-se que à exceção daqueles concretos que deram não percolados (permeabilidade igual a zero, que são C80_1, C80_2, C40_0 e C40_2), os resultados de permeabilidade apresentaram uma dispersão representativa entre os corpos de prova de um mesmo concreto. Neville (1997) reconhece tais dispersões nos resultados de ensaios de permeabilidade realizados em concretos semelhantes.

Não se verificou uma tendência comum de comportamento quanto à influência do aditivo redutor de retração na permeabilidade à água dos concretos estudados. Para a classe C80, com 1 e 2%, os corpos de prova de concreto não foram percolados contra o concreto de referência que apresentou coeficiente médio de $5,52E-13$ m/s. Já na classe C60, o emprego do aditivo redutor de retração praticamente não resultou em alteração da permeabilidade, uma vez que a

potência se manteve para os três concretos. Quanto à classe C40, o concreto referência e com 2% de aditivo obteve-se zero de coeficiente de permeabilidade (não houve percolação), e com 1% a média foi de $4,62E-13$ m/s. Entretanto, segundo critérios do CEB-192 (Tabela 32), pode-se afirmar que todos os concretos, de uma forma geral, apresentaram-se com *baixa permeabilidade* e de *boa qualidade*. Em estudos realizados no Laboratório de FURNAS (LOPES et al, 2000) para investigação da influência da incorporação da sílica ativa na permeabilidade do concreto, trabalhando com concretos com 8% dessa adição mineral, com relação a/ag igual a 0,43 e 0,66, obteve-se, respectivamente, coeficientes médios de $1,55E-12$ m/s e $3,06E-13$ m/s, assim ordem de grandeza próxima aos obtidos nesta pesquisa. No que se refere à presença do ARR, pode-se concluir que de uma maneira geral, a presença do ARR parece não afetar a permeabilidade à água sob pressão.

Tabela 31 – Resultados individuais e médios de coeficiente de permeabilidade (k) dos concretos estudados

	C80_0	C80_1	C80_2	C60_0	C60_1	C60_2	C40_0	C40_1	C40_2
CP1	6,65E-13	0,00E+00	0,00E+00	1,22E-13	8,27E-13	3,55E-13	0,00E+00	3,53E-13	0,00E+00
CP2	4,60E-13	0,00E+00	0,00E+00	0,72E-13	0,061E-13	2,36E-13	0,00E+00	5,86E-13	0,00E+00
CP3	5,30E-13	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,47E-13	0,00E+00
Média - k (m/s)	5,52E-13	0,00E+00	0,00E+00	0,65E-13	2,78E-13	1,97E-13	0,00E+00	4,62E-13	0,00E+00
desvio padrão (m/s)	1,04E-13	0,00E+00	0,00E+00	0,65E-13	4,76E-13	1,81E-13	0,00E+00	1,17E-13	0,00E+00

Há uma correlação inversamente proporcional entre a propriedade de permeabilidade e a resistência à compressão através da porosidade capilar. Isso implica em dizer que a permeabilidade do concreto depende principalmente da relação a/c, que determina o tamanho, volume e a continuidade dos vazios capilares, e da dimensão do agregado, que influencia as microfissuras na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. No entanto, nos resultados obtidos nesta pesquisa não se observou a proporcionalidade inversa entre permeabilidade e relação a/c. Os três concretos, não obstante terem relações a/agl diferentes, se equivalem, apresentando baixa permeabilidade, o que pode ser atribuído à adição de 10% de sílica ativa, que mesmo na relação a/agl mais alta, promove os tão conhecidos efeitos filler e pozolânico, que alteram as dimensões, distribuição, forma, tortuosidade e continuidade dos

poros de forma que a propriedade de permeabilidade de água sob pressão, quando comparado a menores relações a/agl , não fica prejudicada.

Tabela 32 – Critérios de avaliação da permeabilidade à água do concreto segundo CEB-192 (MENDES, 2007)

Permeabilidade (m/s)	Permeabilidade do concreto	Qualidade do Concreto
$< 10^{-12}$	baixa	boa
10^{-12} a 10^{-10}	média	média
$> 10^{-10}$	alta	pobre

5.1.12.3 Carbonatação natural

Os coeficientes de carbonatação natural, obtidos a partir da determinação da profundidade da frente de carbonatação após 1,5, 2,0 e 3,0 anos de exposição ao ambiente natural, foram calculados utilizando-se a Equação 23:

$$k_N = (x_c - x_0)/\sqrt{t} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

k_N = coeficiente de carbonatação natural (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)

x_c = profundidade da frente de carbonatação (mm) nas idades indicadas, determinada com o indicador fenolftaleína.

x_0 = profundidade da frente de carbonatação (mm) ao início da exposição. Neste caso, após 7 dias de cura úmida, quando a partir de então, os corpos de prova foram submetidos à carbonatação natural, os concretos não apresentavam carbonatação, após aplicação do indicador fenolftaleína. Portanto, x_0 =zero.

t = tempo efetivo de exposição ao ambiente natural (ano).

Como forma ilustrativa, a Figura 85 apresenta as características dos corpos de prova aos 36 meses (03 anos) de exposição ao ambiente natural, após aplicação do indicador fenolftaleína para leitura da profundidade de carbonatação com o emprego de paquímetro digital.

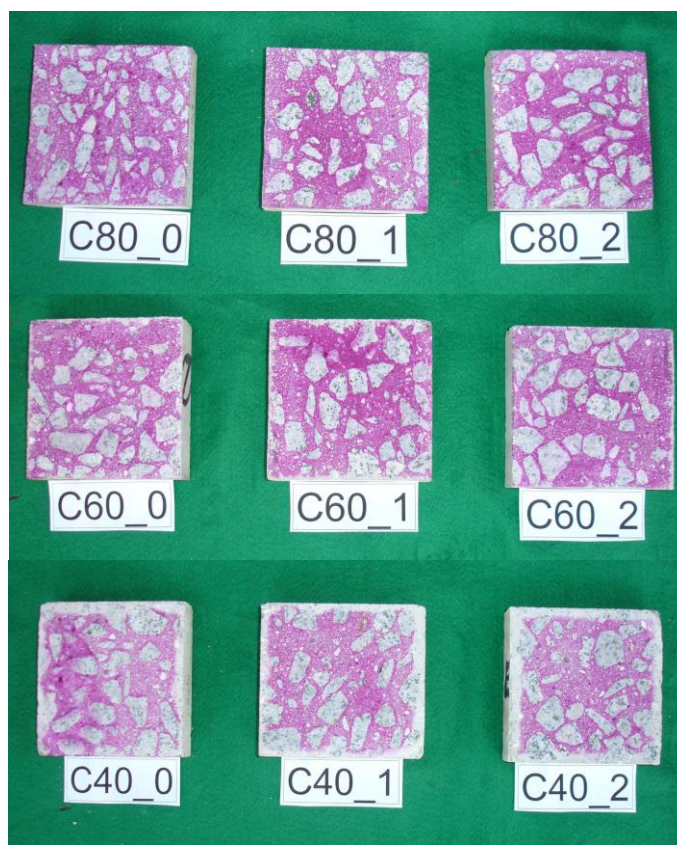


Figura 85 – Concretos, após aplicação do indicador fenolftaleína, submetidos a 03 anos de carbonatação natural

Como pode ser visto na Figura 85, em termos de avanço da frente de carbonatação, a presença do aditivo redutor de retração – ARR parece não afetar de forma expressiva o desempenho dos concretos face ao ingresso de CO_2 . Os valores médios dos coeficientes de carbonatação e respectivos desvios padrão apresentados na Figura 86 atestam, relativamente, tal afirmação. Os resultados individuais das leituras de profundidades e dos coeficientes de carbonatação nas idades indicadas estão apresentadas no Apêndice A.

O concreto classe C80, tanto o referência quanto com 1 e 2% de ARR, não apresentou qualquer ataque por CO_2 até 03 anos de exposição ao ambiente natural. Para esses concretos, o refinamento de poros e a redução da interconexão dessa estrutura de poros, proporcionados pela baixa relação a/agl e uso da sílica ativa, foram os fatores preponderantes na proteção do concreto frente à carbonatação. O ARR presente na solução aquosa dos poros não alterou o comportamento dos concretos, os quais mantiveram excelente desempenho quanto à entrada desse agente agressivo – gás carbônico.

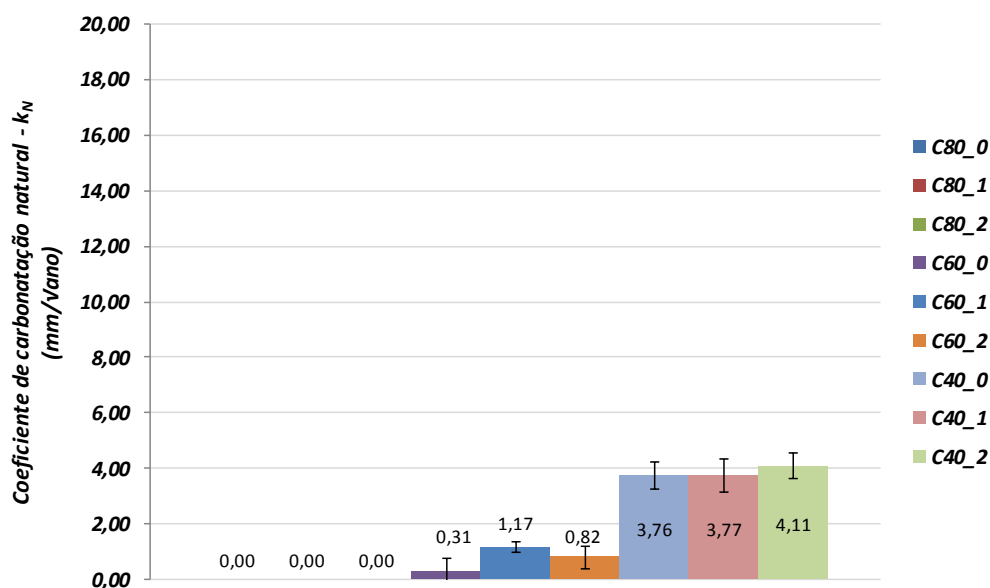


Figura 86 – Valores médios dos coeficientes de carbonatação natural e os respectivos desvios padrão.

O concreto C60 com 1 e 2% de ARR apresentaram respectivamente 1,17 e 0,82 mm/√ano contra 0,31 mm/√ano do C60_0 – concreto referência, o que parece indicar uma redução de desempenho dos concretos ao se empregar o ARR, frente ao ingresso de CO₂. De toda forma, a despeito das diferenças numéricas do coeficiente entre os três concretos, ainda assim apresentam bom desempenho, tendo em vista que a previsão do avanço da frente de carbonatação (isolados outros possíveis agentes agressivos) em um concreto armado até atingir uma armadura com 20 mm de cobrimento (menor cobrimento previsto na NBR 6118/2003, para lajes em classe de agressividade ambiental “I” – nível a que os concretos estiveram submetidos por 03 anos), a partir dos respectivos coeficientes, demonstra tempo da ordem de 300 anos para o C60_1 e 500 anos para o C60_2. Para esses concretos, os fatores determinantes de qualidade do concreto, como relação a/agl = 0,4, emprego da sílica ativa e as condições de cura (7 dias de cura úmida), contribuíram para baixos coeficientes de carbonatação, que pode viabilizar estruturas de concreto armado mais duráveis, apesar do emprego do ARR.

Já os concretos classe C40 com o ARR, comparado ao referência, não apresentam influência expressiva frente ao avanço da carbonatação: o C40_0 tem um coeficiente de 3,76 mm/√ano, e os concretos C40_1 e C40_2 com 3,77 e 4,11 mm/√ano, respectivamente. Levando-se em conta os desvios padrão das amostras, os coeficientes dos três concretos podem ser

considerados próximos, sem diferenças expressivas entre eles. Ademais, é importante observar que esses concretos de relação $a/agl = 0,63$ apresentaram coeficientes em média quatro vezes maior que o concreto C60, e que pode levar a frente de carbonatação a atingir a armadura em 26 anos, na média, para os três concretos (seguindo a mesma previsão descrita o parágrafo anterior). Isso demonstra a importância de se trabalhar com relações a/agl menores, quando se planeja maior vida útil das estruturas de concreto armado. Relações a/agl altas levam a maiores velocidades de carbonatação, uma vez que são determinantes da porosidade (dentro de conceito mais amplo que inclui tamanho, volume e continuidade dos poros) e da permeabilidade do concreto.

Foi prevista inicialmente uma avaliação estatística dos resultados pela análise de variância (ANOVA) para se verificar a influência do ARR na carbonatação dos concretos, entretanto, os resultados do concreto classe C80 foram restritivos à análise, uma vez que não atende aos pressupostos da ANOVA (resíduos distribuição normal, homocedasticidade – distribuições com igual variância e resíduos sem relação com variáveis).

5.1.12.4 Absorção de água por capilaridade

Os resultados individuais de absorção de água por capilaridade, realizados em corpos de prova cilíndricos, aos 28 dias de idade, seguindo as prescrições da ABNT NBR 9779:1995 que estão dispostos no Apêndice A, foram submetidos à análise de variância (ANOVA). A Tabela 33 sintetiza os resultados obtidos da referida análise, donde pode se observar que os efeitos das variáveis e a interação entre elas resultaram em estatisticamente significativos (para um nível de confiança de 95%).

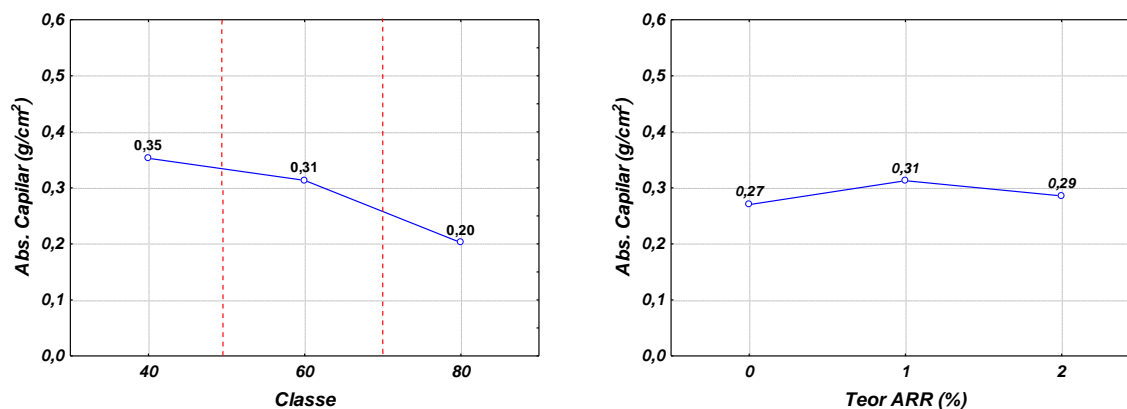
Tabela 33 – Análise de variância dos resultados de absorção por capilaridade

$R^2_{\text{mod}} = 0,95$						
Fonte	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor-p	Resultado
Efeitos principais						
A: Classe	0,104291	2	0,052145	91,23	0,000000	Significativo
B: Teor de ARR	0,007704	2	0,003852	6,74	0,006996	Significativo
Interações						
AB	0,055681	4	0,013920	24,35	0,000001	Significativo
Erro (resíduo)	0,009717	17	0,000572			
Total	0,183462	25				

Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não; R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo.

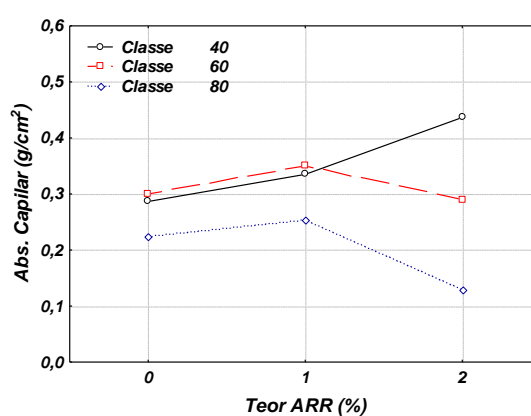
Assim como nas outras propriedades ligadas à durabilidade, a absorção por capilaridade é influenciada significativamente pela classe de resistência (relação a/agl): tanto maior é a absorção capilar quanto maior for a relação a/agl (Figura 87a). Embora os valores médios de absorção capilar dos concretos C60 ($a/agl=0,4$) e C40 ($a/agl=0,63$) estejam próximos, a comparação múltipla de média, realizada pelo Teste de Duncan, acusou que há 03 classes distintas (linhas tracejadas verticais separam os grupos que diferem estatisticamente na Figura 87a). Tem-se portanto, absorção por capilaridade, da ordem de $0,35 \text{ g/cm}^2$ para o C40, $0,31 \text{ g/cm}^2$ para o C60 e $0,20 \text{ g/cm}^2$ para o C80. Este comportamento pode ser justificado em razão daqueles concretos com maior relação a/agl terem uma maior porosidade, com poros interconectados e abertos ao meio. Para o concreto C80, era esperado que tivesse baixos valores de absorção capilar em relação aos demais, já que a menor relação a/agl (associado à presença da sílica ativa) proporciona um maior refinamento da estrutura de poros, com capilares em menor diâmetro e muito menos comunicáveis (poros descontínuos). Este comportamento é comprovado por meio dos ensaios de porosimetria, cujos resultados são discutidos no item 5.2.1.

Embora a análise estatística de variância demonstre ser um fator significativo na absorção capilar e ainda com muito menos relevância que a classe, o teor de ARR, em termos práticos, parece não exercer influência sobre a propriedade medida, como mostra a Figura 87b. Do Teste de Duncan (comparação múltipla de médias) obtiveram-se dois grupos que diferem significativamente: um grupo constituído pelos teores de 0 e 2% de ARR, e em seguida o outro grupo do teor de ARR igual a 1%. Este resultado denota, sob o ponto de vista estatístico, que os concretos referência e com 2% apresentam desempenho um pouco superior que os concretos com 1% de ARR quanto à absorção por capilaridade. Já sob o ponto de vista da engenharia, é razoável afirmar que o emprego de ARR nos teores desta pesquisa não afeta de forma expressiva a propriedade em questão.



(a) Efeito da classe (relação a/agl)

(b) Efeito do teor de ARR



(c) - Efeito da classe e do teor de ARR

Figura 87 - Influência dos fatores isolados e da interação entre os dois fatores na absorção por capilaridade

De acordo com a Figura 87c, para o C80 com 1% de ARR o aumento na absorção capilar parece inexpressivo quando comparado ao referência, e com 2% de ARR, houve redução da absorção de água por capilaridade. De outra forma, no concreto C60, a absorção do concreto de referência e com 2% de ARR se equivalem, embora com um ligeiro crescimento de absorção para o concreto contendo 1% de ARR. Para a classe C40, a influência do ARR se deu no sentido de aumentar a absorção por capilaridade nos dois teores utilizados, quando comparado ao de referência, conforme mostrado na Figura 87c.

Os resultados de porosimetria das pastas dos concretos C80 e C60 apresentados e discutidos no item 5.2.1 mostram que a incorporação do ARR incorre em um pequeno acréscimo na porosidade total, com o leve aumento no volume dos poros de menor diâmetro, quais sejam, poros de gel e mesoporos, o que pode justificar o resultados de absorção capilar destes concretos que, de modo geral, mostram que o ARR não altera a absorção por capilaridade e,

por conseguinte, não prejudica a durabilidade sob o ponto de vista da entrada de agentes agressivos.

5.1.12.5 Absorção por imersão

Os resultados médios de absorção por imersão, juntamente com índice de vazios e massa específica para os concretos ensaiados à idade de 28 dias estão apresentados na Tabela 34. Os resultados individuais com os respectivos coeficientes de variação encontram-se no Apêndice A.

Tabela 34 – Resultados médios obtidos do ensaio de absorção total por imersão

	C80_0	C80_1	C80_2	C60_0	C60_1	C60_2	C40_0	C40_1	C40_2
Absorção (%)	3,05	3,74	3,77	2,90	4,75	4,73	5,36	5,02	4,23
Índice da vazios (%)	7,31	8,94	9,00	6,89	11,01	10,99	12,12	11,43	9,76
Massa específica (kg/m³)	2.587	2.626	2.625	2.558	2.605	2.608	2.572	2.573	2.556

Assim como nos subitens anteriores, a propriedade de absorção de água por imersão (indica volume dos poros no concreto) é analisada a partir da análise estatística de variância (ANOVA) dos resultados individuais. A Tabela 35 mostra o resumo da ANOVA.

Tabela 35 – Análise de variância dos resultados de absorção total por imersão

R²_{mod} = 0,90						
Fonte	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor-p	Resultado
Efeitos principais						
A: Classe	7,6833	2	3,8417	34,653	0,000001	Significativo
B: Teor de ARR	2,4971	2	1,2485	11,262	0,000768	Significativo
Interações						
AB	7,2944	4	1,8236	16,449	0,000011	Significativo
Erro (resíduo)	1,8846	17	0,1109			
Total	19,8132	25				

Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não; R²_{mod} = coeficiente de determinação do modelo.

A ANOVA mostra que os efeitos das variáveis, tanto as principais quanto as interações, resultaram em estatisticamente significativas (para um nível de confiança de 95%). A classe (diretamente relacionada à relação a/agl) é o efeito de maior relevância estatística. O agrupamento de médias pelo método de Duncan deu origem às Figuras 88a e 88b.

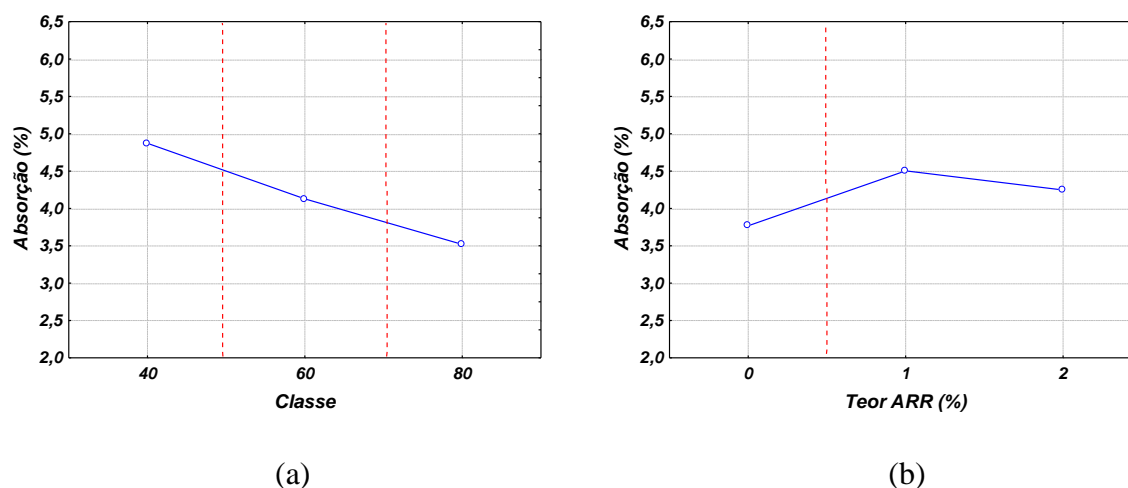


Figura 88 – Efeito da classe (a) e do teor de ARR (b) na absorção total por imersão dos concretos estudados

A Figura 88a apresenta as três classes de resistência estatisticamente diferentes (formando 03 grupos distintos), donde se observa que classes maiores de resistência resultam em menor absorção por imersão. Este comportamento é esperado, uma vez que relativamente, a relação a/agl determina a porosidade da pasta de cimento hidratada. Em outras palavras, o aumento de água no sistema representa aumento dos vazios capilares (modelo de Powers), além da maior possibilidade de interconexão, via de consequência, maior facilidade de entrada de água.

O teor de ARR também exerce influência significativa sobre a absorção total (Figura 88b). O agrupamento de médias mostra que há dois grupos distintos: a dos concretos referência e a dos concretos com ARR – os dois teores formam um só grupo, isto é, os resultados de absorção total com 1% e 2% de ARR não diferem estatisticamente. Isto indica que ao incorporar o aditivo redutor de retração, seja nos teores de 1 ou 2%, há um acréscimo significativo na absorção por imersão em relação ao concretos sem ARR. Este comportamento pode estar relacionado à relação $(a+ARR)/agl$ (Tabela 7, item 4.4.2), que por não se descontar o ARR da água de amassamento (assim com se faz com o superplastificante), termina por aumentar a quantidade de água na mistura com o ARR (embora o fabricante informe que o aditivo seja isento de água livre), ocasionando uma porosidade maior destas misturas, comparado ao referência.

A interação entre classe e teor de ARR também exerce influência significativa (Figura 89). Para os concretos C80 e C60, o uso do ARR nos dois teores levam a aumentos na absorção por imersão em relação ao de referência, sendo o efeito mais pronunciado no C60. A figura ainda indica, que para tais concretos, não há diferença entre 1 e 2% de ARR incorporados aos concretos. Porém, para a classe C40, diferentemente dos resultados de absorção por capilaridade e contrariamente às demais classes de resistência, os concretos com ARR apresentaram absorção menor comparado ao concreto sem ARR. Para este comportamento não há uma explicação satisfatória.

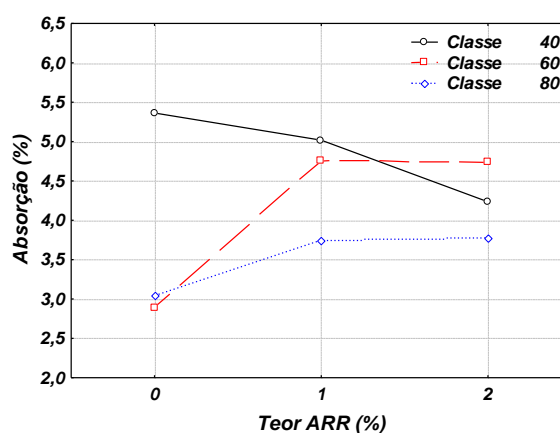


Figura 89 – Efeito da interação entre classe e teor de ARR na absorção total dos concretos

É válido, ainda, analisar os resultados com base nos critérios do CEB-192 (Tabela 36). Os concretos classe C80 e C60 referência são considerados de baixa absorção e de boa qualidade; com o uso do ARR, os concretos passam a ter média absorção e média qualidade, embora seja menos pronunciado no C80. A classe C40, tanto o referência quanto com 1% de ARR se enquadram no critério de alta absorção e de qualidade pobre. Por outro lado, e o que parece ser mais razoável, Neville (1997) pondera que a absorção por imersão (volume de poros) e a facilidade com a qual um fluido penetra no concreto não segue necessariamente uma relação, portanto a absorção não pode ser usada como uma medida de qualidade do concreto; contudo, ressalta, que geralmente concretos de boa qualidade têm absorção bem abaixo de 10%. Nesta linha, todos os concretos estudados podem ser considerados de boa qualidade.

Tabela 36 – Critérios de avaliação da absorção de água do concreto segundo CEB-192 (MENDES, 2007)

Absorção (%)	Absorção do concreto	Qualidade do Concreto
< 3	baixa	boa
3 a 5	média	média
> 5	alta	pobre

5.2 ADITIVO REDUTOR DE RETRAÇÃO EM PASTAS DE CIMENTO PORTLAND: ESTUDO DA MICROESTRUTURA

O comportamento microestrutural do aditivo redutor de retração – ARR na matriz cimentícia configura-se um lacuna no estado da arte sobre o tema. No item 5.1, verificou-se que de uma forma geral a incorporação deste aditivo ao concreto de cimento Portland, as propriedades mecânicas, elásticas, viscoelásticas e aquelas ligadas à penetração de agentes agressivos indicam não ser alteradas. Entretanto de forma a complementar a análise e verificar de que maneira este ARR age na pasta de cimento, realizaram-se os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, difração de raios-X, análise termogravimétrica e microscopia eletrônica de varredura nas pastas dos concretos C80 e C60, referência, com 1 e 2% de ARR nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de idade, designadas aqui como P80 e P60, respectivamente. Os resultados e discussão estão apresentados a seguir.

5.2.1 Porosimetria por intrusão de mercúrio

5.2.1.1 Intrusão total

Os resultados individuais de volume total intrudido para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias são apresentados no Apêndice B. A Tabela 37 apresenta o resultado da análise de variância (ANOVA) desses resultados. A relação a/c (tipo de pasta), a presença de ARR, a idade, a interação dupla entre a pasta e o ARR e a interação tripla entre os efeitos principais são estatisticamente significativos. A Figura 90a mostra, graficamente, o efeito da presença do ARR nas pastas de material cimentício, com a linha tracejada vertical separando os grupos

que diferem estatisticamente, pelo agrupamento de médias (método de Duncan); as pastas com ARR, independentemente do teor (seja em 1 ou 2% em relação à massa de cimento), apresentam aumento do volume total de poros em relação às pastas sem ARR, embora a presença de ARR não seja o efeito de maior relevância estatística. Já a Figura 90b apresenta a interação tripla dos fatores no volume total de mercúrio intrudido.

Tabela 37 – Análise de variância dos resultados de volume total intrudido de Hg

$R^2_{\text{mod}} = 0,98$						
Fonte	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor-p	Resultado
Efeitos principais						
A: Pasta (a/c)	0,100110	1	0,100110	785,97	0,000000	Significativo
B: Teor de ARR	0,001875	2	0,000937	7,36	0,003216	Significativo
C: Idade (dia)	0,033278	3	0,011093	87,09	0,000000	Significativo
Interações						
AB	0,000056	2	0,000028	0,22	0,803933	Não Signif.
AC	0,002987	3	0,000996	7,82	0,000825	Significativo
BC	0,001027	6	0,000171	1,34	0,277075	Não Signif.
ABC	0,001993	6	0,000332	2,61	0,043321	Significativo
Erro (resíduo)	0,003057	24	0,000127			
Total	0,144383	47				

Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não; R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo.

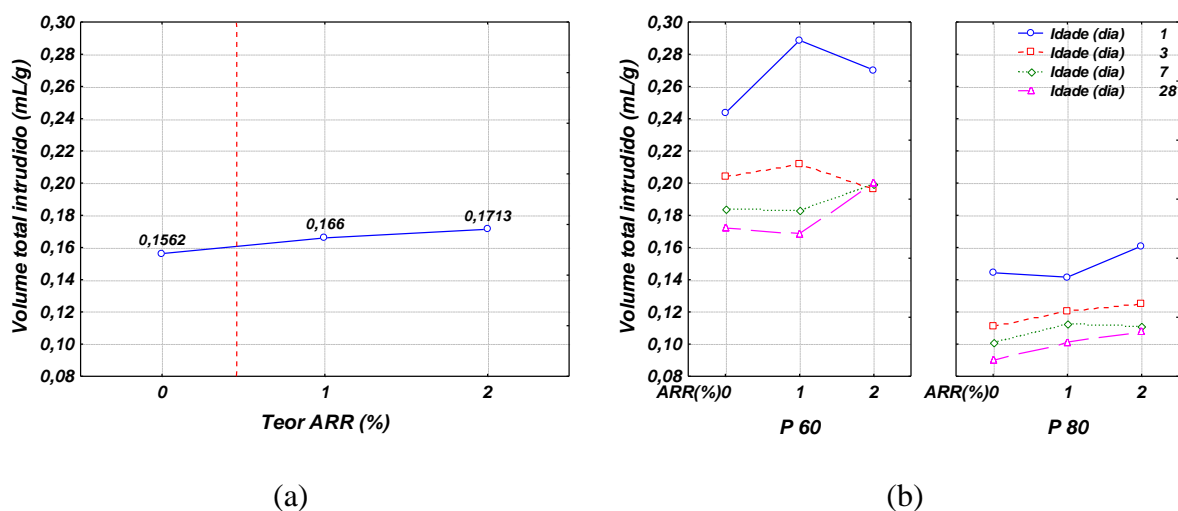


Figura 90 – Efeito da presença do ARR (a) e da interação entre o ARR, a idade e as pastas no volume total de mercúrio intrudido nas pastas (b)

A partir da Figura 90b, podem ser observados os efeitos preponderantes estatisticamente significativos. Em primeiro lugar, a pasta, intrinsecamente relacionada com a relação a/agl: o volume total intrudido é tão maior quanto maior a relação a/agl; de outra forma, o volume total de poros é maior para a pasta P60, de maior relação a/agl que para a P80, menor relação

a/agl. Comportamento este já esperado e clássico na literatura, assim como o decréscimo do volume total de mercúrio intrudido com a idade (o segundo efeito mais significativo) das pastas; o volume total de poros diminui à medida que avança a hidratação, com a conseqüente, formação dos compostos hidratados que vão progressivamente preenchendo os espaços originalmente ocupados pela água, densificando a matriz da pasta de cimento, ocorrendo ainda o refinamento da estrutura porosa pela presença de adição mineral - sílica ativa.

O efeito isolado da presença de ARR por idade mostrada na Figura 90b confirma o comportamento geral mostrado na Figura 90a. A incorporação do aditivo redutor de retração afeta o volume total de poros das pastas. A análise global de todos os resultados, com o teste de agrupamento de médias, mostrou que 1 ou 2% do ARR não são diferentes quanto ao volume total de mercúrio intrudido, mas mostra que em qualquer dos dois teores alteram significativamente, apesar de forma não muito expressiva, o volume total de poros. Este resultado pode ser explicado pelo fato de se ter acrescentado o ARR na mistura sem reduzir a água, uma vez que foi considerada a água do ARR toda combinada, o que aumentou relativamente a relação a/agl, incorrendo no aumento de volume total de poros com a incorporação do ARR. Embora esse aumento no volume total de poros possa se refletir na redução, embora pequena, da resistência à compressão, há que se considerar também que o emprego do ARR para reduzir retração autógena de estruturas de concretos pode também trazer uma vantagem adicional, se for em regiões onde haja ciclos de gelo-degelo, para as quais um aumento de porosidade pode representar um ganho no quesito durabilidade.

Schäffel (2009) realizou ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio em pastas com relação a/c igual a 0,42, aos 91 dias de idade, contendo 03 diferentes tipos de ARR e concluiu que a porosidade total das pastas de cimento não foi afetada com a incorporação dos ARR. Ressalte-se que, diferentemente do procedimento utilizado nesta pesquisa, o autor descontou da água da mistura o teor de líquido presente nos aditivos redutores de retração. Já Melo Neto (2008), em pastas com cimento de escória ativada com relação a/c igual a 0,48, observou que o emprego de ARR, nos teores de 0,5, 1, 1,5 e 2%, incorreu no aumento do volume total de mercúrio intrudido em todas as idades ensaiadas – 1, 3, 7 e 28 dias. Na tese desse autor, não se encontra informação sobre o procedimento utilizado para a incorporação do ARR, ou seja, não se sabe se foi acrescentado ou descontado o ARR na mistura.

5.2.1.2 Distribuição de diâmetro de poros

A análise aqui foi feita agrupando-se os valores de mercúrio intrudido (volume de mercúrio intrudido por unidade de massa da amostra – ml/g) em quatro faixas diferentes de diâmetro de poros, que podem ser relacionadas com as propriedades macroscópicas das pastas, conforme Tabela 38.

Essa classificação foi estabelecida por Silva (2001) após extensivo levantamento bibliográfico sobre os critérios de análise de porosidade por diversos pesquisadores. A mesma autora ressalta que apesar de não se observar limites rígidos entre as faixas de poros, parece haver consenso de que poros com diâmetro maior que 50 nm afetam principalmente a permeabilidade e resistência da pasta, enquanto que as deformações por fluência e retração são governadas notadamente por poros com diâmetro menor que 50 nm; além disso parece haver unanimidade na literatura de que 10 nm é a máxima dimensão dos poros existentes nas fases hidratadas do cimento.

Tabela 38 – Classificação do tamanho de poros em pastas de cimento hidratadas e propriedades afetadas da pasta (adaptado de SILVA, 2001)

Designação	Diâmetro do poros	Faixa de diâmetro de poros	Propriedades afetadas
Porosidade da fase hidratada (gel)	< 10 nm	1	Retração e fluência
Capilares médios - mesoporos	10 – 50 nm	2	Resistência, permeabilidade, fluência e retração a altas UR
Capilares grandes - macroporos	50 nm – 1 µm	3	Resistência e permeabilidade
Capilares grandes e ar incorporado	> 1 µm	4	Resistência

A Tabela 39 apresenta os resultados das análises de variâncias (ANOVA) do volume acumulado por faixa de poros, por tipo de pasta. A Figura 91 apresenta os gráficos das interações de dois fatores. Os dados obtidos a partir dos ensaios são mostrados no Apêndice B.

Tabela 39 – Análise de variâncias dos resultados de volume intrudido de Hg por faixa de poros e por pasta.

$R^2_{\text{mod}} = 0,99$											
Fonte	SQ		GL	MQ		Teste F		Valor-p		Result.	
	P60	P80		P60	P80	P60	P80	P60	P80	P60	P80
Efeitos principais											
A: Teor ARR	0,00025	0,00017	2	0,00013	0,00009	3,685	14,61	0,032444	0,000011	S	S
B: Idade	0,00690	0,00168	3	0,00230	0,00056	67,014	94,40	0,000000	0,000000	S	S
C: Faixa diâmetro poro	0,11112	0,03475	3	0,03704	0,01158	1079,489	1954,08	0,000000	0,000000	S	S
Interações											
AB	0,00072	0,00006	6	0,00012	0,00001	3,484	1,70	0,006124	0,140453	S	NS
AC	0,00031	0,00109	6	0,00005	0,00018	1,511	30,58	0,194843	0,000000	NS	S
BC	0,02445	0,00981	9	0,00272	0,00109	79,174	183,82	0,000000	0,000000	S	S
ABC	0,00270	0,00049	18	0,00015	0,00003	4,371	4,57	0,000022	0,000013	S	S
Erro (resíduo)	0,00165	0,00028	48	0,00003	0,00001						
Total	0,14810	0,04832	95								

Onde: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Result. = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo - S ou não - NS; R^2_{mod} = coeficiente de determinação do modelo.

É possível observar que todos os fatores têm efeito no volume de mercúrio intrudido, podendo ser direto como no caso do teor de ARR (Fator A), da idade (Fator B) e da pressão (Fator C: faixa de diâmetro de poro), ou pode ser as interações duplas (AB e BC para a P60, AC e BC para a P80) e tripla.

A faixa de diâmetro de poros (diretamente relacionada à pressão) é o efeito principal, uma vez que está associada aos procedimentos de ensaios, conforme esperado. A interação entre a pressão (ou faixa de diâmetro de poros) e a idade das pastas é o próximo fator em importância, seguida do efeito principal idade. A análise da influência da idade na distribuição de tamanho de poros da pasta P60, com relação $a/agl = 0,4$, mostra que a concentração de poros na faixa 3, com diâmetro entre 50 nm – 1 μm , vai diminuindo concomitantemente ao avanço da idade, sendo bastante expressiva a redução (cerca de 40%) dos grandes capilares (macroporos) de 1 dia para 3 dias de cura úmida (Figura 91a). Ao mesmo tempo ocorre um leve aumento dos poros da fase hidratada. A pasta P80, com relação $a/agl = 0,3$ tem comportamento semelhante (Figura 91b) à P60 somente na idade de 1 dia, com a concentração de poros na faixa 3. Porém, com a idade, a distribuição de tamanho de poros se altera, resultando num decréscimo de capilares grandes e uma maior concentração de poros com diâmetro inferior a 50 nm, que correspondem às fases hidratadas e capilares médios, demonstrando um refinamento da estrutura de poros. Embora já discutido no item anterior,

vale mais uma vez observar que a intrusão total de mercúrio (área sob as curvas da Figura 91a e 91b), é muito menor para a pasta P80 comparada à P60, indicando porosidade menor, consequência da relação a/agl , e com reflexos diretos na resistência e permeabilidade das pastas. De maneira geral, esses resultados estão de acordo com comportamento conhecido de materiais à base de cimento.

O teor de ARR afeta a porosidade de um modo estatisticamente significativo, apesar de não ser o efeito principal preponderante. Na pasta P60 (Figura 91c), a presença de ARR aumenta, em torno de 10%, tanto o volume de poros capilares grandes quanto a porosidade da fase hidratada. Na pasta P80 (Figura 91d), de relação $a/agl = 0,3$, a porosidade da fase hidratada também é aumentada com o ARR, da ordem de 50% quando empregado o teor de 2%. O volume de capilares médios (mesoporos) cresce em 12% com o ARR; por outro lado, os capilares grandes (macroporos) sofrem uma redução em torno de 20%. As Figuras 91e e 91f apresentam o efeito da interação tripla entre idade, teores de ARR e faixa de diâmetro de poro no volume intrudido de mercúrio nas pastas estudadas, que dão a ideia mais detalhada do comportamento das faixas de diâmetro de poros, com o avanço da idade, em função da presença do ARR.

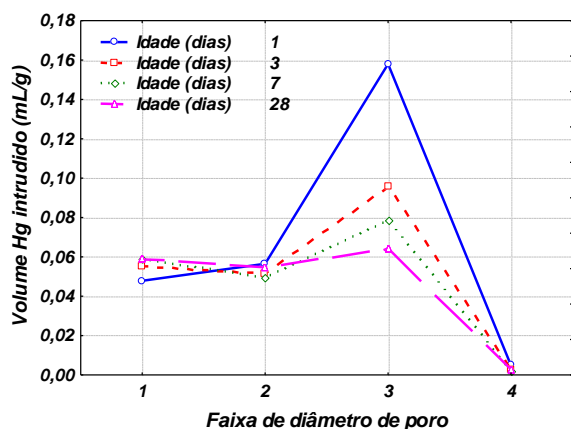
A pasta P60, de maior relação a/agl , apresenta com 1 dia de idade alta porosidade de capilares grandes (macroporos), sendo aumentada pela presença do ARR (Figura 91e). Com o avanço da hidratação, percebe-se a partir dos 3 dias uma progressiva redução nessa porosidade, não sendo marcante o efeito do ARR; pelo contrário, o ARR a partir desta idade não afeta expressivamente o volume de macroporos. A porosidade do gel e dos capilares médios (mesoporos) praticamente se mantém estável com a idade, para a pasta de referência, sem ARR; contudo, a presença do ARR, principalmente no teor de 2%, incorre num leve aumento da porosidade das fases hidratadas com a idade. Aos 28 dias, o volume de macroporos, mesoporos e poros de gel se equilibram, também com uma leve tendência de aumento dos mesoporos (poros médios) com 2% de ARR.

Já na pasta P80 (Figura 91f), com relação $a/agl = 0,3$, é importante observar que a porosidade da fase de gel e de mesoporos (responsáveis por afetar a retração e fluência) são preponderantes para todas as idades, em relação à outra pasta, o que justifica a maior retração autógena e menor retração por secagem para esta relação a/agl , no caso do concreto. O volume dos capilares grandes é mais alto com 1 dia de idade, apesar de estar próximo dos

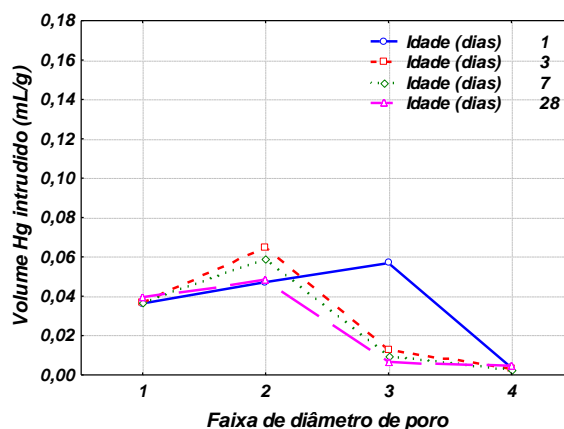
valores de mesoporos e poros de gel, e cai abruptamente a partir dos 3 dias, o que dá espaço a um leve aumento dos capilares médios nesta idade. O efeito do ARR é um pouco mais pronunciado na faixa 1 de diâmetro de poros (gel), pois em todas as idades a tendência é de aumento da porosidade de gel com este aditivo.

De maneira geral e apesar de o efeito não ser tão acentuado, o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio mostrou que o aditivo redutor de retração modifica a porosidade das pastas, tanto no sentido de aumentar a porosidade total, como de alterar a distribuição de tamanho de poros. Esse comportamento, associado à interferência do ARR na dissolução dos álcalis, pode explicar a queda, embora pequena, da resistência à compressão, principalmente com a incorporação de 2% de ARR.

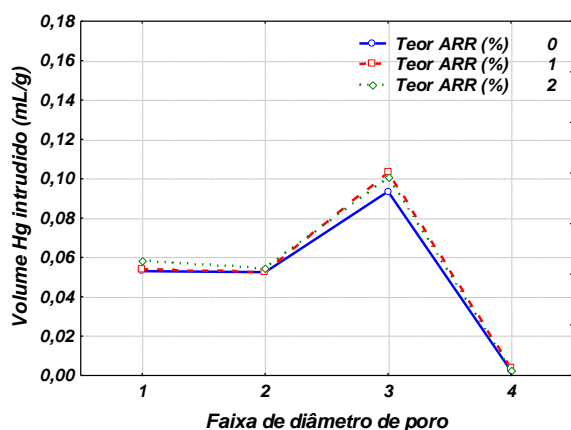
Por outro lado, vale ainda comentar que o leve aumento da porosidade para as duas pastas estudadas, com o uso do ARR, de maneira geral, se dá pelo aumento de poros de menor diâmetro (faixas 1 e 3 para a P60 e faixas 1 e 2 para a P80), o que de certa forma é benéfico, pois são justamente os poros de maior diâmetro (poros capilares) que propiciam maior facilidade de entrada de agentes agressivos para o interior do concreto, podendo diminuir sua durabilidade. Os resultados obtidos a partir dos ensaios de penetrabilidade de cloretos, carbonatação, permeabilidade à água e absorção ratificam essa afirmativa, uma vez que, de modo geral, os concretos com ARR demonstraram desempenho satisfatório frente à penetração dos agentes agressivos, diretamente relacionada à movimentação de água pelos capilares.



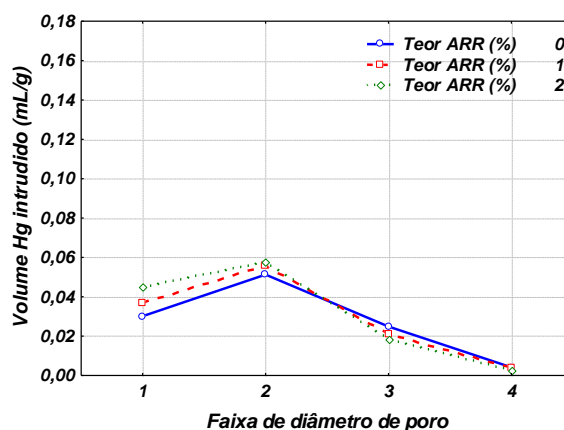
(a) P60: Efeito da pressão (poros) e da idade



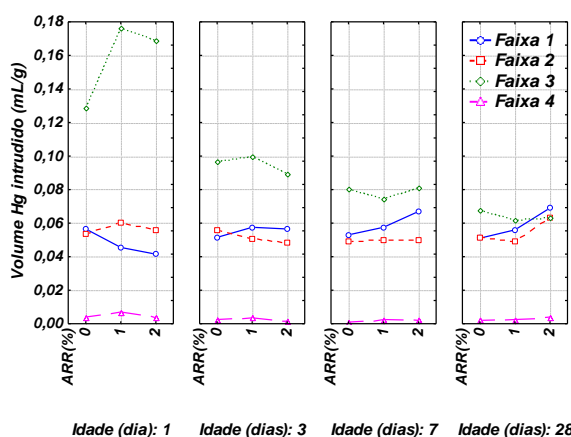
(b) P80: Efeito da pressão (poros) e da idade



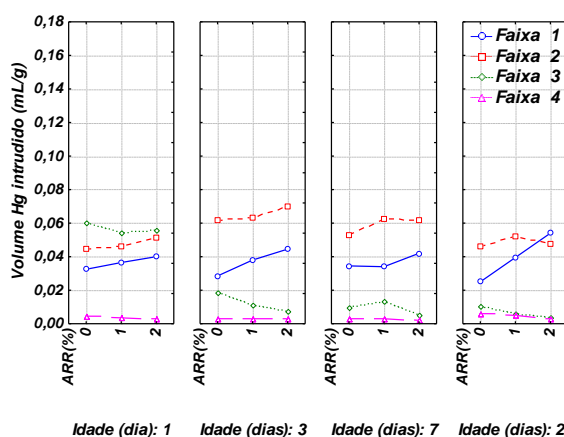
(c) P60: Efeito da pressão (poros) e teores de ARR



(d) P80: Efeito da pressão (poros) e teores de ARR



(e) P60: Efeito da pressão (poros), da idade e teores de ARR



(f) P80: Efeito da pressão (poros), da idade e teores de ARR

Figura 91 - Efeitos de dois e três fatores no volume de mercúrio intrudido para as pastas (P60 e P80) de cimento.

5.2.2 Análise Termogravimétrica - ATG

As curvas de TG e DTG das pastas estudadas em todas as condições encontram-se no Apêndice B. Para efeito de exemplificação, as curvas das pastas P60 e P80, nas condições sem ARR, com 1 e 2% de ARR, com 1 dia de idade estão apresentadas na Figura 92. Pode-se observar claramente os três picos característicos das reações endotérmicas durante o aquecimento das amostras conforme a seguir e mencionado no item 4.13.3:

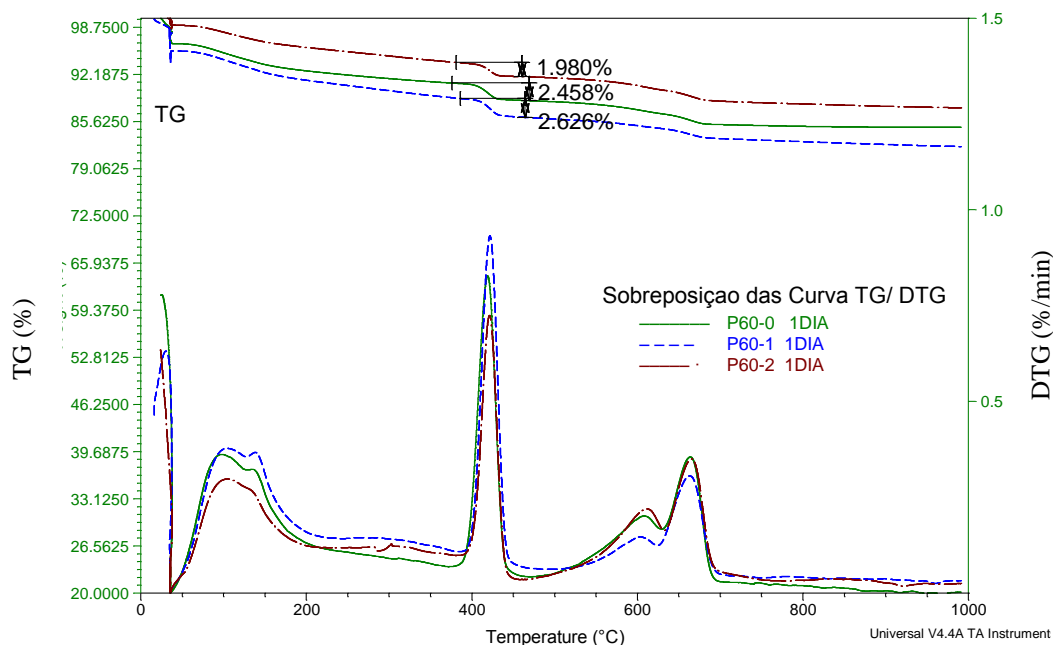
- a) liberação da água evaporável e parte da água combinada das fases hidratadas, em temperatura ao redor de 110°C;
- b) decomposição do hidróxido de cálcio, na faixa de temperatura entre 380 °C a 450°C;
- c) decomposição das fases carbonáticas no intervalo de temperatura entre 500 °C a 790°C.

De um modo geral ao se comparar as pastas com ARR com a referência, não se verifica alterações substanciais do perfil das curvas relacionados aos compostos hidratados resultantes do emprego do ARR analisando as curvas TG e DTG; isto significa dizer que não há alargamento/encurtamento das faixas de temperatura dos principais eventos. Entretanto, há uma discreta influência do ARR sobre a intensidade dos picos endotérmicos da curva, com destaque para um maior efeito do ARR para as curvas com temperaturas superiores a 500°C.

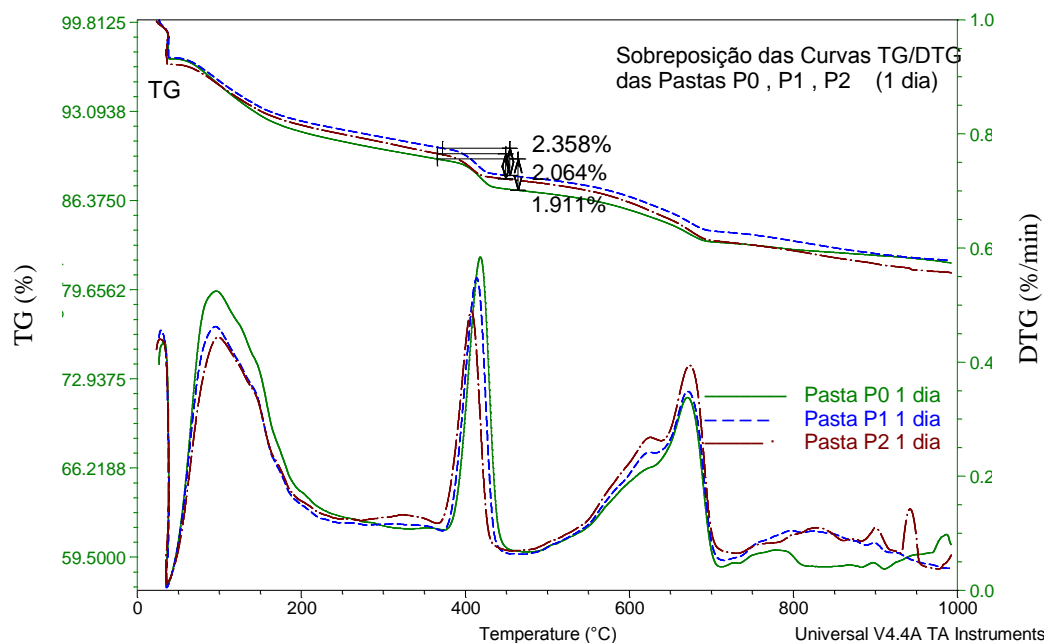
Objetivando uma melhor interpretação dos resultados, determinaram-se as perdas de massa, expressas em relação à massa de cimento calcinado, de determinadas faixas de temperatura da curva de DTG (segundo orientações de Taylor, 1997), conforme Figura 93, a fim de se obter:

- água combinada do C-S-H, da etringita (AFt), dos aluminatos, dos monossulfoaluminatos (AFm), que variaram numa faixa dos pontos A a B, conforme Figura 93. Nessa faixa de temperatura as reações que dão origem a estes compostos se sobrepõem, razão para ter se optado pela perda de água combinada destes produtos e não pela decomposição deles;
- água total quimicamente combinada, que abrange a perda na faixa de temperatura que vai do ponto A até o ponto C (Figura 93) fim do pico característico do hidróxido de cálcio – CH;

- teor de hidróxido de cálcio, na faixa de temperatura entre pontos B e C, com pico marcante da decomposição deste produto de hidratação do cimento;
- teor de carbonato de cálcio, no intervalo de temperatura entre C e D.



Curvas TG e DTG da pasta P60_0, P60_1 e P60_2 com 1 dia de idade



Curvas TG e DTG da pasta P80_0, P80_1 e P80_2 com 1 dia de idade

Figura 92 – Curvas TG e DTG (a) da P60 e (b) P80

Como já comentado e recomendado por Taylor (1997), para uma melhor avaliação do processo de hidratação numa análise termogravimétrica, os teores estimados dos produtos e a perda de água dos hidratos devem ser calculados em função da base final calcinada da amostra (massa a 1000°C). Essa recomendação, segundo Silva (2001), é importante, pois a representação da perda de massa em relação à massa inicial poderia introduzir erros nos resultados, já que o ponto inicial do ensaio com relação à quantidade de água na amostra (teor de umidade) é arbitrário. Dessa forma então, procedeu-se nesta pesquisa. Os limites de temperatura foram definidos na curva DTG, juntamente com a definição das respectivas perdas de massa ocorridas nas reações de decomposição. Os valores de perda de massa são apresentados no Apêndice B, bem como os demais dados da decomposição térmica do hidróxido de cálcio e do carbonato de cálcio.

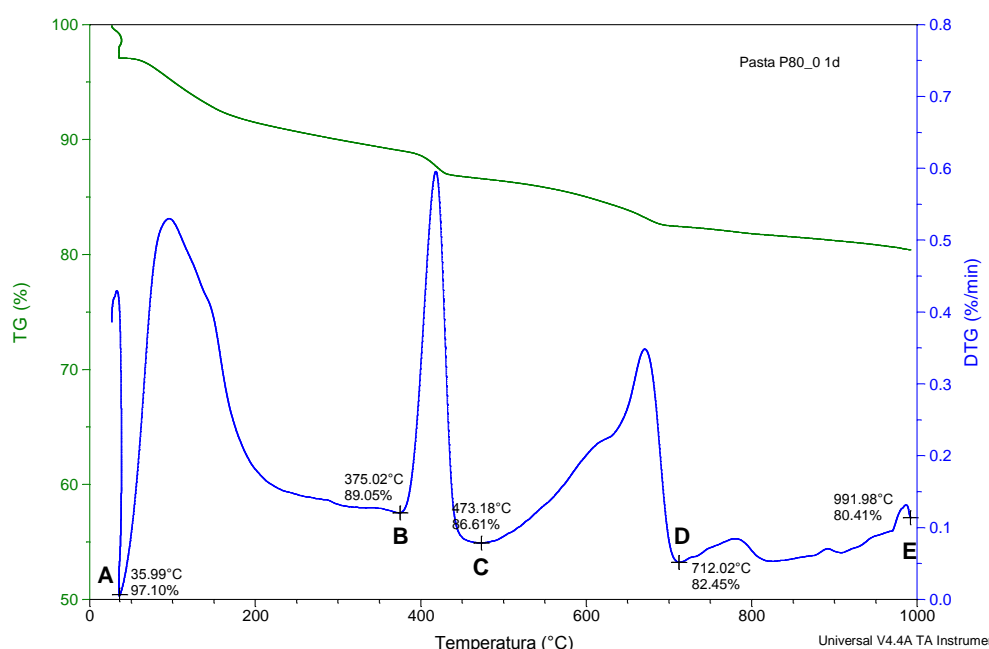


Figura 93 – Gráfico com curvas TG e DTG, esquemático dos pontos considerados para determinação das perdas de massa.

A Figura 94 apresenta os teores de perda de massa da água combinada do C-S-H, etringita, aluminatos e monossulfoaluminato, e da água total quimicamente combinada em função da idade e da presença do aditivo redutor de retração – ARR. De modo geral, observa-se que a idade de hidratação das pastas, independentemente do teor do ARR, tem influência nos teores de água liberada. Isso implica em que dizer que maiores idades resultam em maiores teores de água combinada, o que segundo Taylor (1997), significa maior grau de hidratação ou maturidade da pasta.

A incorporação do ARR parece não ter efeito sobre a água combinada dos hidratos, uma vez que nos resultados da termogravimetria (Figura 94), de maneira geral, não são constatadas tendências muito claras de comportamento em função da presença do ARR. Porém, com 1 dia de idade, é possível observar que o teor de 2% promove para as duas pastas uma perda ligeiramente maior de água do C-S-H/Aft (Figura 94a e 94b), o que pode significar um retardo na hidratação pelo uso do ARR nesta idade inicial, o que também é verificado no ensaio de pega das pastas, no qual o ARR provocou atraso no processo de endurecimento da pasta quando comparado com a referência – sem ARR.

A influência da relação a/agl no grau de hidratação pode ser vista na Figura 94c e 94d, com o percentual de perda de massa da água total quimicamente combinada. Comparativamente, observa-se nas pastas referência, que a perda de água combinada é menor para a maior relação a/agl (P60), indicando um retardo no desenvolvimento da hidratação desta pasta comparada ao P80; contudo a diferença nas perdas de massa é maior até a idade de 7 dias, com a tendência de minimização dessa diferença nas idades mais avançadas.

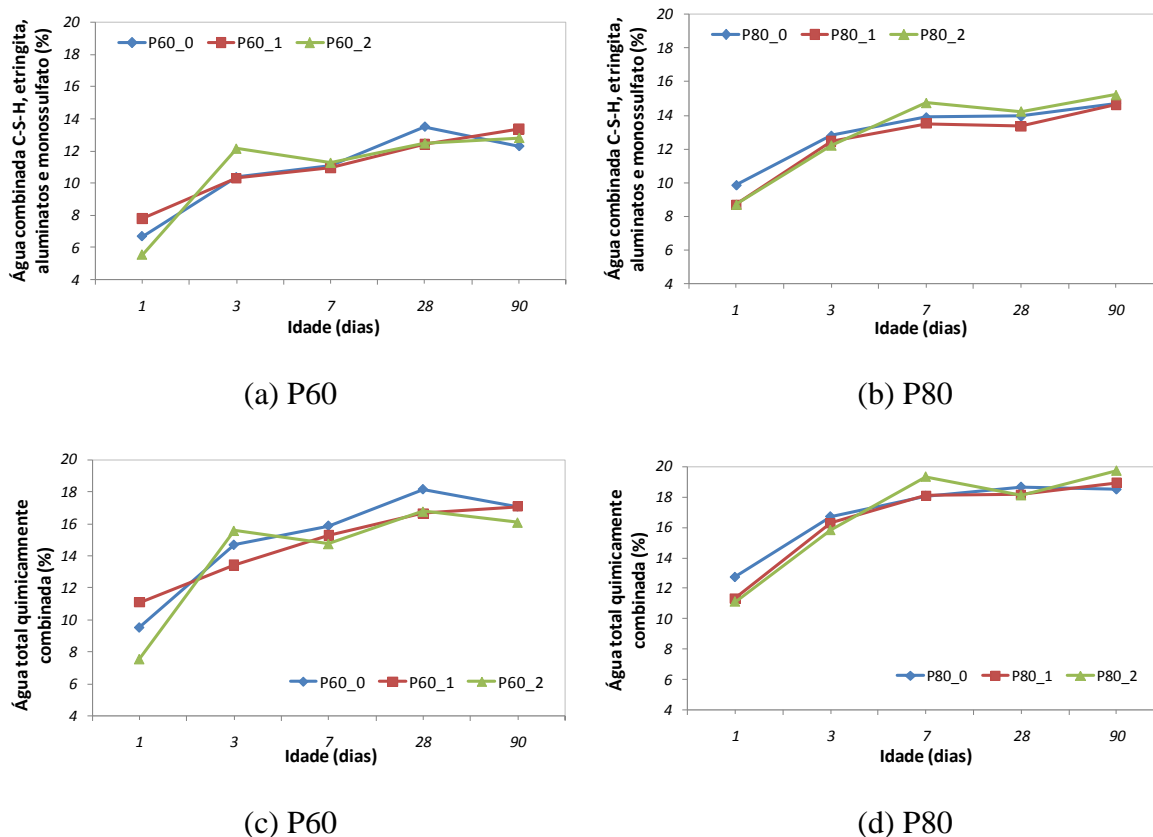
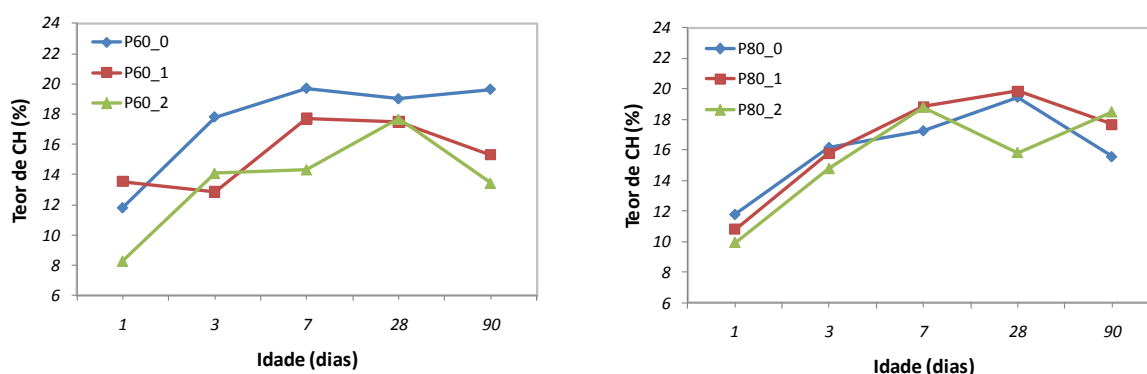


Figura 94 – Evolução da água combinada do C-S-H, etringita, aluminatos e monossulfato (a) e (b) e da água total quimicamente combinada (c) e (d) em função da idade e teor de ARR das pastas estudadas.

Ao se analisar notadamente as pastas referência, a hidratação das fases anidras do cimento Portland C_3A , C_3S , C_2S e C_4AF incorre no crescente aumento da Portlandita ($Ca(OH)_2$ ou simplesmente CH), conforme pode ser visto na Figura 95a e 95b, principalmente nas primeiras idades (1 e 3 dias), porém com a tendência de equilíbrio ou mesmo de redução nas idades posteriores, muito provavelmente devido ao processo de hidratação cimento-sílica ativa, quando há o consumo de hidróxido de cálcio, dando origem ao C-S-H (reação pozolânica).

A análise termogravimétrica das duas pastas não apontou comportamentos únicos quanto à incorporação do ARR, no que se refere à formação da Portlandita. Para a pasta P60, de maior relação a/agl (= 0,4), o ARR, em qualquer dos dois teores, de uma forma geral parece inibir a formação do hidróxido de cálcio quando comparado à pasta sem ARR. Por outro lado, na pasta de menor relação a/agl (= 0,3), a presença do ARR não mostra uma tendência clara de comportamento, ou mesmo demonstra não ter influência expressiva sobre o teor de Portlandita, ao se comparar com a pasta referência. Enquanto na idade de 1, 3 e 28 dias, a incorporação de 2% de ARR promoveu uma leve redução na formação de hidróxido de cálcio, já nas idades de 7 e 90 dias, ocorreu exatamente o contrário; sem contar que a pasta com o teor de 1% de ARR, de um modo geral, apresenta maiores teores de portlandita, embora de maneira discreta.



(a) P60

(b) P80

Figura 95 – Efeito da idade e da presença do ARR no CH das pastas estudadas: (a) P60 e (b) P80

A bibliografia é bastante escassa sobre a influência do ARR na microestrutura, principalmente no diz respeito à formação dos produtos de hidratação. Em um dos poucos trabalhos encontrados, Maltese et al. (2004) estudaram uma pasta de cimento Portland, relação a/c de 0,35, com a incorporação de 3% de ARR à base de propilenoglicol. A análise da curva TG

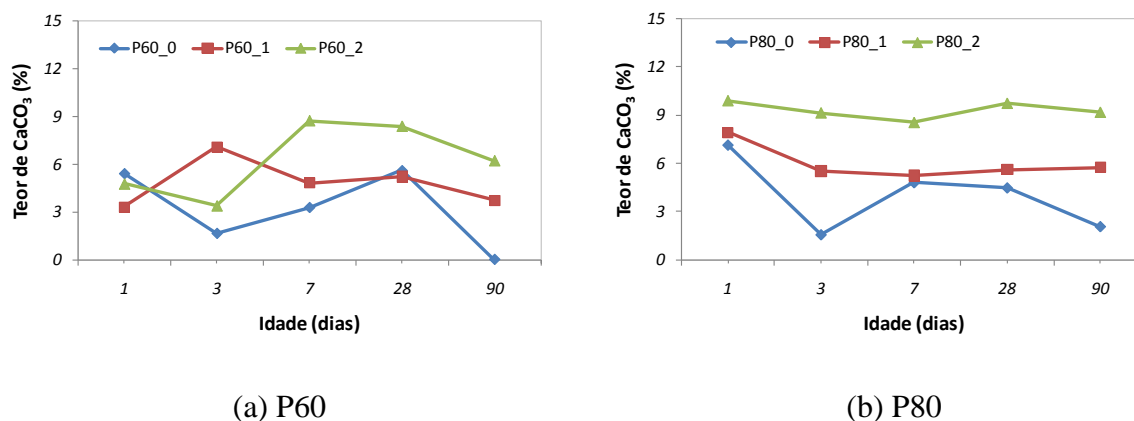
apontou que o ARR dificultou a formação do hidróxido de cálcio, com 2 h e 24 h de hidratação. Caso sejam consideradas as duas idades iniciais das duas pastas estudadas nesta pesquisa (Figura 95), no teor de 2% de ARR (teor mais efetivo de redução de retração autógena e secagem), pode-se supor que houve uma inibição à formação da Portlandita, embora os dados não sejam suficientes para confirmar se a diferença, principalmente entre P80_0 e P80_2, é significativa.

Em um extensivo estudo sobre a interação entre o ARR e o fluido no poro da pasta de cimento Portland, Rajabipour et al. (2008) confirmaram a hipótese de que a presença de ARR reduz a solubilidade do K_2SO_4 e do Na_2SO_4 . Estes autores se embasaram em outros pesquisadores (PENKO, 1983; TAYLOR, 1990, GARTNER et al., 2002) que relatam a efetividade dos álcalis-sulfatos em agir como aceleradores e ainda que uma alta concentração de íons álcalis no fluido do poro leva à considerável aceleração da hidratação do cimento e desenvolvimento da resistência nas idades iniciais. Conseqüentemente, quando o ARR dificulta a dissolução dos álcalis, provoca uma redução na velocidade de hidratação e no ganho de resistência, assim como um retardo no tempo de pega. Dessa forma, seria razoável esperar para as duas pastas estudadas uma tendência de diminuição do teor de CH ao se empregar o ARR, principalmente no teor de 2%. Entretanto, este comportamento só é observado na P60 e nas idades iniciais do P80, de uma forma mais leve.

A constatação feita por Rajabipour et al. (2008) pode explicar os resultados obtidos com a incorporação, principalmente de 2% de ARR, como a maior perda de água combinada na idade de 1 dia, o atraso no processo de endurecimento das pastas com ARR, e a redução, mesmo que pequena, no ganho de resistência à compressão dos concretos contendo ARR.

No que se refere à fase carbonática ($CaCO_3$), pode-se observar, na Figura 96, que o ARR, de maneira geral, influencia a quantidade de carbonato de cálcio, no sentido de aumentá-la, principalmente com a incorporação de 2% de ARR.

O efeito do ARR na fase carbonática apresentou-se mais intensa para a pasta P80, com o comportamento crescente de $CaCO_3$, à medida que se aumenta o teor de ARR, em todas as idades de hidratação. O que não ocorreu com a pasta P60, na qual o efeito de 2% de ARR é mais pronunciado nas maiores idades.



(a) P60 (b) P80
 Figura 96 – Efeito da idade e da presença do ARR no CaCO₃ das pastas estudadas: (a) P60 e (b) P80

Não foi encontrado nada na literatura que explorasse a influência do ARR sobre a decomposição das fases carbonáticas, que pudesse contribuir para o entendimento dos resultados obtidos. Entretanto, sabe-se que este aditivo redutor de retração é base glicol, portanto base orgânica. O aumento da perda de massa na decomposição da fase carbonática pode ter sido causado pela interação da fase orgânica do ARR com as fases do cimento. Taylor e Turner (1987), que realizaram análises térmicas em pastas de cimento tratadas com líquidos orgânicos, constataram uma alteração na curva termogravimétrica, em razão da formação gradual de fases carbonáticas, pela interação da fase orgânica com as hidroxilas provenientes das fases hidratadas. Segundo os autores, é possível que haja interação do íon carboxilato formado no aquecimento com fases orgânicas presentes na amostra, formando íons carbonato.

Outra provável fonte de fase carbonática pode ser a ocorrência de carbonatação das fases hidratadas da amostra por ação do gás carbônico atmosférico previamente ao ensaio de termogravimetria. Entretanto, por meio do ensaio de carbonatação natural (item 5.1.12.3), pôde-se evidenciar que os concretos com ARR, após 03 anos de exposição, não apresentaram coeficiente de carbonatação relevante frente aos referências, indicando que a presença de ARR não favorece as reações do CO₂ do ar com os hidratos da pastas. Adicionalmente, vale comentar que os resultados de ATG do cimento puro mostram o teor 5,57% de carbonato de cálcio, o que é representativo, mas esperado, uma vez que os cimentos CPV podem receber adição de até 5% de filler calcário. No entanto, no cálculo do teor de carbonato de cálcio (mostrado na Figura 96), para todas as pastas em todas as idades, foi descontado o teor de CaCO₃ do cimento. Com isso e a partir dos resultados de carbonatação nos concretos pode-se supor que parte do Ca(OH)₂ tenha se transformado em carbonato, por uma possível interação

com o ARR, não em função do aquecimento no ensaio de termogravimetria, mas durante o processo de hidratação. Esta consideração pode também suscitar uma outra hipótese para os valores menores de *hidróxido de cálcio* nas pastas com ARR quando comparados à referência: provavelmente, não necessariamente o ARR inibe a formação do Ca(OH)_2 , como discutido anteriormente, mas na interação com o ARR, seus teores apresentam-se mais baixos pela sua transformação em fase carbonática.

Conforme já comentado, o ensaio de termogravimetria foi realizado em uma só amostra de cada situação, em razão do baixo coeficiente de variação que se tem neste ensaio, mas também pela programação do laboratório, que tornou bastante difícil fazer, pelo menos em duplicatas. De toda forma, quanto à análise termogravimétrica, as repetições do ensaio seriam necessárias para confirmar as observações aqui mencionadas. Ademais, uma análise termogravimétrica do ARR poderia esclarecer algumas dúvidas, mas desistiu-se de realizá-la pelo receio de danificar o equipamento, face às recomendações de sua utilização.

5.2.3 Difração de Raios-X

A análise qualitativa dos espectros de difração de raio-x teve como objetivos a identificação das fases cristalinas anidras e hidratadas do cimentos nas pastas, e principalmente a investigação e identificação de eventuais fases cristalinas formadas por interação dos compostos do cimento com o aditivo redutor de retração – ARR.

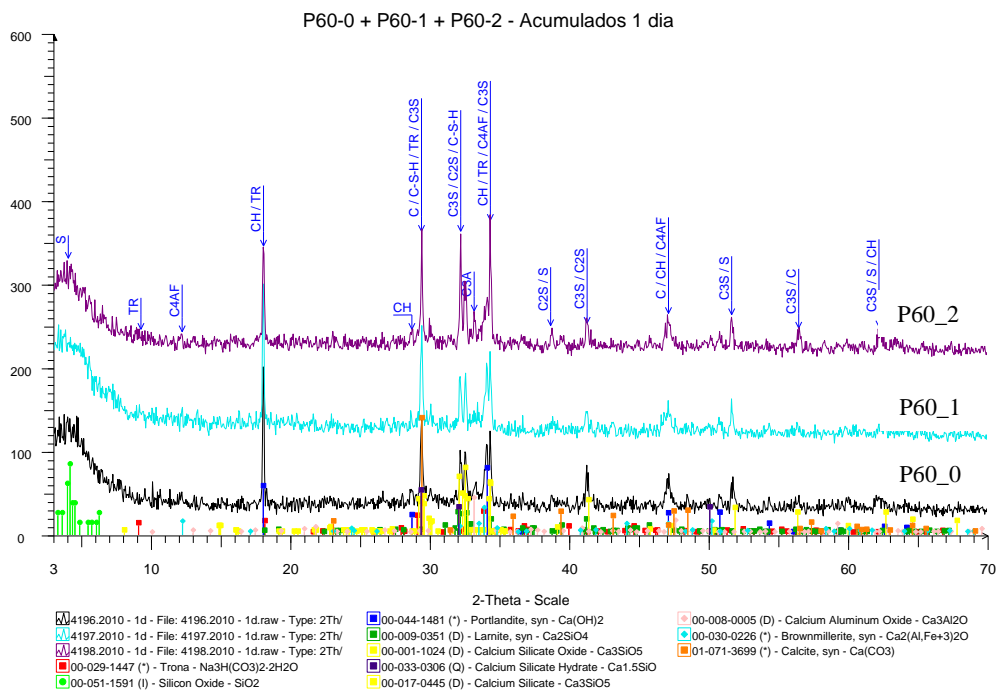
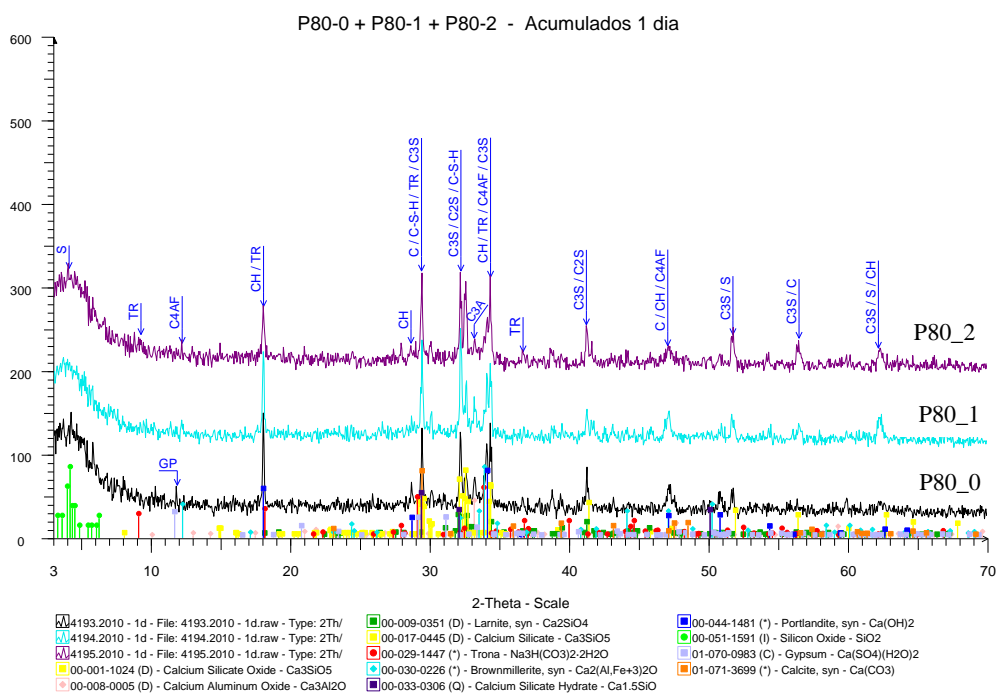
Na Figura 97 estão apresentados, respectivamente, os difratogramas das pastas P60 e P80, com 1 dia de idade, nas 03 condições, sem ARR, com 1 e 2% de ARR. Os demais difratogramas estão apresentados no Apêndice B. De uma forma geral, das fases cristalinas hidratadas do cimento presentes nas pastas, o *hidróxido de cálcio* foi o mais facilmente detectável por este método, identificado pelos picos que correspondem aos seguintes espaçamentos interplanares (d): 4,91; 3,11; 2,61; 1,92; 1,79; 1,68 Å. A fase cristalina do *C-S-H* se apresenta como uma banda difusa, situada, segundo Taylor (1990) citado por Silva (2001), entre os ângulos relativos aos espaçamentos de 3,04 e 2,70 Å; essa banda difusa, nesta pesquisa, foi detectada de forma mais evidente aos 28 dias, na forma de um elevação da linha base, que inicia em torno de $2\theta = 25^\circ$ e termina em $2\theta = 34^\circ$ para a pasta P80, e para a pasta P60, também inicia em $2\theta = 25^\circ$, mas termina em $2\theta = 32^\circ$. Nas primeiras idades, em geral, foi

identificado o C-S-H nos picos com distâncias interplanares (d) referentes a $3,03 \text{ \AA}$ e $2,77 \text{ \AA}$ e ângulos em torno de $2\theta = 29^\circ$ e 32° , respectivamente, com sobreposição de outros compostos. Uma banda amorfa de SiO_2 é encontrada em todas as pastas, no ângulo 2θ entre 3° e 6° , em razão da presença da adição de sílica ativa.

Nas pastas analisadas não foram observados picos pertencentes à *etringita*, nem mesmo do monossulfoaluminato de cálcio hidratado. Certamente, essas fases se apresentam em pequenas quantidades (inferiores à 5% - limite mínimo de detecção da técnica) ou com baixo grau de cristalinidade, seja por suas características estruturais (TAYLOR, 1990 *apud* SILVA, 2001) ou por consequência da moagem. Os picos relativos às fases carbonáticas como a calcita (CaCO_3) e a trona (Na_2CO_3) são observados tanto nas pastas com ARR, quanto nas referências.

Em todas as idades das pastas hidratadas foram detectados os picos de fases do clínquer, como o C_3S , C_2S , C_3a e C_4AF , embora sobrepostos a picos de compostos hidratados. Ainda aos 28 dias, foram encontrados picos atribuídos a estas fases do clínquer, indicando a presença de muitos grãos anidros de cimento, característica de pastas com baixa relação a/agl, já que a pouca água existente é insuficiente para hidratar todas as partículas do cimento, favorecendo a presença de grãos anidros até em idades mais avançadas do material.

Quanto à influência do ARR na hidratação do cimento Portland nas pastas, a partir da difração de raios-x não foram detectados picos, além dos característicos de pastas de cimento, que pudessem indicar a formação de algum produto de interação do aditivo com o cimento, e se ocorreu tal interação, o produto é mal cristalizado ou amorfo. Em outras palavras, pode-se dizer que os resultados deste método de ensaio, em princípio, demonstram que o ARR não interagiu quimicamente com os compostos do cimento hidratado, de modo que se obtivesse o indicativo de algum composto diferente do observado na mistura de referência – sem o ARR ou de compostos diferentes daqueles encontrados tradicionalmente em pastas de cimento.

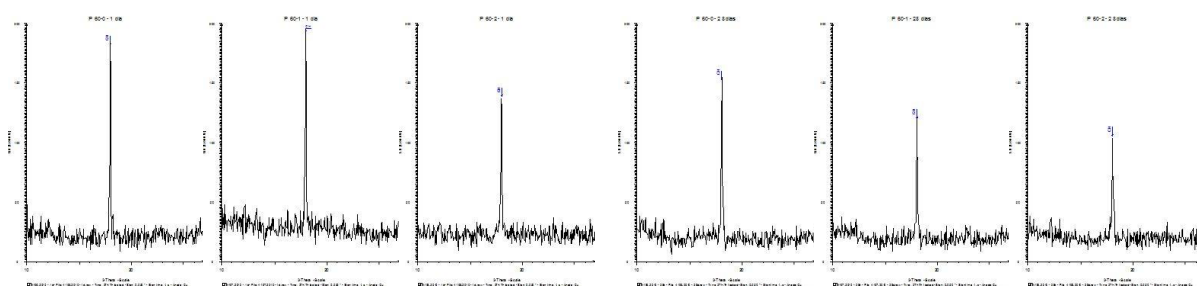
(a) Pasta P60 ($a/agl = 0,4$) com 01 dia de idade.(b) pasta P80 ($a/agl = 0,3$) com 01 dia de idade.**Legenda:**

C ₄ AF – aluminato de cálcio	C-S-H – silicato de cálcio hidratado
C ₃ A – aluminato de cálcio tetracálcico	C ₃ S e C ₂ S – silicatos de cálcio
S – óxido de silício	CH - Portlandita
TR – trona / carbonato de sódio	C – calcita / carbonato de cálcio
	C – carbono

Figura 97 – Efeito do aditivo redutor de retração – ARR na difração de raios X: (a) P60 e (b) P80, com 1 dia de idade.

No que se refere à influência do ARR nos produtos de hidratação do cimento, as seguintes considerações podem ser feitas, a partir de uma análise qualitativa dos difratogramas obtidos:

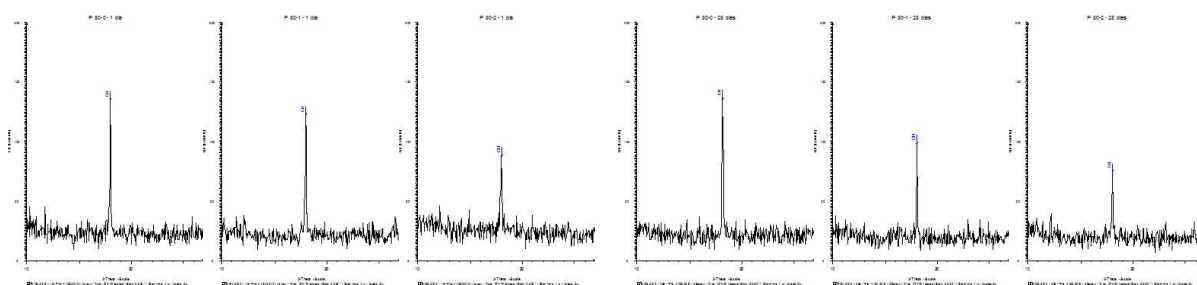
a) *Hidróxido de cálcio*: a intensidade dos picos relativos a este composto apresenta-se menor com o emprego do ARR, notadamente para o teor de 2%, para ambas as pastas e em todas as idades (Figuras 98 e 99), o que indica que o aditivo redutor de retração afeta a quantidade de hidróxido de cálcio (CH), ou inibindo a sua formação ou consumindo-o no processo de interação entre o ARR e a portlandita. É bem verdade que essa consideração é fundamentada na análise da parte cristalina da fase, uma vez que a intensidade dos picos em espectros de difração de raios X retrata a cristalinidade de uma fase. Como não há indicações claras de que o ARR possa reduzir a cristalinidade ou provocar uma amorfização do composto, a hipótese de que o ARR de fato influencia o teor de CH, seja por consumi-lo ou restringir a sua formação, pode ser mantida, em conformidade com parte dos resultados de análise termogravimétrica e os trabalhos de Maltese et al. (2004);



(a) P60_0, P60_1 e P60_2, com 1 dia

(b) P60_0, P60_1 e P60_2, com 28 dias

Figura 98 – Efeito do ARR na intensidade do pico principal do hidróxido de cálcio – CH nas pastas P60, (a) com 1 dia de idade e (b) com 28 dias de idade.



(a) P80_0, P80_1 e P80_2, com 1 dia

(b) P80_0, P80_1 e P80_2, com 28 dias

Figura 99 – Efeito do ARR na intensidade do pico principal do hidróxido de cálcio – CH nas pastas P80, (a) com 1 dia de idade e (b) com 28 dias de idade.

b) *Silicato de cálcio hidratado*: não há um comportamento muito claro sobre a influência do ARR na formação do C-S-H, além de não ser facilmente identificado nos difratogramas, diferentemente do observado com o CH. Na pasta P60, enquanto a intensidade dos picos do C-S-H (espaçamentos interplanares iguais a 3,03 e 2,77 Å), nas idades de 1 e 3 dias, apresenta-se maior para as pastas com ARR, em especial para o teor de 2%; na idade de 7 dias ocorre o inverso, na pasta de referência a intensidade do pico é maior que nas pastas com ARR. Já aos 28 dias, a banda difusa do C-S-H parece não se alterar com o emprego do ARR. Na pasta P80, em geral nas idades de 1, 3 e 7 dias, a intensidade do picos do silicato de cálcio hidratado detectado com $d = 3,03$ e $2,77$ Å não demonstra diferenças relevantes entre as pastas com ou sem o aditivo redutor de retração. Mas aos 28 dias, observa-se uma leve redução na banda do C-S-H das pastas com ARR, com destaque para o teor 2%. Dessa forma, com base nestes resultados, é razoável acreditar que o ARR não afeta de forma relevante a formação do C-S-H das pastas. Relativamente, este resultado está consistente com os resultados de termogravimetria, de teor de água combinada dos hidratos (considerando que o C-S-H está presente em maior quantidade), nos quais observou-se que, de maneira geral, a incorporação de ARR parece não afetar a água combinada; de outra forma, pode-se supor que o ARR não altera expressivamente a quantidade dos hidratos formados. No entanto, como o C-S-H é difícil de ser identificado, se existe um retardo na formação do Ca(OH)_2 com o emprego do ARR, presume-se que também exista um retardo na formação do C-S-H, já que a reação de ambos os compostos provém da reação dos silicatos de cálcio com a água, formando C-S-H e Ca(OH)_2 . Assim, certamente ocorre um retardo de todo o processo de hidratação, com redução tanto do hidróxido de cálcio quanto do silicato de cálcio hidratado, o que é confirmado com o retardo da formação do patamar de percolação (vide item 5.1.2). Melo Neto (2008), empregando cimento de escória ativada, a partir dos resultados de difratometria em pastas com relação $a/c = 0,48$, concluiu que o ARR, além de retardar o desenvolvimento da hidratação, reduz a quantidade do C-S-H formado.

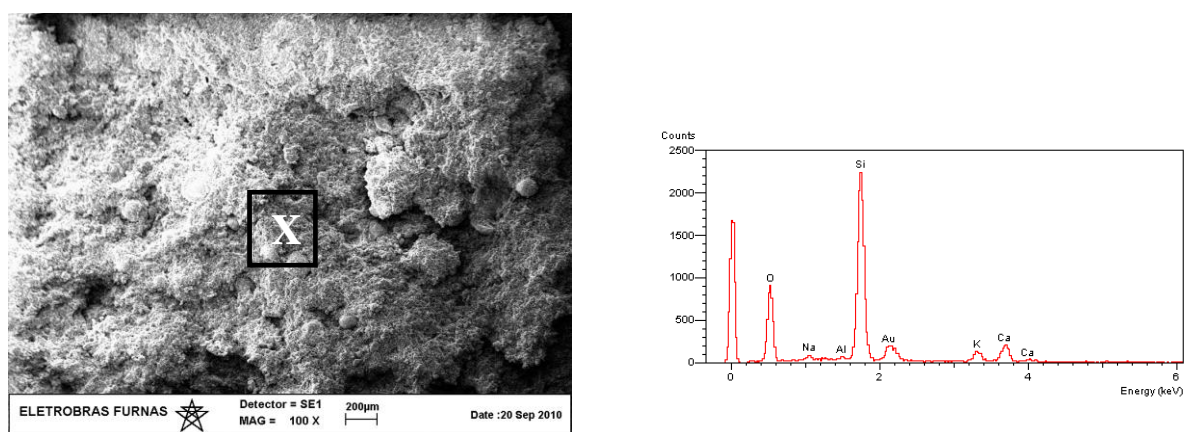
c) *fases carbonáticas*: foram detectados alguns picos de calcita e trona nas pastas, todavia, em razão de os picos principais (plano principal de simetria) destas fases ocorrerem sobrepostos com picos de fases mais importantes (ex: o pico principal do CaCO_3 ocorre a uma $d(\text{Å}) = 29,40$, semelhantemente ao C-S-H), a análise mais detalhada sobre a influência do ARR ficou comprometida.

5.2.4 Microscopia eletrônica de varredura - MEV

A análise microscópica foi realizada nas pastas P60 e P80, nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias. A seguir são descritas as principais observações realizadas na análise microscópica e química das pastas em MEV. É válido salientar, que, frente à heterogeneidade da microestrutura, é provável que as características descritas não sejam válidas para as amostras como um todo.

Inicialmente, a partir de uma varredura em todas as superfícies de análise, observou-se alguns aspectos diferenciados das pastas com ARR em relação àquelas sem o aditivo redutor de retração, no tocante à presença de material solto. Foi verificada uma pulverulência relevante na pasta de maior relação a/agl – P60, principalmente na idade de 1 dia e mais intensamente nas pastas com ARR, diretamente proporcional ao aumento do teor do aditivo, que prejudicou as análises nas primeiras idades (1 e 3 dias) da P60. A análise (Figuras 100 e 101) indicava que a pulverulência (material solto na superfície de fratura) observada deveria ser cimento anidro e sílica ativa não reagida, em decorrência, muito provável, da ação do ARR em retardar o processo de hidratação.

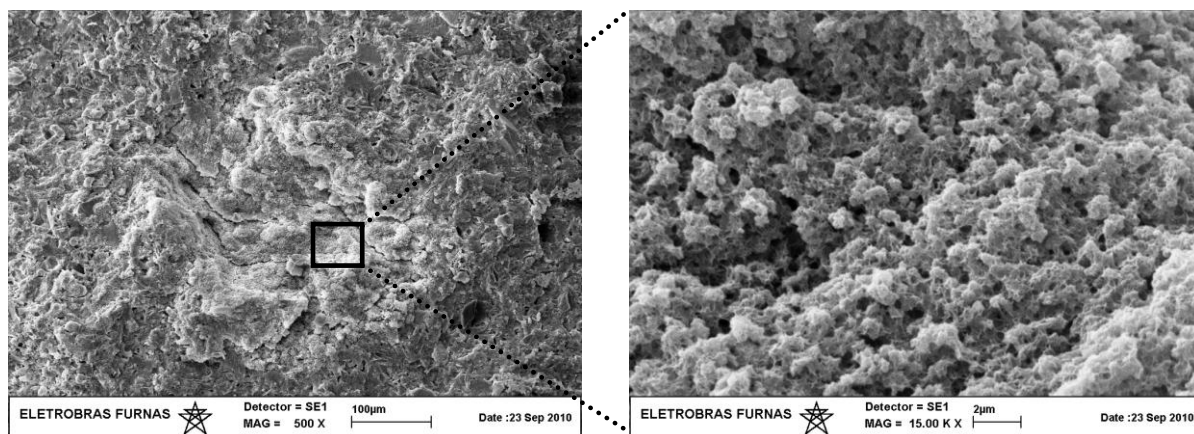
Na pasta P80, também foi observada tal pulverulência nas amostras, porém de uma forma muito mais amena, e assim como a P60, as pastas P80 com ARR apresentaram-se um pouco mais pulverulentas que a de referência. Para ambas as pastas, com o crescimento da idade essa pulverulência diminuía, muito provavelmente em razão do processo da hidratação do cimento somado à conseqüente reação pozolânica da sílica ativa.



(a)

(b)

Figura 100 – (a) Aspecto da superfície da pasta P60_2, com 1 dia de idade, apresentando elevada pulverulência e (b) espectro da microanálise realizada no centro da imagem, em X, região com grande concentração de sílica ativa e grãos anidros de cimento.



(a)

(b)

Figura 101 – (a) Região da pasta P60_1, aos 3 dias, com maior pulverulência, em meio a hidratos - C-S-H e (b) ampliação da região de pulverulência, com indícios de formação de C-S-H.

A presença de grãos de cimento anidro e sílica ativa solta nas pastas com ARR constatada nas análises microscópicas leva-se a supor que este aditivo inibe não só a reação pozolânica da sílica ativa, mas todas as reações de hidratação nas idades iniciais. Esta hipótese e as constatações com relação à pulverulência das pastas estão bastante coerentes com a análises termogravimétrica e de difração de raios-x, nas quais se observou uma redução de hidróxido de cálcio ao se utilizar o ARR. Com isso, a reação pozolânica fica comprometida, pela restrita disponibilidade de Portlandita para reagir com adição mineral.

No ensaio de porosimetria de mercúrio verificou-se, mesmo que discretamente, uma alteração na porosidade das pastas com ARR em relação às de referência. Na análise microscópica, não se observaram diferenças substanciais entre as pastas, sem e com ARR, no que se refere à porosidade. Entretanto, evidenciou-se nas pastas sem e com ARR, preenchimento dos poros com aglomerações de sílica ativa e poros já tamponados, que se presume serem resultados do efeito filler e pozolânico da adição mineral empregada (Figura 102 a 105). Este tamponamento do poros é perceptível desde a primeira idade, contudo, mais fortemente à medida do avanço da hidratação.

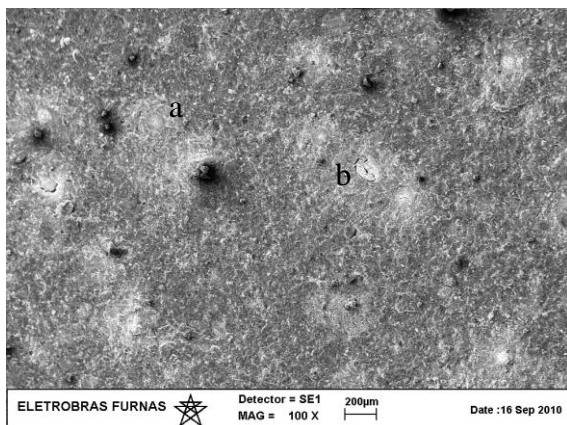


Figura 102 – Aspecto geral da P80_0, aos 7 dias, mostrando (a) poros tamponados e (b) com aglomerações de sílica ativa.

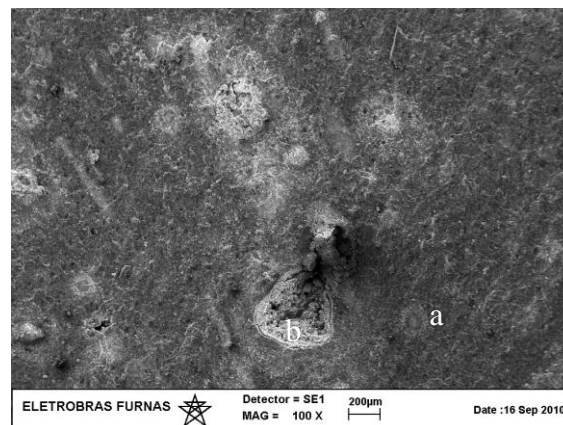


Figura 103 – Aspecto geral da P80_2, aos 7 dias, mostrando (a) poros tamponados e (b) com precipitações de sílica ativa.

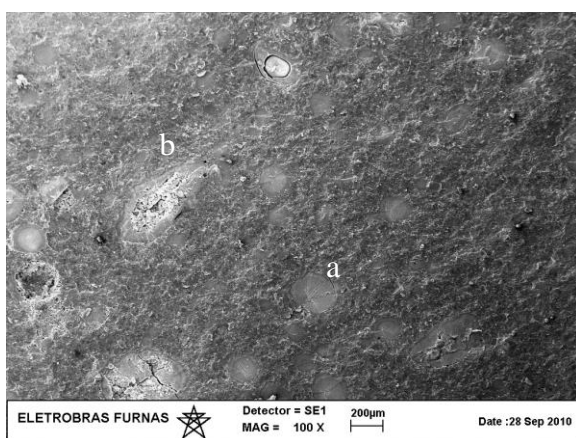


Figura 104 – Aspecto geral da P60_0, aos 28 dias, mostrando (a) muitos poros tamponados e (b) com aglomerações de sílica ativa.

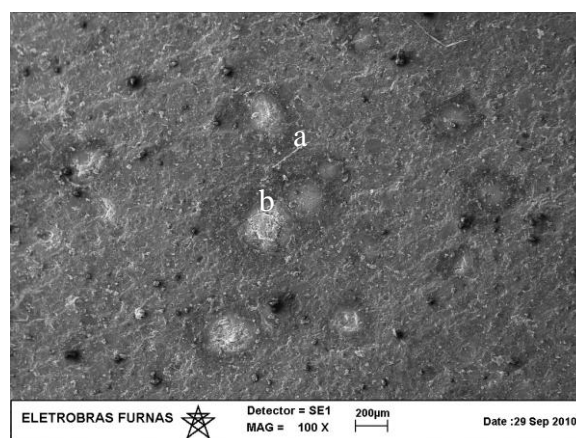


Figura 105 – Aspecto geral da P60_1, aos 28 dias, mostrando (a) poros tamponados e (b) com aglomerações de sílica ativa, em processo de tamponamento.

As análises realizadas no interior de alguns poros preenchidos, independentemente da presença de ARR, mostram crescimento de pequenos cristais aciculares (Figura 106). A análise química por energia dispersiva, embora bastante complicada em virtude das dimensões das fases, mostra que os cristais são formados possivelmente pelos elementos: Na, Ca, C e O, conforme espectro da Figura 107a (P60_0); os demais elementos detectados são provenientes da sílica ativa, semelhantemente ao espectro apresentado na Figura 100b. A morfologia é similar para a pasta referência e pasta com ARR. Tampouco observou-se alteração nessas formações com a idade; embora na Figura 106 se demonstrem imagens das pastas aos 07 dias, tais formações foram detectados em outras idades. O que ocorreu, como já comentado, foi um maior tamponamento com a idade, mas aqueles poros que não tinha sido

totalmente tamponados aos 28 dias ou que nesta idade ainda continham material solto (sílica anidra), apresentaram esta mesma morfologia.

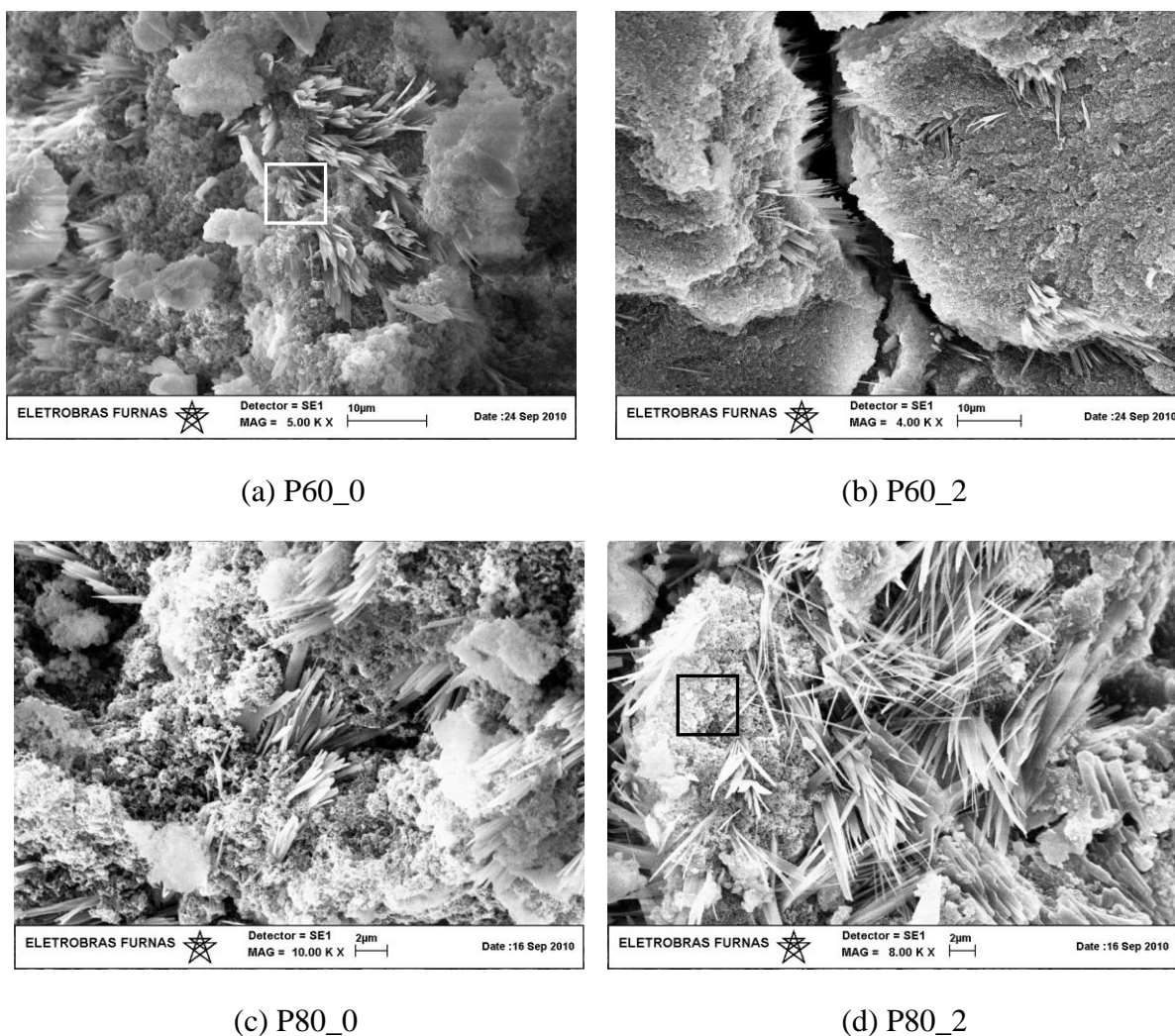


Figura 106 – Aglomerações de cristais nos poros das pastas aos 07 dias de hidratação, em meio às partículas de sílica ativa em reação: (a) P60_0, (b) P60_2, (c) P80_0 e (d) P80_2.

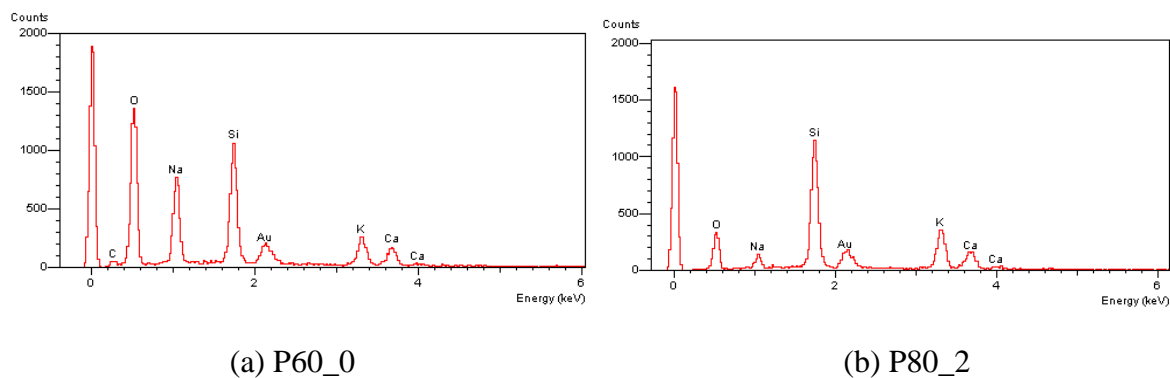
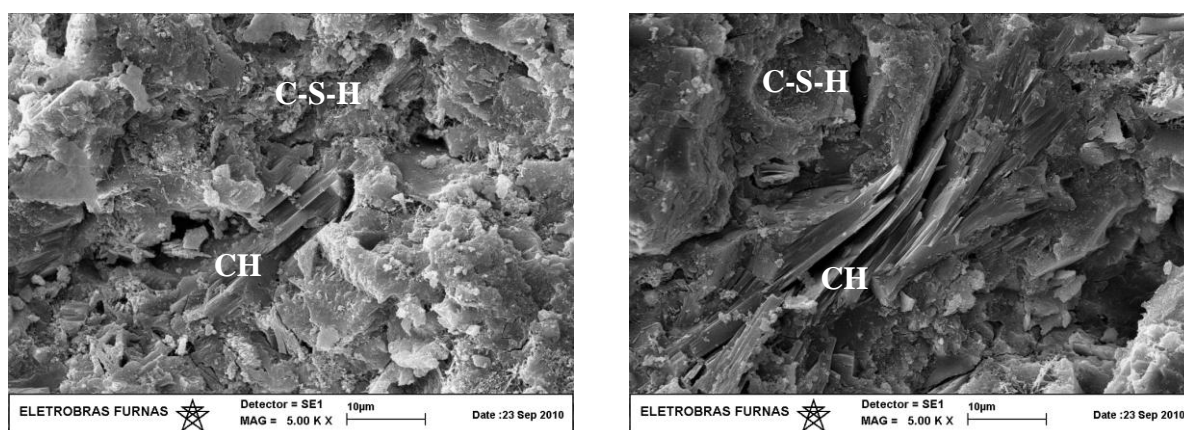


Figura 107 – Espectros das microanálises realizadas (a) no centro da Figura 108a e (b) à esquerda da Figura 108d.

Concernente ao *hidróxido de cálcio*, embora a análise termogravimétrica e a difração de raios x acusem uma redução na quantidade do CH com o uso do ARR, na análise microscópica não se conseguiu ratificar essas observações, tampouco se observou alteração de morfologia com o uso do ARR.

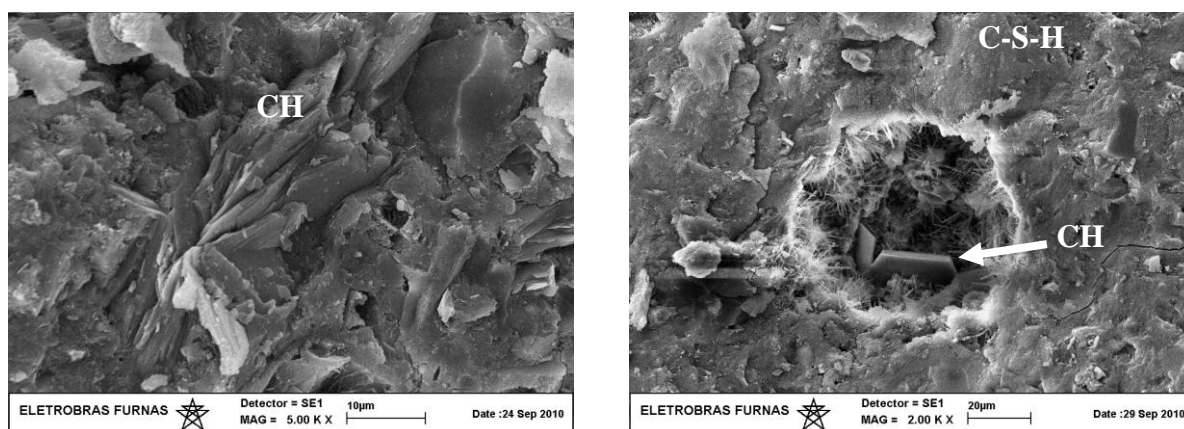
As formações de hidróxido de cálcio, incrustadas no C-S-H ou no interior de poros, foram detectadas em todas as pastas, sem e com ARR, com morfologias em placas delgadas empilhadas, com maior frequência (Figuras 108a, 108b e 109a), sem morfologia definida (Figura 110a); em placas mais robusta em maior idade (Figura 111b); algumas em placas hexagonais, principalmente em regiões com vazios (Figuras 109b e 110b) e em poucos casos, com configuração curva (Figura 111a).



(a) P60_0

(b) P60_1

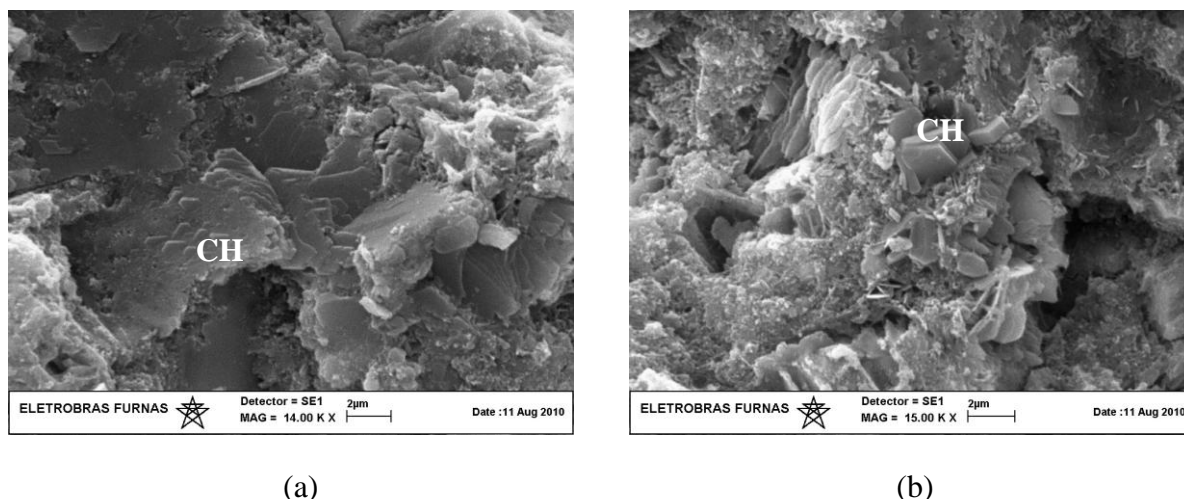
Figura 108 – Regiões com hidróxido de cálcio (CH), em placas, em meio a hidratos (C-S-H), aos 03 dias de idade: (a) pasta P60 sem ARR e (b) pasta P60 com 1% de ARR.



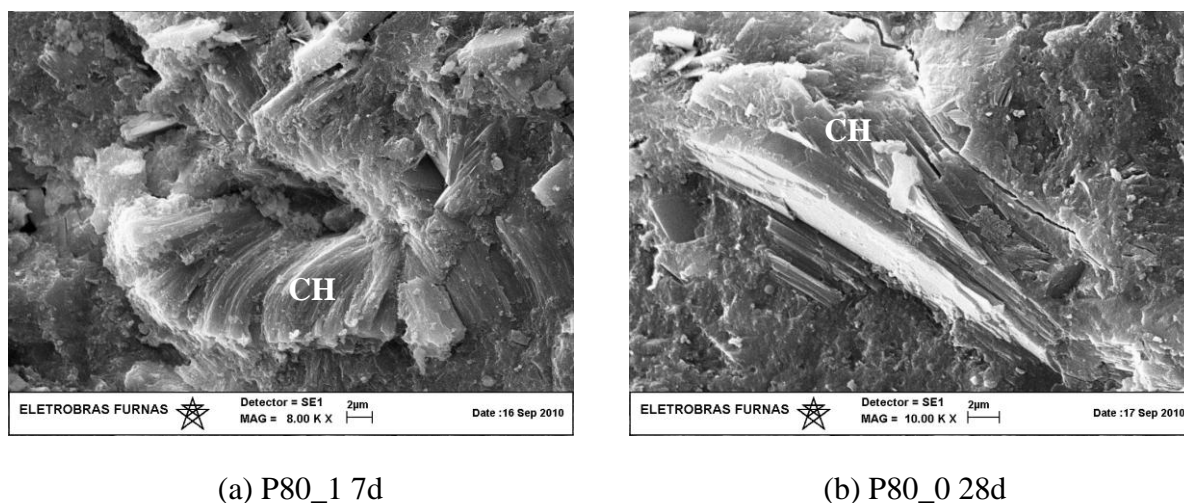
(a)

(b)

Figura 109 – (a) Aspecto do hidróxido de cálcio na pasta P60 com 1% de ARR, aos 7 dias, em placas delgadas e (b) aos 28 dias, com morfologia hexagonal no interior de um poro.



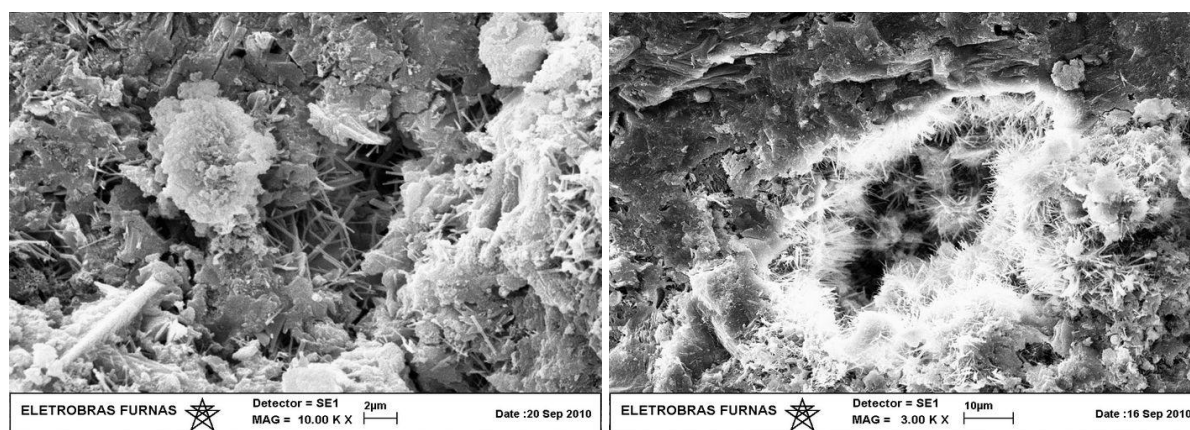
(a) (b)
 Figura 110 –Aspecto dos cristais de hidróxido de cálcio na pasta P80, com 1 dia de idade: (a) sem morfologia definida na pasta sem ARR e (b) hexagonal típica na pasta com 1% de ARR.



(a) P80_1 7d (b) P80_0 28d
 Figura 111 – Regiões de hidróxido de cálcio: (a) organizado em estruturas curvas na pasta P80 com 1% de ARR, aos 7 dias e (b) em placas mais robustas na pasta P80 sem ARR, aos 28 dias.

Embora na difração de raios x não se tenha verificado picos específicos que denotassem a presença de *sulfoaluminatos de cálcio hidratados* (*etringita* – fases AFt) nas pastas estudadas, na microscopia foram detectados alguns pontos localizados do composto, sem, no entanto, se perceber diferenças entre pastas com e sem ARR. Porém, a presença da fase AFt é mais relevante na pasta P80; na pasta P60, foram observadas pouquíssimas agulhas de etringita.

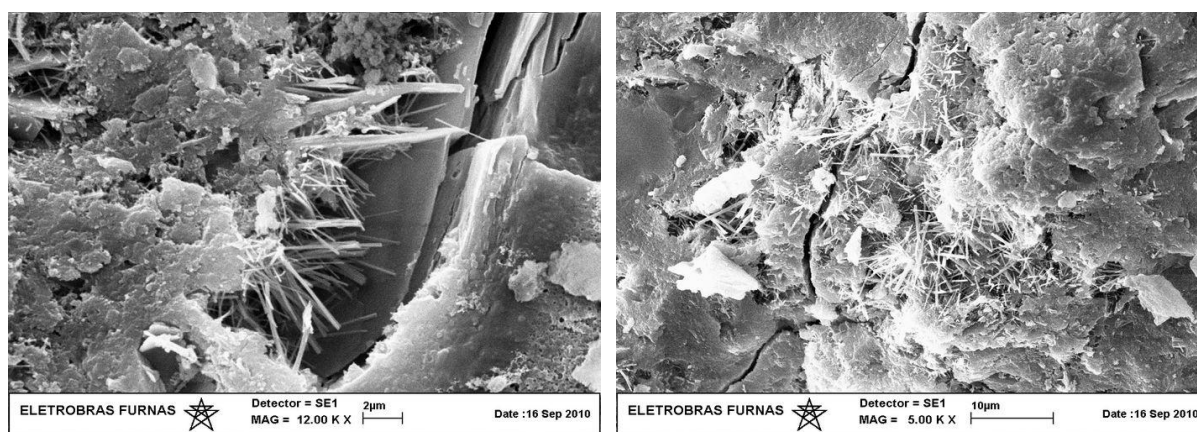
Em praticamente todas as condições e idades da pasta P80 foram constatados cristais aciculares (agulhas) de etringita (Figuras 112 e 113). Não se efetuou uma análise mais criteriosa sobre as dimensões das acículas, para se verificar discrepâncias entre pastas com e sem ARR, todavia, observou-se que não havia diferenças na morfologia dos cristais em função da presença do aditivo redutor de retração.



(a)

(b)

Figura 112 – Cristais de etringita (a) na pasta P80, aos 3 dias de idade, com 1% de ARR e (b) na pasta P80 referência, aos 7 dias.



(a)

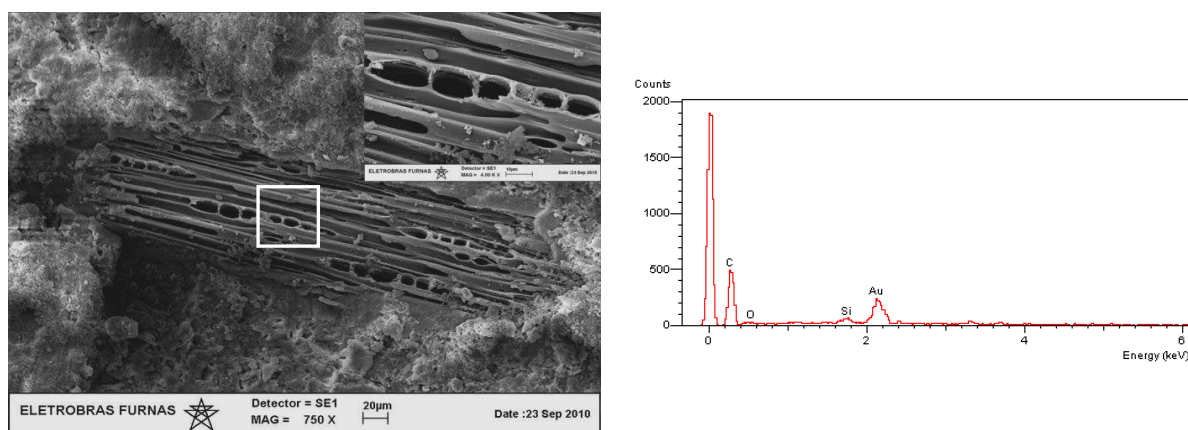
(b)

Figura 113 – Cristais de etringita (a) na pasta P80, aos 7 dias de idade, com 2% de ARR e (b) na pasta P80 referência, aos 28 dias.

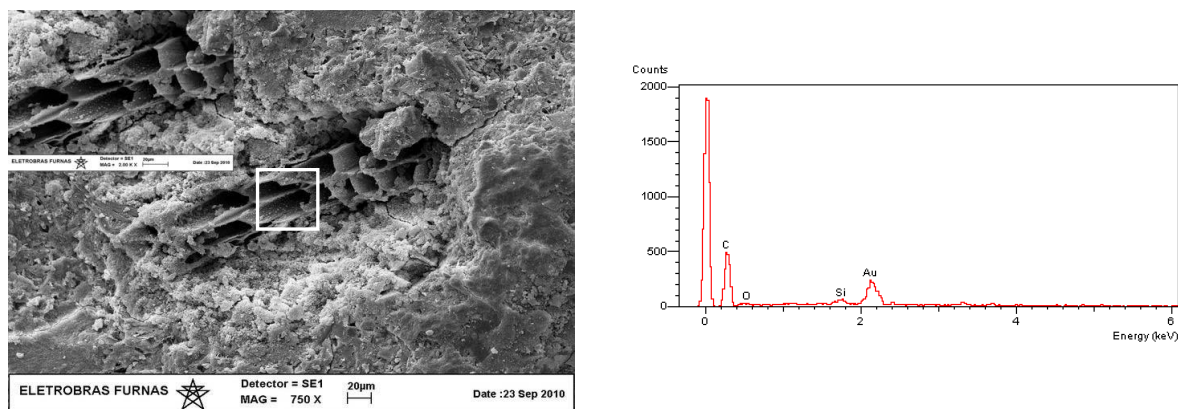
Nas pastas estudadas por Maltese et al (2004), com relação $a/c = 0,5$ e contendo 3% de ARR, base glicol, quando da análise por microscopia eletrônica de varredura ambiental, foi detectada uma alteração na morfologia quando comparada às de referência (0% de ARR): com 2h de hidratação, algumas agulhas prismáticas estavam presentes na superfície do material, enquanto na pasta de referência, observou-se apenas a morfologia típica do cimento Portland em processo de hidratação. Segundo os autores, de acordo com a difração de raios x,

os prismas bem formados poderiam ser cristais de etringita ou alguma formação oriunda de CH hidratado, com morfologia não típica do hidróxido de cálcio, possivelmente em razão de o ARR ter alterado a morfologia do composto. Diferentemente, no caso da pesquisa ora em análise, não se observou no âmbito da microscopia eletrônica de varredura, alterações dessa natureza, comparando-se pastas com e sem ARR.

A microscopia revelou, entretanto, uma formação diferenciada em algumas pastas com ARR. As Figuras 114 a 116 mostram tais formações e seus respectivos espectros da análise químicas, que demonstram a predominância de carbono na formação, cuja morfologia não se assemelha a nenhuma tradicionalmente conhecida dos hidratos e apresenta-se porosa. Como o aditivo redutor de retração é de base orgânica, pode-se supor que estas novas formações detectadas no MEV possam ser de alguma fase resultante de ação do ARR, já que se identifica na análise química picos importantes de carbono. Para esta situação, investigações mais aprofundadas são necessárias, para se verificar se tais formações são resultado da interação do ARR com hidratos da pasta, que não foi possível detectar nas outras técnicas empregadas.



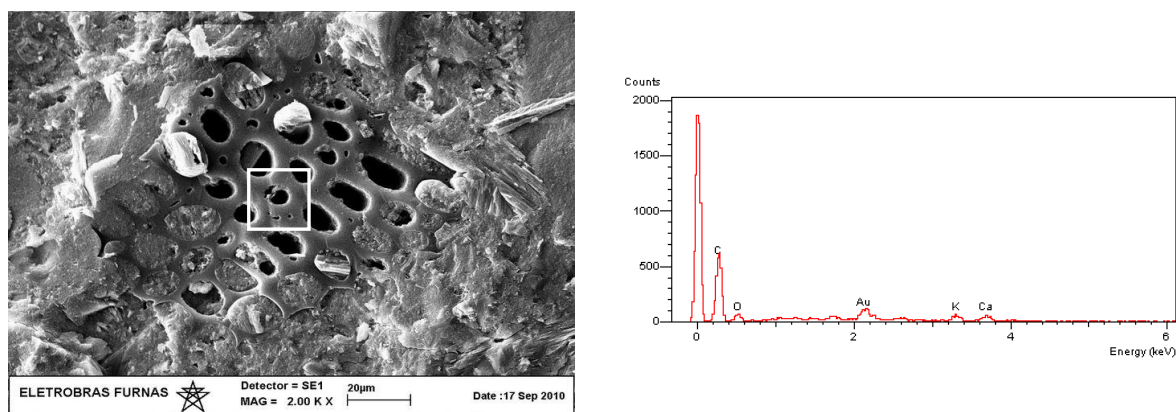
(a) (b)
 Figura 114 – (a) Formação diferenciada na pasta P60, com 1% de ARR, aos 3 dias de idade, em meio a grãos de sílica ativa, com ampliação no canto superior direito e (b) espectro da análise química, no centro da amostra, como indicado.



(a)

(b)

Figura 115 – (a) Formação diferenciada na pasta P60, com 2% de ARR, aos 3 dias de idade, incrustada em hidratos, com ampliação no canto superior esquerdo e (b) espectro da análise química no centro da amostra, como indicado.



(a) P80_1 28d

(b)

Figura 116 – (a) Formação diferenciada na pasta P80, com 1% de ARR, aos 28 dias de idade e (b) espectro da análise química.

5.2.5 Resumo sobre a hidratação e microestrutura

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio mostraram que, de modo geral, o aditivo redutor de retração - ARR afeta a estrutura das pastas de cimento, embora de forma pouco pronunciada. Em ambas as situações (pastas P60 e P80) o ARR age no sentido de aumentar levemente a porosidade total; além disso, na pasta de maior relação a/agl o ARR provoca um pequeno aumento da porosidade capilar, na faixa de capilares grandes com diâmetro entre 50 nm – 1 μm, enquanto na pasta de menor relação a/agl há um leve acréscimo da porosidade de gel e dos mesoporos (capilares médios).

Os resultados da análise térmica, difratometria de raios-X e microscopia eletrônica de varredura permitem supor que o ARR pode promover um retardo no processo de hidratação do cimento, principalmente com a observação de que a formação da Portlandita parece ser dificultada na presença do aditivo. E em pastas com adição de sílica ativa, como é o caso destas objeto da pesquisa, pode haver também reflexo sobre a formação do C-S-H, uma vez que a baixa disponibilidade de CH compromete a reação pozolânica.

Outro aspecto importante é quanto à maior quantidade de carbonatos nas pastas com ARR. Na análise termogramétrica, se evidencia tal fato, podendo se suspeitar de uma interação do CH com a fase orgânica do ARR, não só durante o aquecimento, como levantado por Taylor e Turner (1987), mas que tenha ocorrido durante o processo de hidratação. Esta consideração pode também justificar os baixos teores de CH tanto na termogravimetria quanto na difração de raios-X.

Face às considerações anteriores envolvendo o ARR e o CH, o fato é que se evidenciou a influência do aditivo na quantidade de Portlandita nas pastas, no sentido de diminuí-la. Este comportamento pode ser explicado tanto pela inibição à formação do CH ou pelo seu consumo, em razão da interação do aditivo com o hidróxido de cálcio. Esta última explicação, é uma hipótese levantada neste trabalho, que merece ser estudada de forma mais aprofundada.

Nenhum novo produto foi verificado nas pastas de cimento com ARR, que desse indícios de formação de algum produto de interação do aditivo com o cimento, sob o ponto de vista da análise térmica e da difratometria de raios-X. Entretanto, na análise microscópica, foi encontrado em algumas pastas com ARR um produto com morfologia porosa não típica dos produtos de hidratação formados, com preponderância de carbono na composição, o que sugere um efeito do ARR, que tem base orgânica.

Com a microscopia, observou-se que o ARR não afeta a morfologia dos cristais de hidróxido de cálcio. Foram observados depósitos massivos da fase, constituídos por empilhamentos de finas placas paralelas, ou estruturas curvas, e ainda detectados formações em placas hexagonais, independentemente da presença do aditivo.

De uma forma geral, pode-se dizer que o aditivo redutor de retração até o teor de 2% (máximo usado nesta pesquisa) afeta a microestrutura da pasta de cimento, (i) aumentando levemente a

porosidade total, e ainda (ii) provocando um retardo na formação dos produtos de hidratação, por diminuir a habilidade da água em dissolver sais, que aceleram a hidratação, ou (iii) transformando o produto de hidratação (Ca(OH)_2). Apesar de tudo isto, verificou-se que estas alterações microscópicas não tem efeito tão expressivo do ponto de vista macroscópico, levando-se em conta as propriedades mecânicas, elásticas e de durabilidade, que são pouco alteradas. Adicionalmente, a eficácia do ARR em reduzir a retração autógena compensa os diminutos efeitos negativos em propriedades como a resistência à compressão, que decresceu, aos 28 dias, em média 5%.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fenômeno da retração, como discutido ao longo deste trabalho, pode ser caracterizado pelas deformações ao longo do tempo em pastas de cimento, argamassas e no concreto, sem que haja qualquer tipo de carregamento. A deformação total por retração é dada pela soma das parcelas correspondentes à retração térmica, à retração por secagem e à retração autógena. Em concretos de baixa relação a/c, a retração autógena é a mais preocupante, pois se desenvolve rapidamente, assim como as tensões de tração, podendo levar tais concretos à fissuração nas primeiras idades e limitar o uso deste material. Face a isto, esta pesquisa se deteve a investigar o aditivo redutor de retração - ARR, que se apresenta como uma estratégia mitigadora do fenômeno da retração. Fundamentalmente, verificou-se a sua eficácia em reduzir a retração, tanto autógena, quanto por secagem, a sua influência nas propriedades mecânica e elásticas, mas principalmente em algumas ligadas à durabilidade, e diante da escassez de pesquisas sobre o assunto, contribuiu-se com a investigação sobre o efeito do ARR na microestrutura e na hidratação das pastas de cimento Portland. No item 6.1, a seguir, são apresentadas as principais conclusões baseadas nos resultados obtidos neste trabalho e alinhadas aos objetivos específicos. Finalmente no item 6.2, são apresentadas as recomendações para estudos futuros.

6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

6.1.1 Quanto à retração autógena e retração por secagem

- A influência da relação a/agl fica mais uma vez demonstrada no ensaio de retração autógena. Quanto menor a relação a/agl, a saída de água devido à autodessecação, provoca o esvaziamento de poros cada vez mais delgados, levando a uma diminuição na umidade relativa interna e a uma depressão capilar elevada, aumentando a magnitude da retração autógena.
- O aditivo redutor de retração - ARR mostrou-se eficaz na diminuição da retração autógena, sendo o teor de 2% mais promissor na redução do fenômeno. Neste teor, a

retração autógena reduziu, respectivamente, cerca de 70% e 40% aos 3 dias e 28 dias em relação ao concreto sem aditivo e em torno 30% aos 180 dias para os concretos C80 e C60.

- Além da relação a/agl e do teor de ARR, a idade é outro fator que mostrou-se significativamente relevante na retração autógena. Isoladamente, observou-se que a retração autógena tem um crescimento mais acentuado nas idades iniciais, tendendo a se tornar constante em idades mais avançadas. Combinando-se idade e ARR, fica evidenciado o efeito máximo do aditivo nas idades mais jovens, diminuindo com o tempo, o que sugere uma maior eficácia do ARR quando a umidade relativa interna é mais alta ou quando ainda não houve um refinamento da estrutura de poros do material.
- Para o concreto C40, cujo $f_{ck28} \approx 40$ MPa, as deformações devidas à retração autógena resultaram em valores relativamente baixos, não apresentando desta forma riscos substanciais de fissuração. E embora o ARR tenha reduzido autógena, sendo aos 28 dias, de 30% a redução em relação ao referência, o uso do ARR pode não representar uma solução com relação custo/benefício vantajosa.
- A predição da retração autógena a partir do modelo abaixo apresentado para classes de resistência superiores a 60 MPa conduz a resultados bastante aderentes aos resultados obtidos experimentalmente:

$$\varepsilon_s = (0,197 \cdot ARR - 1) \cdot [64,94 \cdot \ln(t) + 1,01 \cdot \ln(f_{cj})]$$

- Constatou-se que a queda de umidade relativa interna (embora não muito considerável) e a retração autógena (substancial) estão intimamente relacionadas: com o consumo de água no avanço das reações de hidratação, a umidade relativa no interior do concreto cai, ocorrendo a autodessecação, ao mesmo tempo em que a magnitude da retração autógena cresce.
- Assim como na retração autógena, na retração por secagem os fatores idade e relação a/agl são também significativos. Quanto à idade, da mesma forma que na retração autógena, evidenciou-se que o crescimento dessa propriedade é maior nas idades iniciais, tendendo a se tornar relativamente constante com o avanço da hidratação. Todavia, a relação a/agl tem um efeito contrário ao da retração autógena: a magnitude da retração por secagem apresenta-se maior na medida do aumento das relações a/agl ,

pois na superfície do concreto de alta resistência (menor relação a/agl), a secagem desenvolve-se mais lentamente, porque o refinamento da estrutura de poros é maior, e também em razão de a água já ter sido drenada pelo processo de autodessecação.

- Como o ARR foi concebido originalmente para reduzir a retração por secagem, ratificou-se nesta pesquisa que o uso deste aditivo, em especial no teor de 2%, pode promover a redução da retração por secagem, por diminuir a tensão superficial da água do poro no concreto. Contudo, é de se ressaltar que o ARR foi mais efetivo na redução da retração autógena que na retração por secagem, notadamente nas primeiras idades.

6.1.2 Quanto ao concreto fresco

- O emprego do aditivo redutor de retração - ARR, em geral, resultou em uma leve diminuição do teor de ar incorporado, assim como contribuiu para um pequeno aumento na trabalhabilidade, medida pelo abatimento por meio do tronco de cone, para os concretos C80 ($a/agl = 0,3$) e C60 ($a/agl = 0,4$). Se a água contida no ARR, totalmente combinada, for descontada da água da mistura essa diferença pode ser minimizada ou eliminada.
- O patamar de percolação (tempo t_0 ou tempo-zero) - tempo a partir da mistura até a formação do primeiro caminho contínuo de produtos de hidratação que atravesse de uma face à outra da forma e apresente um esqueleto rígido o suficiente para suportar as deformações impostas, permitindo transferência de tensões de tração através do concreto – determinado por onda ultrassônica é retardado na presença do ARR, variando entre 1h20min até 2h, comparado à pasta de referência. Isto significa, que o ARR retarda o tempo de pega, comprovado também pelo ensaio de Vicat. Uma explicação razoável para tal fenômeno é que a adição de ARR diminui a dissolução de álcalis no fluido do poro, resultando em baixa alcalinidade, via de consequência, reduzindo a velocidade de hidratação do cimento.
- A comparação entre os resultados do tempo-zero, determinados pela velocidade de pulso ultrassônico (em concretos) e agulha de Vicat (com a pasta correspondente e não a pasta de consistência normal), mostrou que o primeiro ocorre mais rapidamente. No

método da resistência à penetração da agulha, os resultados de tempo de início de pega, usando a pasta correspondente dos concretos, ficaram muito retardados, para todas as misturas estudadas. Essa diferença deve ser considerada na escolha do método para determinação de t_0 , no caso de se determinar a retração autógena e a calibração de modelos numéricos.

6.1.3 Quanto às propriedades mecânicas, elástica e viscoelástica

- A resistência à compressão dos concretos, de maneira geral, sofre uma redução na presença do ARR, com destaque para o teor de 2%. Importa destacar que esta redução é mais pronunciada nas idades iniciais, o que se atribui aos efeitos do ARR na hidratação inicial do cimento. Entretanto, em termos globais, a perda de resistência à compressão com o uso de 2% de ARR ficou cerca de 5% em relação ao concreto de referência. Do ponto de vista prático e ainda considerando a idade de controle – 28 dias - para os concretos C80 e C60 com 2% de ARR, a perda de resistência à compressão pode ser considerada pouco representativa face ao ganho com a diminuição da retração autógena. Ressalvas devem ser feitas ao concreto C40, analisado de forma isolada, uma vez que o comprometimento da resistência à compressão é expressivo; neste caso o uso de ARR não é recomendado, se o objetivo for a redução da retração autógena, haja vista a sua pouca eficácia em reduzir este fenômeno para esta classe de resistência.
- A evolução do crescimento de resistência à compressão relativo à idade de 28 dias não foi afetada pela presença de ARR.
- Tanto na resistência à tração por compressão diametral como na resistência à tração na flexão não se evidenciou uma tendência clara de comportamento frente ao emprego do ARR. Estatisticamente, não houve diferença significativa entre os resultados de resistência à tração na flexão ou por compressão diametral dos concretos sem ARR e aqueles com 1 ou 2% de ARR. Isto revela que a presença de ARR nas misturas não influenciou a resistência à tração dos concretos, seja por compressão diametral ou na flexão.
- Quanto ao módulo de elasticidade, as diferenças numéricas encontradas entre os valores para os concretos com ARR e o concreto referência, que apresentam-se próximos, não

são relevantes. Estatisticamente, o teor 2% de ARR exerce influência sobre o módulo de elasticidade, no sentido de reduzi-lo, mas em pequena intensidade (3%). Assim e do ponto de vista da engenharia, pode-se afirmar que a presença do ARR não alterou o módulo de elasticidade dos concretos, nos teores empregados nesta pesquisa.

- O estudo de *fluência* com os concretos C80 e C60, embora reduzido (na idade de 7 dias), revelou uma diferença de comportamento entre ambas as classes de concreto quando empregado o ARR. Para o primeiro, o aditivo não altera a fluência, independentemente do teor; para o segundo, as taxas de deformação por fluência se elevam quando empregado o ARR, contrariando qualquer referência na literatura, o que não invalida o resultado, haja vista a escassez de estudos sobre o tema.
- Os resultados de fluência não são conclusivos e pela insuficiência de resultados na literatura, pode-se afirmar que mais estudos são necessários, de forma intensiva e mais representativa sobre o efeito do ARR nesta propriedade. Principalmente pela importância da fluência na estimativa de risco de fissuração devido a tensões térmicas e de retração nas primeiras idades.

6.1.4 Quanto à durabilidade

- A *penetrabilidade de cloretos* não foi expressivamente afetada com o emprego do ARR. Este aditivo também não provocou maiores profundidades de *carbonatação*, em relação aos concretos de referência, assim como na *permeabilidade à água* não ficou evidenciado o comprometimento desta propriedade pela presença do aditivo redutor. A *absorção por capilaridade* dos concretos de maior resistência, nos quais o uso do ARR é recomendável para reduzir a retração autógena, revelou-se menor com o uso de 2% do aditivo. Já na *absorção total*, ocorreu o contrário, o emprego do ARR resultou em um acréscimo desta propriedade. Contudo, e de forma geral, associando os resultados das propriedades avaliadas, pode afirmar que a durabilidade dos concretos de alta resistência não é afetada pela presença do aditivo redutor de retração, frente à ação de agentes agressivos, como a água, gás carbônico e cloretos.

6.1.5 Quanto à hidratação e microestrutura das pastas de cimento Portland

- Os resultados de *porosimetria por intrusão de mercúrio* revelaram que o uso ARR, em qualquer dos dois teores empregados, altera o volume total de poros, embora de forma não relevante. O aditivo é também responsável por provocar alguma alteração, também não muito expressiva, na faixa de diâmetro de poros: na pasta P60 (maior relação a/agl), o ARR promove um pequeno aumento nos poros de gel e macroporos, enquanto na pasta P80 (menor relação a/agl) o aumento se dá nos poros de gel e mesoporos, ao mesmo tempo que ocorre uma leve redução nos macroporos.
- Sob o ponto de vista microestrutural, considerando a *termogravimetria* e a *difratometria de raios-X*, não se evidenciou que o ARR tenha interagido quimicamente com os compostos do cimento hidratado, de maneira que se obtivesse algum composto diferente do observado na mistura de referência – sem o ARR.
- Contudo, as *análises termogravimétrica*, por *difratometria de raios-X* e a *microscopia eletrônica de varredura* sugerem que o ARR afeta a velocidade de hidratação das pastas de cimento. Esta hipótese é particularmente fundamentada na redução do hidróxido de cálcio quando do uso, principalmente de 2% de ARR, nos ensaios de termogravimetria e difração de raios-X.

6.1.6 Consideração final sobre o uso do ARR

- Mesmo se considerando que do ponto de vista microestrutural, o ARR no teor máximo de 2% provoque algumas alterações, como um pequeno aumento na porosidade das pastas (o que pode ser positivo se o material é empregado em ciclos de gelo e degelo) e por interferir no processo de hidratação da pasta de cimento, retardando-a, principalmente nas idades iniciais, e que se leve em conta seu preço relativamente alto por metro cúbico, ainda assim este aditivo vale a relação custo/benefício e mostra-se promissor já que i) é eficaz na redução da retração autógena, ii) as alterações microestruturais não trazem reflexos negativos expressivos ao concreto, haja vista os resultados obtidos das propriedades mecânicas, elástica e de durabilidade. Ressalte-se também que a *análise de risco de fissuração* realizada neste estudo demonstra a eficácia

do emprego de 2% de teor de ARR em reduzir a tensão gerada pelas deformações de origem autógena, diminuindo sobremaneira o risco de fissuração, o que dá a perspectiva de um material (concretos de alta resistência) mais durável.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Conforme ficou demonstrado, o uso do aditivo redutor de retração – ARR pode reduzir a magnitude da retração autógena e ainda reduzir a velocidade com que ocorrem as deformações por retração autógena, permitindo assim, o aumento da resistência à fissuração. Mas também evidenciou-se a necessidade de continuidade de pesquisas científicas sobre a incorporação do ARR em concretos e argamassas para que se possa otimizar seu desempenho, assim como investigar a capacidade de outros materiais em mitigar a retração autógena nos concretos de alta resistência. Para tanto, recomenda-se a realização dos seguintes estudos, dentre outros:

- estudos mais robustos sobre o efeito do ARR na fluência em concretos, tornando os dados mais representativos, abrangentes e que forneça resultados mais conclusivos para que possam ser empregados de forma mais confiável tanto em análise de risco de fissuração como em modelos de predição;
- estudo da estrutura de poros de pastas de cimento com a incorporação do ARR por método menos agressivo que a porosimetria por intrusão de mercúrio;
- análise termogravimétrica de pastas de cimento com ARR, com amostras no mínimo em duplicata e a realização também da termogravimetria do aditivo, para se avaliar com mais confiabilidade a possível interação do ARR com composto do cimento hidratado;
- análise da água do poro de pastas com ARR, buscando elucidar a química das interações, principalmente nas idades iniciais;
- estudo mais aprofundado e representativo por meio da microscopia eletrônica de varredura, para se tentar quantificar compostos hidratados e analisar eventual alteração da morfologia dos compostos em pastas com ARR;

- estudo da microestrutura de pastas de cimento com ARR em microscópio eletrônico de varredura ambiental, permitindo a análise sob diferentes condições de umidade;
- estudo para investigar a capacidade de materiais, com enfoque para o material cerâmico resíduo da construção civil, em proporcionar a “cura interna” e dessa forma reduzir a retração autógena;
- estudo para mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência com o emprego do SAP – polímero superabsorvente (material com capacidade de armazenar água para liberação à medida da evolução hidratação, minimizando a autodessecação), investigando sua influência nas propriedades reológicas, mecânicas, elásticas, viscoelásticas e de durabilidade;
- estudo para investigação do efeito microestrutural do SAP em pastas de cimento, com a realização de ensaios de porosimetria, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKER, P.. Comportement mécanique du béton: apports de l'approche physicochimique, **Rapport de Recherche LCPC**, N° 152, 1988.

AİTCIN, P. C. Demystifying autogenous shrinkage. **Concrete International**, vol. 12, no. 11, pp. 54- 56, 1999a.

AİTCIN, P. C. Autogenous shrinkage measurement. In: **Autogenous Shrinkage of Concrete – Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute**, edited by Ei-Chi Tazawa, , E & FN Spon, London – pp. 257-268., 1999b.

AITCIN, P. C. Does concrete shrink or does it swell? **Concrete International**, vol. 12, no. 12, pp. 77-80, 1999c.

AITCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. Tradução de Geraldo C. Isaia, São Paulo : PINI, 2000.

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM C 490**, Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete. Philadelphia, 4p, 2002

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO – AMN **NBR NM 23**, Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 5p, 2000.

_____. **NBR NM 26**, Agregados – Amostragem – procedimento. Rio de Janeiro, 10p., 2001.

_____. **NBR NM 27**, Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 7p., 2001.

_____. **NBR NM 30**, Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 3p., 2000.

_____. **NBR NM 46**, Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 6p., 2003.

_____. **NBR NM 47**, Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 43p., 2002.

_____. **NBR NM 49**, Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 3p., 2001.

_____. **NBR NM 52**, Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa

específica aparente. Rio de Janeiro, 6p., 2003.

_____. **NBR NM 53**, Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 8p., 2002.

_____. **NBR NM 58**, 1996, Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 13p.

_____. **NBR NM 65**, Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega – método de ensaio. Rio de Janeiro, 4p., 2002.

_____. **NBR NM 67**, Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 8p., 1998.

_____. **NBR NM 76**, Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine) – método de ensaio. Rio de Janeiro, 13p., 1996.

_____. **NBR NM 248**, Agregados - Determinação da composição granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 6p., 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 5733**, Cimento Portland de alta resistência inicial - *Especificação*. Rio de Janeiro, 5p., 1991.

_____. **NBR 5738**, Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 6p., 2003.

_____. **NBR 5739**, Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 4p., 1994.

_____. **NBR 5742**, Análise química de cimento Portland - Processos de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 7p., 2004.

_____. **NBR 5743**, Cimento Portland - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 3p., 2004.

_____. **NBR 5744**, Cimento Portland - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 3p., 2004.

_____. **NBR 5745**, Cimento Portland - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2p., 2004.

_____. **NBR 5747**, Cimento Portland - Determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 5p., 2004.

_____. **NBR 5748**, Análise química de cimento Portland - Determinação de óxido de cálcio livre. Rio de Janeiro, 3p., 1993.

_____. **NBR 7211**, Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 11p., 2005.

_____. **NBR 7215**, Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão – método

de ensaio. Rio de Janeiro, 8p., 1995.

_____. **NBR 7218**, Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2p., 1987.

_____. **NBR 7222**, Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 3p., 1994.

_____. **NBR 7251**, Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 3p., 1982.

_____. **NBR 7682**, Calda de cimento para injeção – determinação do índice de fluidez - método de ensaio. Rio de Janeiro, 4p., 1983.

_____. **NBR 8802**, Concreto endurecido- determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica método de ensaio. Rio de Janeiro, 3p., 1991.

_____. **NBR 9775**, Agregados - Determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 3p., 1987.

_____. **NBR 11579**, Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (nº 200) – método de ensaio. Rio de Janeiro, 8p., 1994.

_____. **NBR 11582**, Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2p., 1991.

_____. **NBR 11583**, Cimento Portland e matérias-primas - Determinação de anidrido carbônico (CO_2) por gasometria. Rio de Janeiro, 6p., 1991.

BALTAR, V. K. C. B. L. M. Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

BAROGHEL-BOUNY, V. Characterization des pâtes de ciment et des bétons : methodes, analyse, interpretations. **Thèse de doctorat de L.C.P.C.**, Paris, France, 1994

BAROGHEL-BOUNNY, V., MOUNANGA, P., LOUKILI, A. KHELIDJ, a. From chemical and microestrutural evolution of cemente pastes to the development of autogenous deformations. In : **Autogenous deformation of concrete**, Editors : Ole Mejlhede Jensen, Dale P. Bez e Pietro Lura, **ACI International SP-220**, pp. 1-21, 2004.

BAUER. Elton. Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas. **Tese de doutorado**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 235p., 1995.

BENTUR, A., Terminology and definitions. In: A. Bentur (ed), **Proceedings of the Early age cracking in cementitious systems**, RILEM, Cachan, France, pp.13-15., 2002.

BENTZ D. P., Influence of shrinkage-reducing admixtures on early-age properties of cement

pastes. **Journal of Advanced Concrete Technology**, vol. 4, no. 3, pp. 423-429, 2006.

BENTZ D. P., GEIKER, M. R., HANSEN K. K. Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, n° 31, pp. 1075-1085, 2001.

BENTZ D. P., JENSEN O. M. Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. **Cement and Concrete Research**, n° 26, pp. 677-685, 2004.

BENTZ, D. P.; STUTZMAN, P. E., “Evolution of porosity and calcium hydroxide in laboratory concretes containing silica fume”. **Cement and Concrete Research**, v.24 n.6, pp. 1044-1050, 1994.

BOIVIN, S. G., Retrait au jeune âge du béton. Développement d’une méthode expérimentale et contribution à l’analyse physique du retrait endogène. **Thèse de doctoral**, LCPC, Paris, nov., 2001.

BOIVIN, S.; ACKER P.; RIGAUD, S. et al., “Experimental assessment of chemical shrinkage of hydrating cement pastes”. In: **Autogenous Shrinkage of Concrete - Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute**, Edited by Ei-ichi Tazawa, E & FN Spon, London, 1999.

BROOKS, J.J., JOHARI, M. A. M., MAZLOOM, M. Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. **Cement & Concrete Composites**, 22, 293-301, 2000.

BROOKS, J. J.; CABRERA, J. G.; MEGAT JOHARI, M. A. Factors affecting the autogenous shrinkage of silica fume high-strength concrete. In: **Autogenous Shrinkage of Concrete - Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute**, Edited by Ei-ichi Tazawa, 1999, E & FN Spon, London -- pp. 195-202.

COLLEPARDI, M., BORSOI, A., COLLEPARDI, S., OLAGOT, J. J. O., TROLI, R. Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions. **Cement & Concrete Composites**, 27, 704-708, 2005.

BENTUR, A. Comprehensive approach to prediction and control of early-age cracking in cementitious materials. In: F.J. Ulm, Z.P. Bazant e F.H. Wittmann (eds), **Concreep-6@MIT, Proceedings of the Sixth International Conference on Creep, Shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials**, Cambridge (MA), USA, August, pp. 679-684, 2001.

BREUGEL, K. VAN. Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials. Delft, The Netherlands. 1991.

CORDEIRO, GUILHERME CHAGAS. Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-de-Açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Mineraiis em Concreto. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006,

D’AMBROSIA, M. D., ALTOUBAT, S. A., PARK, C. e LANGE, D.A. Early Age Tensile Creep and Shrinkage of Concrete with Shrinkage Reducing Admixtures. pp. 685-90. In: **Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials**, ed. F. Ulm, Z. Bazant, F.H. Wittman, (Proc. of CONCREEP ’01, Boston, Aug

13-15, 2001), 2001.

DWECK, J.; BUCHLER, P. M.; COELHO A. C. V. e CARTLEDGE, F. K. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. **Thermochimica Acta**, n. 346, p. 105 – 113, 2000.

FAIRBAIRN, E. M. R, TOLEDO FILHO, R. D, SILVOSO. Modelagem do concreto a poucas idades com aplicações a barragens: novos paradigmas e suas soluções. **Relatório Técnico**. 222p.. 2003.

FELDMAN, R. F & SEREDA, P. J. A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. **Materials and Structures**, nº 06, pp. 509 -520, 1968.

FOLLIARD K. J., BERKE N. S. Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixtures. **Cement and Concrete Research**, nº 27, pp. 1357-1364, 1997.

FONSECA SILVA, E., Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração. **Tese de doutorado**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, dez, 2007.

FONSECA SILVA, E.; LOPES, A. N. M.; TOLEDO FILHO, R. D. & FAIRBAIRN. Uso de onda ultrassônica para determinar o tempo-zero em concretos de alto desempenho (CAD) contendo aditivo redutor de retração (ARR). In: **XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural**, San Juan, Argentina, Outubro, 2010.

GETTU , R.; RONCERO, J., MARTÍN, M. A., 2001, “Evaluation of the performance of concretes incorporating a shrinkage reducing chemical admixture”. In: F.J. Ulm, Z.P. Bazant e F.H. Wittmann (eds), **Concreep-6@MIT, Proceedings of the Sixth International Conference on Creep, Shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials**, Cambridge (MA), USA, August, pp. 679-684.

GETTU, R.& RONCERO J. Behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures. In: **Proceedings of the Advances in Concrete and Structures**, edited by Yuan et al. 2003.

GENES, P. G.; BROCHARD-WYART, F.; QUÉRE, D., Capillarité et pesanteur In: Cabane, B., Hénon, S. (eds), *Gouttes, bulles, perles et ondes*. 1 ed., chapitre 1, Paris, Belin, pp. 38-68, 2002.

GOBBO, Luciano de Andrade. Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld. **Dissertação de Mestrado**. Universidade de São Paulo. 2003

HANEHARA S., HIRAO, H & UCHIKAWA, H. Relationships between autogenous shrinkage, and the microstructure and humidity changes at inner part of hardened cement paste at early age. In: **Autogenous Shrinkage of Concrete – Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute**, edited by Ei-Chi Tazawa, , E & FN Spon, London, 1999.

HUA, C. ACKER, P. & EHRLACHER A. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. I. Modelling at macroscopic scale, **Cement and Concrete Research**, vol. 23, n° 7 pp. 1457-1468, 1995.

HUA, C. EHRLACHER A & ACKER, P. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. II. Modelling at scale of hydrating grains, **Cement and Concrete Research**, vol. 27, n° 2 pp. 245-258, 1997.

JENSEN, O. M. : HANSEN, P. F. “Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume modified cement pastes”, **ACI Materials Journal**, v. 93, n. 6, pp. 539-543, 1996.

JENSEN, O. M. & HANSEN, P. F. Autogenous deformation and RH-change in perspective. **Cement and Concrete Research**, n° 31, pp. 1859-1865, 2001a.

JENSEN, O. M. & HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background. **Cement and Concrete Research**, n° 31, pp. 647-654, 2001b.

JENSEN, O. M. Use of superabsorbent polymers in construction materials. *In: 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites*, 13-15 October 2008, Nanjing, China, pp. 757-764, 2008.

JENSEN, O. M. : HANSEN, P. F. A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement pastes. **Materials and Structures**, v. 28., 1995.

JENSEN, O. M. Thermodynamic limitation of self-desiccation. **Cement and Concrete Research**, vol. 25, n° 1 pp. 157-164, 1995.

JENSEN, O. M., HANSEN, P. F. Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume-modified cement paste. **ACI Materials Journal**. No. 93, pp. 539-543, 1996.

JENSEN, O. M.; LURA, P. Techniques and materials for internal water curing of concrete. **Materials and Structures**, 39, pp. 817-825, 2006.

JUSTNES, H., SELLEVOLD, E.J., LUNDEVALL, G.. High strength concrete binders: Part A. In: Reactivity and composition of cement pastes with and without condensed silica fume, Fly-ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, American Concrete Institute, SP 132, pp. 873-889 (Detroit)., 1992.

KAYALI, O., HAQUE, M. N., ZHU, B. Drying shrinkage of fiber-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 29, pp.1835-1840, 1999.

KOHNO, K., OKAMOTO, T., ISIKAWA, SIBATA, T., MORI, H. Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, pp.611-614, 1999.

KOJIMA, T.; TAKAGI, N.; HORIKAWA, S., 2001, Study on Shrinkage Characteristics of High-Strength Silica Fume Concrete”. In: V. M. Malhotra (ed) **Proceedings of Seventh CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural**

Pozzolans in Concrete, pp. 719-735, Chennai, India.

KOVLER, K.; ZHUTOVSKY, S. Overview and future trends of shrinkage research. **Materials and Structures**, v. 39, pp. 827-847, 2006.

LANGE, D. A. Overview of driving forces. In: A. Bentur (ed) **Proceedings of RILEM, Report 25, Early Age Cracking in Cementitious Systems**, pp. 19-20, France, 2002.

LIM, S. N & WEE, T. H. Autogenous shrinkage of ground-granulated blast-furnace slag concrete. **ACI Materials Journal**, v. 97, n° 5, pp. 587-593, 2000.

LOPES, A. N. M., TRABOULSI, M., A., ANDRADE, M. A. S., BITTENCOURT, R. M., PACELLI, W. Estudos complementares de concreto convencional e compactado com rolo. **Relatório Técnico**, maio/2000.

LOUKILI, A., KHELIDJ, A. RICHARD, P. Hydration kinetic, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete. **Cement and Concrete Research**, n° 29, pp. 577-584, 1999.

LURA, P.; van BREUGEL, K.; MARUYAMA, I. Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research** 31, 2001 – pp. 1867-1872.

LURA, P., Autogenous deformation and internal curing of concrete. **Doctoral thesis**, Delft, Netherlands, april., 2003.

LURA, P., J., JENSEN, O. M., BREUGEL, K. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: an evaluation of basic mechanisms. **Cement and Concrete Research**. N° 33, pp. 223-232, 2003.

MAK, S. L.; RITCHIE, D.; TAYLOR, A.; DIGGINS, R. Temperature effects on early age autogenous shrinkage in high performance concretes. In: **Autogenous Shrinkage of Concrete - Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute**, edited by Ei-ichi Tazawa, 1999, E & FN Spon, London – pp. 155-166.

MALTESE, C. PISTOLESI, A. LOLLI, A. BRAVO, T. CERULLI, D. SALVIONI. Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortar. **Cement and Concrete Research**, no 35, pp. 2244-2251, 2005.

MATSUSHITA, H.; TSURUTA, H.; NAKAE, K. The Influence of Physical Properties of Aggregate on Shrinkage in High Strength Slag Cement Concrete. In: **Proceedings of Sixth CANMET/ACI International Conference**, edited by V. M. MALHOTRA, Bangkok, Thailand, 1998 – pp. 685-699.

MECHTCHERINE, V.; DUDZIAK, L.; HEMPLE, S. Mitigating early age shrinkage of Ultra-High Performance Concrete by using Super Absorbent Polymers (SAP). In: **Proceedings of Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures – CONCREEP-8**, T. Tanabe et al. (eds.), Taylor & Francis Group, London, pp. 847-853, 2009.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**, 3 ed. São Paulo: IBRACON, 674 p., 2008.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**, 1 ed. São Paulo: Editora Pini, 616 p., 1994.

MELO NETO, A. A. Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada. **Tese de doutorado**. Universidade de São Paulo, 2008.

MENDES, M. V. A. S. Avaliação do mecanismo de transporte de fluidos de concretos autoadensáveis. **Trabalho de conclusão de curso**. Universidade Federal de Goiás, 2007.

NAIK, T., CHUN, Y. & KRAUS, R. N. Reducing shrinkage cracking of structural concrete through the use of admixtures. **Final Report**. University of Wisconsin-Milwaukee – USA. 2006.

NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento de avaliação de experimentos**. Porto Alegre, UFRGS, 1987. (CE-17/87)

NEVILLE, A. M., 1997, **Propriedades do concreto**, 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 828p.

PAILLERE, A. M.; BUIL, M.; SERRANO, J. J. Effect of Fiber Addition on the Autogenous Shrinkage of Silica Fume Concrete. **ACI Materials Journal**, V. 86, No. 2, March-April – pp. 139-144. , 1989.

PACELLI, W., et al. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. Editora PINI, 1997.

PAIVA, h.; ESTEVES, L. P.; CACHIM, P. B.; FERREIRA, V. M. Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents, **Construction and Building Materials** 23, pp.1141-1146, 2009.

PERSSON, B. Experimental studies on shrinkage of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 28, pp. 1023-1036,1998.

POWERS, T. C. The thermodynamics of volume change and creep. **Matériaux et Constructions**, pp.487-507, 1968.

QUANGPHU, N., LINHUA, J. , JIAPING, L., QUIAN, T., TIENQUAN, D. Influence of shrinkage-reducing admixture on drying shrinkage and mechanical properties of high-performance concrete. **Water Science an Engineering**, vol. 1, no 4, pp. 67-74, Dec 2008.

QUARCIONI, V. A. Influência da cal hidratada nas idades iniciais de hidratação do cimento Portland – estudo em pasta. **Tese de doutorado**. USP, São Paulo, 2008.

RAJABIPOUR, F., SANT, G., WEISS, JASON. Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution. **Cement Concrete Research**, no. 38, pp. 606-615, 2008.

RIBEIRO, A. B., GONÇALVES, A., CARRAJOLA A. Effect of shrinkage reducing

admixtures on the pore structure properties of mortars. **Materials and Structures**. 2006.

ROBEYST, N, GRUYAERT, E., GROSSE, C. U., BELIE, N. Monitoring the setting of concrete containing blast-furnace slag by measuring the ultrasonic p-wave velocity. **Cement and Concrete Research**, n° 38, pp. 1169-1176, 2008.

RONGBING B. & JIAN S. Synthesis and evaluation of shrinkage-reducing admixtures for cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, 35, pp. 445-448, 2005.

SANTOS, S. B. Análise da fluência do concreto aplicado a barragens nas primeiras idades: influência de aditivos plastificantes e adições minerais. **Qualificação de doutorado**. UFRGS. Porto Alegre, 2010.

SILVA, D. A. Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento Portland. **Tese de doutorado**. UFSC. Florianópolis, 2001.

SATO, R.; XU, M.; YANG, Y. Stresses of High-Strength Concrete Due to Autogenous Shrinkage Combined with Hydration Heat of Cement. In: **Proceedings of Third CANMET/ACI International Conference – High-Performance Concrete**, edited by V. M. MALHOTRA, Kuala Lumpur, Malaysia, 1997 – pp. 837-852.

SCHÄFFEL, P. Influence of shrinkage-reducing admixtures on autogenous shrinkage and other properties of hardened cement paste. In: **Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures** – Editado por Tanabe et al., pp. 863-869, 2009.

SUZUKI M.; MEDDAH, M. S. & SATO, R. Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 39, p. 373-381, 2009.

TAKADA, K; VAN BREUGEL, K; KAPTIJN, N. Experimental evaluation of autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete. In: **Autogenous Shrinkage of Concrete – Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute**, edited by Ei-Chi Tazawa, , E & FN Spon, London, pp.229-238, 1999.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**, 2. Ed. London: Thomas Telford, 1997.

TAYLOR, H. F. W. & TURNER, A. B. Reactions of tricalcium silicate paste with organic liquids. **Cement and Concrete Research**, 1987, vol. 17, p. 613-623.

TAZAWA E. & MIYAZAUA, S.. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. **Cement and Concrete Research**, vol. 25, no. 2, pp.281-287, 1995.

TAZAWA E., MIYAZAUA, S. & KASAI, T. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste. **Cement and Concrete Research**, vol. 25, no. 2, pp.288-292, 1995.

TAZAWA, E. Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete – “Committee Report” – In: **Autogenous Shrinkage of Concrete – Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute**, edited by Ei-Chi Tazawa, , E & FN

Spon, London 1999.

TAZAWA, E., MIYAZAWA, S., “Effect of constituents and curing condition on autogenous shrinkage of concrete”. In: **Autogenous Shrinkage of Concrete – Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute**, edited by Ei-Chi Tazawa, , E & FN Spon, London, pp. 269-280, 1999.

TRTNIK, G., TURK G. KAVCIC, BOSILJKOV, V. B. Possibilities of using the ultrasonic wave transmission method to estimate initial setting time of cement paste. **Cement and Concrete Research**, n° 38, pp. 1336-1342, 2008.

UCHIKAWA, Hiroshi. Effect of blending components on hydration and structure formation. In: 8° CONGRESSO INTERNACIONAL DE QUÍMICA DO CIMENTO, 1986, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro:[s.n], setembro, 1986. p.249-280.

VOIGT, T.; GROSSE, C.; SUN, Z.; SHAH, S. P.; REINHARDT, H. W., 2005. Comparison of ultrasonic wave transmission and reflection measurements with P- and S-waves on early age mortar and concrete, **Materials and Structures**, 38 (282), 2005, pp. 729–738.

WEBER S. & REINHARDT, H. W. A new generation of high performance concrete: concrete with autogenous curing. **Advanced Cement Bases Materials** 6, 1997. Pp. 59-68.

WEISS, W. J. Prediction of early-age shrinkage cracking in concrete. **Dissertation for the degree Doctor of Philosophy field of Civil Engineering**. Illinois, August, 1999, 277 p.

WEISS, J.; BERKE, N. Admixture for reduction of shrinkage and cracking. In: A. Bentur (ed), **proceedings of the Early age cracking in cementitious systems**, RILEM, pp.323-333, Cachan, France., 2002.

YANG, Q. Inner relative humidity and degree of saturation in high-performance concrete stored in water or salt solution for 2 years. **Cement and Concrete Research** 29, 1999 – pp. 45-53.

YOUNG, J. F., MINDESS, S., GRAY, R. J., BENTUR, A., 1998, **The science and technology of civil engineering materials**, 1 ed. New Jersey: Prentice Hall, 384 p, 1998.

APÊNDICE A – Resultados Individuais: Ensaio em Concreto

Tabela 40 – Resultados individuais de retração autóloga e retração por secagem do C80

RETRAÇÃO AUTÓGENA								
C80_0			C80_1			C80_2		
Idade (dias)	Deformação		Idade (dias)	Deformação		Idade (dias)	Deformação	
	CP1	CP2		CP1	CP2		CP1	CP2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	2	0	0	-12	0	-7	-6
1	-4	6	1	-1	-35	0	-3	-13
1	-10	5	1	-7	-40	1	0	-10
1	0	12	1	-5	-38	1	-1	-11
1	4	16	1	-5	-34	1	-1	-11
1	16	30	1	4	-30	1	4	-11
1	25	40	1	8	-26	2	21	11
1	30	45	1	8	-21	2	21	11
1	36	51	2	32	3	2	26	16
1	41	57	2	37	8	2	27	16
2	70	88	2	37	8	2	31	21
2	75	88	2	37	8	3	43	37
2	75	88	2	42	8	4	58	52
2	75	94	2	42	13	7	103	100
2	80	99	2	47	18	8	108	106
2	85	104	3	58	29	9	114	111
4	127	141	4	81	52	10	123	120
6	151	167	7	120	95	11	127	129
8	170	182	8	131	107	14	147	149
9	183	182	9	142	117	15	152	153
12	206	197	10	152	131	16	156	163
13	214	206	11	161	136	17	162	168
14	223	205	14	180	160	18	167	169
15	227	210	15	186	166	21	175	177
16	235	219	16	187	166	23	181	183
19	258	240	17	191	166	24	181	182
20	264	246	18	195	170	25	181	187
21	269	252	21	205	180	28	188	189
22	279	252	23	205	180	30	188	189
23	279	257	25	211	185	35	191	193
26	293	272	28	214	193	39	193	193
27	298	278	31	219	194	44	191	192
28	298	279	35	226	196	46	193	194
29	303	283	37	225	195	49	192	193
30	302	283	42	224	199	56	192	193
33	311	288	46	231	200	63	191	192
35	311	293	51	229	198	70	193	194
37	317	299	53	231	201	77	193	194
40	324	302	56	230	200	84	197	197
43	325	303	63	230	200	92	196	197
47	332	310	70	229	199	98	201	202
49	331	310	77	235	200	107	201	202
54	334	318	84	235	200	113	205	201
58	336	320	91	239	204	129	212	208
63	334	318	99	239	209	137	217	212
65	341	321	105	239	209	143	218	218
68	340	319	114	239	209	151	218	218
75	340	320	120	238	208	161	223	223
82	339	319	136	245	214	176	228	223
89	341	320	144	250	219	180	228	228
96	345	325	150	250	220			
103	344	324	158	255	220			
111	349	329	168	260	225			
117	349	329	180	260	230			
126	349	329	190	261	230			
132	348	328						
148	354	340						
156	359	345						
162	359	351						
170	359	351						
180	360	351						
195	359	341						
202	360	341						

RETRAÇÃO POR SECAGEM								
C80_0			C80_1			C80_2		
Idade (dias)	Deformação		Idade (dias)	Deformação		Idade (dias)	Deformação	
	CP1	CP2		CP1	CP2		CP1	CP2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	5	5	0	5	0	0	5	5
0	11	6	0	13	10	0	19	10
0	15	10	0	13	8	0	16	10
1	34	32	1	27	23	1	25	24
2	43	41	2	36	37	2	36	35
5	72	69	3	45	47	7	81	77
6	82	79	4	50	56	8	82	79
7	87	83	7	71	77	9	87	83
8	97	93	8	75	81	10	92	88
9	103	93	9	80	87	11	97	88
12	106	101	14	93	100	16	106	101
13	117	112	15	99	106	18	113	108
14	122	116	16	99	106	21	118	113
15	127	121	17	98	111	24	118	113
16	131	125	18	98	111	28	123	118
19	138	131	23	106	119	32	129	123
20	142	135	25	113	121	35	133	126
21	143	136	28	117	125	39	134	128
26	151	143	31	117	130	42	135	128
27	157	150	35	122	131	46	140	133
28	157	150	39	122	135	49	144	138
29	162	154	42	126	139	56	143	137
30	162	154	46	132	145	64	149	142
35	165	157	49	133	146	70	149	142
37	172	164	53	137	151	79	154	147
40	176	168	56	137	150	85	158	151
43	176	173	63	141	154	101	165	162
47	182	178	71	146	160	115	171	168
51	186	178	77	146	160	123	175	167
54	190	181	86	151	165	138	181	173
58	196	187	92	150	169			
61	197	188	101	150	169			
65	202	193	108	156	175			
68	201	192	116	161	175			
75	206	196	122	166	180			
83	206	196	130	170	185			
89	206	196	138	175	190			
98	211	201						
104	210	200						
113	210	200						
120	217	206						
128	221	211						
134	222	211						
138	221	211						

Tabela 41 – Resultados individuais de retração autóloga e retração por secagem do C60

RETRAÇÃO AUTÓGENA								
C60_0			C60_1			C60_2		
Idade (dias)	Deformação		Idade (dias)	Deformação		Idade (dias)	Deformação	
	CP1	CP2		CP1	CP2		CP1	CP2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	-6	0	-5	-5	0	-5	-5
0	-2	-6	0	-6	-6	0	-10	-10
0	-2	-7	0	-6	-6	0	-10	-10
1	11	11	1	-2	-3	1	-7	-2
1	14	5	1	-9	-4	1	-10	-5
1	14	9	1	-9	-4	1	-9	-9
1	14	9	1	-4	1	1	-9	-5
1	19	9	2	11	17	2	3	7
2	40	34	2	12	17	2	3	8
2	40	34	2	12	17	2	3	7
2	44	34	5	36	48	5	37	37
2	49	39	6	41	48	6	43	37
2	49	39	7	42	49	7	44	38
3	65	54	8	46	53	8	48	42
4	79	68	9	45	57	9	52	46
7	122	111	12	59	72	12	71	65
8	128	116	13	69	81	13	75	69
9	133	121	14	73	86	14	84	78
10	142	130	15	83	96	15	90	84
11	151	134	16	88	101	16	95	89
14	175	157	19	105	119	19	107	101
15	184	162	21	115	129	21	118	111
16	189	166	22	119	134	22	122	116
17	194	176	23	124	139	23	122	116
18	199	181	26	135	150	26	129	122
21	217	198	28	139	159	28	133	126
23	222	204	33	157	178	33	142	140
24	227	208	37	166	188	37	143	140
25	232	213	42	174	196	42	146	143
28	238	219	44	176	198	44	148	146
30	243	223	47	175	202	47	146	144
35	256	236	54	184	206	54	152	144
39	262	242	61	188	216	61	156	148
44	265	250	68	194	222	68	157	154
46	272	252	75	199	226	75	161	154
49	270	251	82	202	230	82	165	158
56	275	256	90	211	235	90	170	167
63	280	260	96	211	239	96	174	171
70	286	266	105	216	244	105	179	172
77	285	265	111	220	244	111	183	180
84	289	269	127	225	250	127	189	186
92	294	274	135	230	254	135	193	190
98	294	278	141	236	265	141	200	196
107	294	278	149	236	265	149	200	196
113	298	278	159	241	270	159	209	206
129	304	284	174	245	280	174	214	210
137	308	288	180	250	285	180	219	210
143	310	289						
151	310	289						
161	310	290						
176	315	294						
180	315	294						

RETRAÇÃO POR SECAGEM								
C60_0			C60_1			C60_2		
Idade (dias)	Deformação		Idade (dias)	Deformação		Idade (dias)	Deformação	
	CP1	CP2		CP1	CP2		CP1	CP2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	5	0	0	5	0	5	0
0	5	14	0	5	10	0	10	5
0	10	13	0	11	10	0	15	10
1	24	27	5	76	81	5	60	61
2	34	37	6	87	82	6	66	67
7	80	86	7	92	87	7	71	71
8	87	92	8	97	96	8	75	76
9	91	96	9	106	105	9	80	80
10	96	101	14	134	131	14	102	103
11	100	105	16	141	137	16	108	109
16	118	122	19	150	151	19	118	119
18	125	128	22	160	160	22	122	124
21	134	137	26	170	174	26	132	133
24	139	142	30	180	183	30	141	143
28	144	151	33	188	191	33	145	146
32	154	160	37	194	196	37	155	157
35	158	164	40	200	202	40	161	158
39	163	170	44	205	211	44	166	163
42	169	170	47	214	215	47	170	167
46	174	175	54	218	224	54	174	176
49	178	179	62	223	233	62	184	181
56	182	183	68	233	242	68	183	185
64	182	188	77	243	251	77	198	195
70	182	188	83	251	259	83	201	199
79	187	193	92	261	269	92	207	204
85	191	196	99	272	279	99	212	210
101	197	202	107	277	285	107	217	214
115	207	207	113	272	279	113	221	220
123	212	211	121	277	288	121	226	228
133	217	221	133	283	293	133	236	233

Tabela 42 – Resultados individuais de retração autógena e retração por secagem do C40

RETRAÇÃO AUTÓGENA								
C40_0			C40_1			C40_2		
Idade (dias)	Deformação		Idade (dias)	Deformação		Idade (dias)	Deformação	
	CP1	CP2		CP1	CP2		CP1	CP2
0,00	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-5	0	0	-5	-5	0	-6	-2
0	-5	0	0	-5	-5	1	-17	-7
1	-1	-6	1	-21	-22	1	-19	-10
1	-4	-13	1	-24	-29	1	-20	-10
1	0	-9	1	-20	-25	2	-8	1
1	0	-10	1	-16	-21	2	-8	2
2	10	5	2	-5	-9	5	0	9
2	15	10	2	-4	-9	6	4	9
2	16	11	2	-4	-8	7	5	10
3	21	16	3	1	-3	12	8	17
4	25	16	4	2	-3	13	9	19
7	27	23	7	4	-1	14	10	19
8	31	21	8	7	-2	15	9	18
9	32	23	9	8	-1	16	14	19
14	39	30	14	16	12	21	22	31
15	41	36	15	17	13	23	24	33
16	41	36	16	18	14	26	28	42
17	45	36	17	22	18	29	34	47
18	45	36	18	22	18	33	43	57
23	58	53	23	34	31	37	53	66
25	60	55	25	41	33	40	52	70
28	64	59	28	45	42	44	58	76
31	69	68	31	55	47	47	63	81
35	78	73	35	59	52	51	68	81
39	83	82	39	69	62	54	68	85
42	87	86	42	73	66	61	72	94
46	97	96	46	83	77	69	86	103
49	103	102	49	88	82	75	86	112
53	102	101	53	88	82	84	91	117
56	107	106	56	93	87	90	95	121
63	115	114	63	101	96	106	106	132
71	124	123	71	110	105	114	110	136
77	129	132	77	115	110	120	112	137
86	139	137	86	120	115	128	116	142
92	147	146	92	124	119	138	122	147
108	158	156	108	129	129	153	131	156
116	162	160	116	134	134	160	131	157
122	164	167	122	140	140	167	134	159
130	164	167	130	145	145	174	144	164
140	168	176	140	154	150	180	143	168
155	178	181	155	158	155			
162	183	186	162	164	161			
169	185	188	169	166	163			
176	190	193	176	171	168			
180	189	196	180	170	172			

RETRAÇÃO POR SECAGEM								
C40_0			C40_1			C40_2		
Idade (dias)	Deformação		Idade (dias)	Deformação		Idade (dias)	Deformação	
	CP1	CP2		CP1	CP2		CP1	CP2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	5	0	0	4	5	0	5	10
1	23	19	1	18	25	1	24	28
2	33	28	2	27	35	5	57	61
3	42	37	3	36	44	6	62	66
7	79	75	7	73	74	7	67	71
8	88	84	8	78	79	8	72	76
9	98	94	9	83	84	9	76	80
10	103	99	10	88	90	12	94	98
11	107	108	11	96	99	14	100	100
14	134	130	14	113	112	16	110	113
16	139	140	16	118	123	19	120	121
18	149	150	18	128	133	23	135	136
21	164	165	21	143	144	26	144	145
25	178	180	25	157	159	30	158	159
28	191	188	28	165	168	33	162	165
32	205	202	32	178	182	41	172	175
35	214	211	35	183	187	47	187	190
43	224	226	43	197	197	56	201	203
49	238	235	49	206	211	62	210	212
58	252	254	58	224	232	71	214	217
64	265	267	64	233	240	78	225	227
73	274	277	73	237	251	86	230	232
80	285	283	80	242	257	92	245	247
88	294	292	88	247	261	100	254	257
94	304	302	94	266	273	110	264	267
102	308	306	102	275	282	125	269	271
112	318	316	112	285	292	132	279	281
127	322	316	127	289	297			
134	332	326	134	299	307			

Tabela 43 – Valores de retração autógena determinados em ensaios e os preditos pelo modelo matemático (Equação 12) considerando as três classes de concreto estudadas.

Teor ARR (%)	Idade (dia)	fcj (MPa)	$\epsilon_s (10^{-6})$		Diferença	
			Ensaio	Predição	Absoluta	Relativa
0	1	34,1	-11,03	-0,88	10,14	-92%
0	3	54,5	-59,53	-60,06	-0,53	1%
0	7	64,7	-116,55	-105,65	10,90	-9%
0	28	71,4	-228,86	-180,21	48,65	-21%
0	90	76,8	-283,76	-243,00	40,77	-14%
0	180	77,2	-304,76	-280,26	24,50	-8%
1	1	38,9	2,45	-0,75	-3,19	-130%
1	3	47,8	-14,55	-48,92	-34,38	236%
1	7	60,7	-45,48	-86,10	-40,62	89%
1	28	76,2	-148,87	-146,88	1,99	-1%
1	90	78	-222,97	-198,04	24,92	-11%
1	180	76,9	-267,59	-228,41	39,17	-15%
2	1	30,5	-4,36	-0,54	3,83	-88%
2	3	48,1	-5,24	-37,82	-32,57	621%
2	7	57	-40,84	-66,54	-25,70	63%
2	28	70,6	-129,44	-113,53	15,91	-12%
2	90	76,7	-168,22	-153,09	15,13	-9%
2	180	77,5	-214,64	-176,56	38,07	-18%
0	1	53,2	-23,2	-0,99	22,19	-96%
0	3	68,5	-94,4	-60,12	34,33	-36%
0	7	79	-158,9	-105,70	53,21	-33%
0	28	90,3	-288,5	-180,27	108,24	-38%
0	90	93,6	-330,4	-243,04	87,35	-26%
0	180	90,9	-355,5	-280,30	75,22	-21%
1	1	50,4	-8,6	-0,80	7,81	-91%
1	3	65,4	-43,1	-48,99	-5,84	14%
1	7	75,9	-107,7	-86,14	21,53	-20%
1	28	90,2	-203,4	-146,92	56,45	-28%
1	90	97,8	-221,7	-198,09	23,63	-11%
1	180	89,9	-245,1	-228,44	16,65	-7%
2	1	37,5	-5,2	-0,57	4,68	-89%
2	3	64,8	-40,2	-37,87	2,35	-6%
2	7	74,3	-101,5	-66,58	34,92	-34%
2	28	85,5	-188,4	-113,56	74,87	-40%
2	90	86,7	-196,9	-153,11	43,81	-22%
2	180	93,4	-228,0	-176,59	51,44	-23%
0	1	15,1	3,63	-0,68	-4,31	-119%
0	3	28,5	-18,27	-59,90	-41,63	228%
0	7	35,7	-24,99	-105,51	-80,52	322%
0	28	50,2	-61,46	-180,12	-118,66	193%
0	90	50,4	-146,57	-242,89	-96,32	66%
0	180	46,4	-192,77	-280,13	-87,37	45%
1	1	14,3	21,23	-0,54	-21,77	-103%
1	3	26	0,83	-48,80	-49,63	-5967%
1	7	33,5	-1,53	-85,97	-84,45	5523%
1	28	40,1	-43,79	-146,75	-102,96	235%
1	90	46,9	-121,14	-197,94	-76,80	63%
1	180	48,2	-170,99	-228,32	-57,33	34%
2	1	10,4	14,74	-0,37	-15,11	-103%
2	3	23,4	-0,92	-37,71	-36,79	4021%
2	7	32	-7,16	-66,45	-59,29	828%
2	28	43,7	-40,45	-113,45	-73,00	180%
2	90	40,5	-108,11	-152,99	-44,88	42%
2	180	44,3	-155,20	-176,48	-21,28	14%

Tabela 44 – Valores de retração autógena determinados em ensaios e os preditos pelo modelo matemático (Equação 13) considerando somente as classes de concreto C60 e C80.

Teor ARR (%)	Idade (dia)	f _{cj} (MPa)	ε _s (10 ⁻⁶)		Diferença	
			Ensaio	Predição	Absoluta	Relativa
0	1	34,1	-11,03	-3,56	7,46	-68%
0	3	54,5	-59,53	-75,38	-15,86	27%
0	7	64,7	-116,55	-130,58	-14,03	12%
0	28	71,4	-228,86	-220,70	8,16	-4%
0	90	76,8	-283,76	-296,60	-12,84	5%
0	180	77,2	-304,76	-341,62	-36,86	12%
1	1	38,9	2,45	-2,97	-5,42	-221%
1	3	47,8	-14,55	-60,43	-45,88	315%
1	7	60,7	-45,48	-104,80	-59,33	130%
1	28	76,2	-148,87	-177,28	-28,41	19%
1	90	78	-222,97	-238,18	-15,22	7%
1	180	76,9	-267,59	-274,32	-6,73	3%
2	1	30,5	-4,36	-2,09	2,27	-52%
2	3	48,1	-5,24	-45,61	-40,36	770%
2	7	57	-40,84	-79,05	-38,22	94%
2	28	70,6	-129,44	-133,74	-4,30	3%
2	90	76,7	-168,22	-179,74	-11,52	7%
2	180	77,5	-214,64	-207,02	7,61	-4%
0	1	53,2	-23,2	-4,01	19,17	-83%
0	3	68,5	-94,4	-75,61	18,84	-20%
0	7	79	-158,9	-130,78	28,13	-18%
0	28	90,3	-288,5	-220,94	67,57	-23%
0	90	93,6	-330,4	-296,80	33,59	-10%
0	180	90,9	-355,5	-341,79	13,74	-4%
1	1	50,4	-8,6	-3,18	5,43	-63%
1	3	65,4	-43,1	-60,68	-17,53	41%
1	7	75,9	-107,7	-104,98	2,69	-2%
1	28	90,2	-203,4	-177,42	25,95	-13%
1	90	97,8	-221,7	-238,37	-16,65	8%
1	180	89,9	-245,1	-274,44	-29,35	12%
2	1	37,5	-5,2	-2,22	3,03	-58%
2	3	64,8	-40,2	-45,79	-5,57	14%
2	7	74,3	-101,5	-79,22	22,29	-22%
2	28	85,5	-188,4	-133,86	54,57	-29%
2	90	86,7	-196,9	-179,82	17,10	-9%
2	180	93,4	-228,0	-207,14	20,89	-9%

Tabela 45 – Resultados individuais de resistência à compressão

C80 - Resistência à compressão - Res. Individuais						C60 - Resistência à compressão - Res. Individuais						C40 - Resistência à compressão - Res. Individuais											
Teor de ARR (%)	Idade (dias)	f _{cj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Teor de ARR (%)	Idade (dias)	f _{cj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Teor de ARR (%)	Idade (dias)	f _{cj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)						
0	1	53,0	53,2	0,59	1,1	0	1	34,0	34,1	0,80	2,4	0	1	15,3	15,1	0,67	4,4						
0	1	53,9				0	1	34,9				0	1	14,4									
0	1	52,8				0	1	33,3				0	1	15,7									
0	3	66,7	68,5	2,55	3,7	0	3	54,3	54,5	0,82	1,5	0	3	28,1	28,5	0,47	1,7						
0	3	55,6				0	3	55,4				0	3	29,0									
0	3	70,3				0	3	53,8				0	3	28,3									
0	7	78,2	79,0	1,22	1,5	0	7	65,7	64,7	3,55	5,5	0	7	35,8	35,7	0,61	1,7						
0	7	80,4				0	7	60,8				0	7	36,2									
0	7	78,4				0	7	67,7				0	7	35,0									
0	28	91,3	90,2	1,65	1,8	0	28	75,7	72,9	2,42	3,3	0	28	51,0	50,2	0,80	1,6						
0	28	90,6				0	28	71,5				0	28	49,4									
0	28	88,9				0	28	66,9				0	28	51,7									
0	28	88,2				0	28	71,5				0	28	50,2									
0	28	89,6				0	90	77,4				0	90	47,1									
0	28	92,7				0	90	73,7				0	90	46,7									
0	90	99,4	93,6	5,53	5,9	0	90	79,2	76,8	2,80	3,7	0	90	47,1	50,4	2,84	5,6						
0	90	88,4				0	90	77,4				0	90	46,7									
0	90	92,9				0	180	79,8				0	180	45,9									
0	180	88,6	90,9	2,80	3,1	0	180	74,5	77,2	2,65	3,4	0	180	46,5	46,4	0,42	0,9						
0	180	94,0				1	1	39,0				1	1	38,7				1	1	14,4	14,3	0,21	1,5
0	180	90,0				1	1	39,0				1	1	38,7				1	1	14,5			
1	1	50,4	1	1	50,4	1	1	38,7	1	1	14,5	1	1	14,4	26,0	0,06	0,2						
1	1	50,3	1	3	63,8	1	3	47,1	1	3	26,0	1	3	25,9				26,0	0,06	0,2			
1	3	67,3	1	3	65,1	1	3	47,1	1	3	26,0	1	3	26,0							33,8	0,26	0,8
1	3	65,1	1	7	78,8	1	7	60,2	1	7	1,36	1	7	34,1	33,8	0,26	0,8						
1	7	78,8	1	7	72,9	1	7	59,6	1	7	1,36	1	7	33,6				40,1	3,96	9,9			
1	7	72,9	1	7	76,0	1	7	62,2	1	7	1,36	1	7	32,9							40,1	3,96	9,9
1	7	76,0	1	7	72,4	1	28	78,4	1	28	1,89	1	7	33,7	40,1	3,96	9,9						
1	7	72,4	1	28	90,0	1	28	74,9	1	28	1,89	1	28	42,5				46,9	2,26	4,8			
1	28	90,0	1	28	89,8	1	28	75,4	1	28	1,89	1	28	42,2							46,9	2,26	4,8
1	28	89,8	1	28	90,9	1	90	78,4	1	90	0,72	1	28	35,5	46,9	2,26	4,8						
1	28	89,3	1	28	89,3	1	90	77,2	1	90	0,72	1	90	47,1				46,9	2,26	4,8			
1	28	89,3	1	90	96,0	1	90	78,5	1	90	0,72	1	90	44,5							46,9	2,26	4,8
1	90	96,0	1	90	97,8	1	90	78,5	1	90	0,72	1	90	49,0	46,9	2,26	4,8						
1	90	97,8	1	90	97,8	1	180	79,7	1	180	2,85	1	90	49,0				46,9	2,26	4,8			
1	90	99,6	1	180	91,1	1	180	74,0	1	180	2,85	1	180	48,1							45,1	5,31	11,8
1	180	91,1	1	180	88,0	1	180	77,0	1	180	2,85	1	180	39,0	45,1	5,31	11,8						
1	180	88,0	1	180	90,7	2	1	28,3	2	1	1,93	1	180	48,3				45,1	5,31	11,8			
1	180	90,7	2	1	38,0	2	1	31,1	2	1	1,93	2	1	10,4							10,4	0,20	1,9
2	1	38,0	2	1	36,2	2	1	32,0	2	1	1,93	2	1	10,2	10,4	0,20	1,9						
2	1	36,2	2	1	38,2	2	3	47,7	2	3	0,47	2	1	10,6				23,4	1,31	5,6			
2	1	38,2	2	3	65,1	2	3	47,9	2	3	0,47	2	3	24,9							23,4	1,31	5,6
2	3	65,1	2	3	65,1	2	3	48,6	2	3	0,47	2	3	22,8	32,0	2,76	8,6						
2	3	65,1	2	3	64,3	2	3	48,6	2	3	0,47	2	3	22,5				32,0	2,76	8,6			
2	3	64,3	2	7	73,8	2	7	57,7	2	7	0,82	2	7	33,4							32,0	2,76	8,6
2	7	73,8	2	7	75,1	2	7	55,7	2	7	0,82	2	7	29,5	32,0	2,76	8,6						
2	7	75,1	2	7	73,9	2	7	55,7	2	7	0,82	2	7	33,0				43,6	2,22	5,1			
2	7	73,9	2	7	73,3	2	7	56,4	2	7	0,82	2	7	45,7							43,6	2,22	5,1
2	7	73,3	2	28	86,0	2	28	71,8	2	28	1,69	2	28	40,6	43,6	2,22	5,1						
2	28	86,0	2	28	85,9	2	28	68,2	2	28	1,69	2	28	44,9				43,6	2,22	5,1			
2	28	85,9	2	28	84,6	2	28	71,3	2	28	1,69	2	28	41,8							43,6	2,22	5,1
2	28	84,6	2	28	85,8	2	28	69,3	2	28	1,69	2	28	44,8	43,6	2,22	5,1						
2	28	85,8	2	90	88,2	2	90	78,3	2	90	3,36	2	90	43,1				40,5	3,69	9,1			
2	90	88,2	2	90	85,9	2	90	78,9	2	90	3,36	2	90	42,2							40,5	3,69	9,1
2	90	85,9	2	90	86,1	2	90	72,8	2	90	3,36	2	90	36,3	44,3	1,34	3,0						
2	90	86,1	2	180	91,4	2	180	76,2	2	180	2,22	2	180	31,1				44,3	1,34	3,0			
2	180	91,4	2	180	95,5	2	180	76,3	2	180	2,22	2	180	45,2							44,3	1,34	3,0
2	180	95,5	2	180	93,4	2	180	80,1	2	180	2,22	2	180	43,3	44,3	1,34	3,0						
2	180	93,4																					

Tabela 46 – Resultados individuais de módulo de elasticidade

C80 - Módulo de elasticidade - Res. Individuais						C60 - Módulo de elasticidade - Res. Individuais						C40 - Módulo de elasticidade - Res. Individuais					
Teor de ARR (%)	Idade (dias)	Ec (GPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Teor de ARR (%)	Idade (dias)	Ec (GPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Teor de ARR (%)	Idade (dias)	Ec (GPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
0	1	27,3	27,0	0,3	1,0	0	1	24,9	23,3	1,8	7,6	0	1	16,1	15,1	0,8	5,5
0	1	26,8				0	1	23,7				0	1	14,6			
0	1	26,9				0	1	21,4				0	1	14,7			
0	3	30,7	30,4	0,3	1,0	0	3	27,9	28,1	0,2	0,7	0	3	22,2	21,0	1,7	8,0
0	3	30,2				0	3	28,2				0	3	19,1			
0	3	30,2				0	3	28,3				0	3	21,8			
0	7	32,4	30,9	2,2	7,1	0	7	31,6	31,1	0,5	1,6	0	7	24,9	24,3	2,0	8,3
0	7	28,4				0	7	31,1				0	7	25,9			
0	7	31,9				0	7	30,6				0	7	22,0			
0	28	36,2	35,2	1,4	4,0	0	28	31,9	32,5	1,0	3,0	0	28	29,1	28,7	1,0	3,6
0	28	35,9				0	28	33,6				0	28	27,5			
0	28	33,6				0	28	31,9				0	28	29,4			
0	90	35,0	34,9	0,2	0,4	0	90	33,0	32,9	0,5	1,4	0	90	30,5	31,0	1,6	5,2
0	90	34,7				0	90	33,3				0	90	32,8			
0	90	34,9				0	90	32,4				0	90	29,7			
0	180	35,3	34,9	0,3	0,9	0	180	31,4	32,1	1,1	3,4	0	180	28,2	31,3	2,9	9,2
0	180	34,8				0	180	33,4				0	180	33,9			
0	180	34,7				1	1	21,8				1	1	15,7			
1	1	26,3	27,2	1,1	4,2	1	1	23,2	21,9	1,2	5,5	1	1	16,4	16,1	0,4	2,3
1	1	28,5				1	1	20,8				1	1	16,3			
1	1	26,9				1	3	27,1				1	3	20,0			
1	3	30,0	30,6	0,6	1,8	1	3	27,0	27,1	0,2	0,6	1	3	19,5	19,5	0,6	2,8
1	3	30,6				1	3	27,3				1	3	18,9			
1	3	31,1				1	7	27,5				1	7	21,2			
1	7	32,4	32,7	0,5	1,6	1	7	28,1	28,1	0,7	2,3	1	7	22,2	21,7	0,5	2,3
1	7	33,3				1	7	28,8				1	7	21,6			
1	7	32,4				1	28	32,2				1	28	28,7			
1	28	36,3	34,7	1,4	3,9	1	28	31,5	32,1	0,6	1,7	1	28	28,7	29,0	0,7	2,4
1	28	34,0				1	28	32,6				1	28	28,5			
1	28	33,9				1	90	30,1				1	90	29,8			
1	90	34,7	34,7	1,2	3,3	1	90	31,0	31,3	1,4	4,4	1	90	27,4	28,1	1,6	5,7
1	90	33,6				1	90	32,8				1	90	26,9			
1	90	35,9				1	180	33,7				1	180	29,9			
1	180	37,3	35,6	1,6	4,4	1	180	30,4	31,6	1,8	5,7	1	180	36,3	37,1	2,2	5,8
1	180	34,2				1	180	30,8				1	180	39,5			
1	180	35,2				2	1	23,5				2	1	13,3			
2	1	22,3	23,3	0,8	3,6	2	1	23,1	23,1	0,5	2,0	2	1	13,3	14,4	1,0	7,0
2	1	23,7				2	1	22,6				2	1	15,3			
2	1	23,8				2	3	29,3				2	3	14,6			
2	3	28,6	28,9	0,4	1,2	2	3	25,1	26,5	2,5	9,3	2	3	18,4	19,5	1,3	6,5
2	3	28,8				2	3	25,0				2	3	20,9			
2	3	29,3				2	7	28,2				2	7	19,2			
2	7	31,4	31,1	0,2	0,7	2	7	28,8	28,6	0,3	1,1	2	7	25,6	24,5	1,6	6,5
2	7	31,0				2	7	28,7				2	7	25,3			
2	7	31,0				2	28	31,5				2	28	22,7			
2	28	34,0	34,0	0,4	1,2	2	28	32,6	31,7	0,8	2,4	2	28	26,2	27,2	1,3	4,9
2	28	33,6				2	28	31,1				2	28	28,1			
2	28	34,4				2	90	30,7				2	90	28,6			
2	90	34,7	33,9	0,8	2,3	2	90	33,1	31,5	1,4	4,5	2	90	28,6	29,9	1,3	4,3
2	90	33,7				2	90	30,6				2	90	31,2			
2	90	33,2				2	180	33,0				2	180	30,0			
2	180	35,0	35,1	0,3	0,9	2	180	32,6	32,6	0,4	1,1	2	180	32,1	34,4	3,3	9,5
2	180	34,8				2	180	32,3				2	180	36,7			
2	180	35,4															

Tabela 47 – Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral

C80 - Resistência à tração por compressão diametral - Res. Individuais						C60 - Resistência à tração por compressão diametral - Res. Individuais						C40 - Resistência à tração por compressão diametral - Res. Individuais					
Teor de ARR (%)	Idade (dias)	$f_{t,sp}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Teor de ARR (%)	Idade (dias)	$f_{t,sp}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Teor de ARR (%)	Idade (dias)	$f_{t,sp}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
0	1	3,7				0	1	2,8				0	1	1,7			
0	1	3,7	3,9	0,4	9,4	0	1	2,3	2,7	0,4	15,2	0	1	1,9	1,7	0,2	9,8
0	1	4,4				0	1	3,1				0	1	1,6			
0	3	3,5				0	3	3,9				0	3	2,5			
0	3	3,5	3,9	0,7	17,7	0	3	4,6	4,0	0,5	12,6	0	3	2,7	2,6	0,1	3,3
0	3	4,7				0	3	3,6				0	3	2,7			
0	7	5,3				0	7	3,5				0	7	3,2			
0	7	5,2	5,1	0,3	6,6	0	7	3,9	4,0	0,4	10,1	0	7	3,2	3,3	0,1	3,1
0	7	4,7				0	7	4,3				0	7	3,4			
0	28	5,8				0	7	4,3				0	28	3,8			
0	28	4,8	5,4	0,5	9,7	0	28	5,1				0	28	3,6	3,8	0,2	5,8
0	28	5,7				0	28	4,9				0	28	3,6			
0	90	5,7				0	28	4,5	4,8	0,3	5,3	0	28	4,0			
0	90	5,3	5,7	0,4	6,2	0	28	4,7				0	90	3,8			
0	90	6,0				0	90	4,5				0	90	3,4	3,6	0,2	5,2
0	180	4,9				0	90	4,3	4,5	0,3	5,8	0	90	3,7			
0	180	5,8	5,6	0,7	12,5	0	90	4,8				0	180	4,0	4,0	0,0	0,7
0	180	6,2				0	180	5,6				0	180	4,0			
1	1	3,0				0	180	4,4	5,1	0,6	12,3	1	1	1,9			
1	1	3,6	3,4	0,3	9,0	0	180	5,2				1	1	1,8	1,9	0,1	5,1
1	1	3,5				1	1	3,2				1	1	2,0			
1	3	4,0				1	1	3,0	2,9	0,3	8,6	1	3	2,8			
1	3	4,9	4,5	0,5	10,8	1	1	2,7				1	3	2,5	2,4	0,5	19,8
1	3	4,8				1	3	3,9				1	3	1,9			
1	7	5,4				1	3	3,7	3,8	0,1	2,9	1	7	2,7			
1	7	4,6				1	3	3,8				1	7	2,7			
1	7	4,7	5,0	0,4	8,2	1	7	3,7				1	7	3,1	2,9	0,2	7,8
1	7	5,3				1	7	4,6				1	7	2,9			
1	28	5,1				1	7	4,0	4,2	0,5	11,2	1	28	4,3			
1	28	5,2	4,9	0,3	6,5	1	7	4,6				1	28	3,2	3,6	0,6	17,9
1	28	4,5				1	28	4,7				1	28	3,2			
1	28	4,8				1	28	4,8	4,8	0,1	1,1	1	28	3,2			
1	90	5,5				1	28	4,8				1	90	3,8			
1	90	5,4	5,2	0,4	7,0	1	90	4,7				1	90	3,1	3,7	0,5	12,9
1	90	4,8				1	90	5,2	5,3	0,6	12,3	1	90	4,0			
1	180	5,3				1	90	6,0				1	180	3,6			
1	180	4,3	5,1	0,7	14,4	1	180	5,2				1	180	3,7	3,6	0,1	2,5
1	180	5,7				1	180	4,4	5,0	0,4	9,0	1	180	3,6			
2	1	3,6				1	180	5,2				2	1	1,3			
2	1	3,8	3,5	0,3	7,7	2	1	3,1				2	1	1,6	1,5	0,1	8,7
2	1	3,2				2	1	2,5	2,8	0,3	10,9	2	1	1,5			
2	3	3,7				2	1	2,8				2	3	2,8			
2	3	3,8	4,0	0,5	12,2	2	3	3,8				2	3	2,7	2,8	0,1	2,5
2	3	4,6				2	3	2,8	3,4	0,5	15,1	2	3	2,8			
2	7	4,6				2	3	3,4				2	7	2,8			
2	7	4,2	4,5	0,3	6,0	2	7	3,7				2	7	2,8	2,9	0,1	3,7
2	7	4,7				2	7	4,1	3,9	0,2	5,1	2	7	3,0			
2	28	5,5				2	7	4,0				2	28	3,8			
2	28	6,1				2	28	4,7				2	28	4,1	4,1	0,3	6,7
2	28	5,4	5,6	0,3	5,0	2	28	4,8	4,5	0,5	11,0	2	28	4,4			
2	28	5,8				2	28	3,9				2	90	3,7			
2	28	5,5				2	90	4,6				2	90	4,0	3,8	0,2	4,2
2	90	5,4				2	90	5,0	4,8	0,2	4,3	2	90	3,7			
2	90	5,6	5,5	0,1	2,4	2	90	4,9				2	180	3,3			
2	90	5,5				2	180	5,3				2	180	4,0	3,7	0,3	9,3
2	180	6,4				2	180	4,5	4,7	0,6	11,9	2	180	3,7			
2	180	6,1	6,1	0,2	3,7	2	180	4,2				2	180	3,7			
2	180	5,9															

Tabela 48 – Resultados individuais de resistência à tração na flexão

C80 - Resistência à tração na flexão Res. Individuais						C60 - Resistência à tração na flexão						C40 - Resistência à tração na flexão					
Teor de ARR (%)	Idade (dias)	fr (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Teor de ARR (%)	Idade (dias)	fr (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Teor de ARR (%)	Idade (dias)	fr (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
0	3	6,6	6,5	0,2	3,6	0	3	5,5	5,3	0,4	7,7	0	3	3,3	3,0	0,4	13,5
0	3	6,3				0	3	5,0				0	3	2,7			
0	7	7,0	6,7	0,4	6,2	0	7	6,1	6,0	0,2	3,4	0	7	3,5	3,6	0,2	5,3
0	7	6,4				0	7	5,8				0	7	3,8			
0	28	7,6	7,9	0,5	6,4	0	28	7,5	7,3	0,1	1,8	0	28	5,0	5,6	0,5	8,4
0	28	8,6				0	28	7,4				0	28	6,1			
0	28	8,0				0	28	7,2				0	28	5,5			
0	28	7,5				0	28	7,3				0	28	5,8			
0	90	8,5				0	90	7,2				0	90	7,2			
0	90	8,2	0	90	7,4	0	90	7,4									
0	180	7,1	7,5	0,4	5,9	0	180	7,8	7,7	0,1	1,1	0	180	5,3	5,4	0,2	2,9
0	180	7,8				0	180	7,7				0	180	5,5			
1	3	5,6	5,7	0,2	2,8	1	3	4,6	4,8	0,3	6,0	1	3	4,1	3,8	0,4	10,2
1	3	5,8				1	3	5,0				1	3	3,5			
1	7	5,9	6,1	0,3	4,5	1	7	5,3	5,4	0,2	3,2	1	7	4,3	4,2	0,2	3,7
1	7	6,3				1	7	5,5				1	7	4,1			
1	28	8,6	8,1	0,4	5,1	1	28	7,8	7,5	0,2	3,2	1	28	4,5	4,6	0,1	2,4
1	28	8,1				1	28	7,5				1	28	4,6			
1	28	7,6				1	28	7,5				1	28	4,7			
1	28	8,2				1	28	7,5				1	28	4,7			
1	90	9,2				1	90	7,2				1	90	7,2			
1	90	9,0	1	90	7,7	1	90	7,7									
1	180	8,2	8,4	0,3	3,0	1	180	7,4	7,2	0,3	4,4	1	180	4,8	5,1	0,4	7,0
1	180	8,5				1	180	7,0				1	180	5,3			
2	3	5,8	5,7	0,1	1,1	2	3	4,3	4,6	0,3	7,6	2	3	4,2	3,9	0,3	8,8
2	3	5,7				2	3	4,8				2	3	3,7			
2	7	6,8	6,6	0,3	4,0	2	7	4,9	5,1	0,3	6,1	2	7	4,2	4,2	0,1	2,2
2	7	6,4				2	7	5,4				2	7	4,3			
2	28	8,2	8,0	0,2	2,4	2	28	7,6	7,5	0,3	3,5	2	28	5,3	5,1	0,2	4,8
2	28	8,1				2	28	7,4				2	28	4,8			
2	28	7,9				2	28	7,3				2	28	5,2			
2	28	7,8				2	28	7,9				2	28	5,0			
2	90	8,9				2	90	6,3				2	90	5,9			
2	90	8,9	2	90	6,3	2	90	5,2									
2	180	9,0	9,2	0,3	2,9	2	180	7,3	6,3	0,0	0,0	2	180	5,2	5,6	0,5	8,4
2	180	9,3				2	180	6,2				2	180	5,2			
						2	180	6,2	6,8	0,8	11,2	2	180	5,1	5,1	0,1	1,9

Tabela 49 – Resultados individuais da fluência básica

Idade $t_0=7$ dias		$F_k (10^{-6}/MPa)$		Idade $t_0=7$ dias		$F_k (10^{-6}/MPa)$	
Classe	ARR (%)	Individual	Média	Classe	ARR (%)	Individual	Média
C80	0	2,42	2,67	C60	0	1,95	2,04
		2,91				2,13	
	1	2,94	2,59		1	3,66	3,49
		2,23				3,31	
	2	2,63	2,60		2	2,98	2,97
		2,57				2,95	
Idade $t_0=28$ dias		$F_k (10^{-6}/MPa)$					
Classe	ARR (%)	Individual	Média				
C80	0	2,03	2,00				
		1,96					
	2	1,68	1,79				
		1,89					

Tabela 50 – Resultados individuais das propriedades de durabilidade – Penetrabilidade a cloretos e coeficiente de carbonatação natural

Penetrabilidade a Cloretos a 90 dias Resultados individuais						Profundidade de carbonatação e coeficiente de carbonatação natural Resultados Individuais							
Classe	Teor de ARR (%)	Carga passante (C)	Média (C)	Desvio padrão (C)	CV (%)	Classe	Teor de ARR (%)	Idade (meses)	Profundidade (mm)	Coef. Carbonatação natural - K_N (mm/ $\sqrt{\text{Vano}}$)	Média (mm/ $\sqrt{\text{Vano}}$)	Desvio padrão (mm/ $\sqrt{\text{Vano}}$)	CV (%)
C80	0	132	143	7,5	5,2	C80	0	18	0	0,00	0,00	0,00	0,0
C80	0	153											
C80	0	147											
C80	0	141											
C80	0	146											
C80	0	139											
C80	1	143	153	10,3	6,7	C80	0	36	0	0,00	0,00	0,00	0,0
C80	1	164											
C80	1	152											
C80	2	115	116	3,5	3,0	C80	1	18	0	0,00	0,00	0,00	0,0
C80	2	113											
C80	2	120											
C80	2	120											
C60	0	271	276	7,8	2,8	C80	1	24	0	0,00	0,00	0,00	0,0
C60	0	271											
C60	0	285											
C60	1	301	314	12,3	3,9	C80	1	36	0	0,00	0,00	0,00	0,0
C60	1	325											
C60	1	317											
C60	2	302											
C60	2	309	316	19,1	6,0	C60	0	18	0	0,00	0,00	0,00	0,0
C60	2	338											
C60	2	338											
C40	0	562	642	68,9	10,7	C60	0	24	0	0,00	0,31	0,48	155,1
C40	0	682											
C40	0	682											
C40	1	474	661	6,2	0,9	C60	0	36	1,55	0,90	1,17	0,18	15,3
C40	1	665											
C40	1	657											
C40	2	401											
C40	2	596	605	13,4	2,2	C60	1	18	1,25	1,03	0,82	0,41	50,0
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C60	2	18	0,42	0,34	3,76	0,47	12,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C60	2	24	1,30	0,92	3,77	0,58	15,3
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	0	18	4,60	3,78	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	0	24	4,82	3,96	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	0	24	6,22	4,42	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	0	24	5,58	3,97	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	0	36	5,57	3,23	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	0	36	5,54	3,22	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	1	18	3,96	3,25	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	1	18	3,88	3,19	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	1	24	6,16	4,38	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	1	24	6,41	4,56	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	1	36	6,38	3,70	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	1	36	6,07	3,52	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	2	18	4,58	3,76	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	2	18	4,42	3,63	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	2	24	6,86	4,88	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	2	24	6,15	4,37	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	2	36	7,18	4,17	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615	661	6,2	0,9	C40	2	36	6,60	3,83	4,11	0,47	11,4
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											
C40	2	615											

Tabela 51 – Resultados individuais das propriedades de durabilidade – Absorção por capilaridade e absorção por imersão

Absorção por capilaridade - Res. Individuais						Absorção por imersão - Res. Individuais					
Classe	Teor de ARR (%)	Absorção capilar (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Desvio padrão (g/cm ²)	CV (%)	Classe	Teor de ARR (%)	Absorção por imersão (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)	CV (%)
80	0	0,22	0,22	0,0	2,6	80	0	3,09	3,05	0,2	7,4
80	0	0,22									
80	0	0,23									
80	1	0,25	0,25	0,0	2,3	80	0	2,80			
80	1	0,25									
80	1	0,26									
80	2	0,13	0,13	0,0	7,7	80	1	3,87			
80	2	0,12									
80	2	0,14									
60	0	0,30	0,30	0,0	3,3	80	1	4,02			
60	0	0,29									
60	0	0,31									
60	1	0,33	0,35	0,0	5,7	80	1	3,34			
60	1	0,35									
60	1	0,37									
60	2	0,27	0,29	0,0	6,0	80	2	3,77			
60	2	0,30									
60	2	0,30									
40	0	0,27	0,29	0,0	10,1	60	0	2,88			
40	0	0,32									
40	0	0,27									
40	1	0,34	0,34	0,0	2,1	60	0	3,25			
40	1	0,33									
40	2	0,49									
40	2	0,44	0,44	0,1	12,6	60	0	2,56			
40	2	0,38									
40	2	0,38									
40	0	0,27	5,36	0,2	3,5	60	1	5,10			
40	0	0,32									
40	0	0,27									
40	1	0,34	5,02	0,3	6,4	60	1	4,38			
40	1	0,33									
40	1	0,33									
40	2	0,49	4,23	0,2	5,9	60	1	4,78			
40	2	0,44									
40	2	0,44									
40	2	0,38	3,98	0,2	5,9	60	2	4,13			
40	2	0,38									
40	2	0,38									

APÊNDICE B – Resultados Individuais: Ensaio em Pastas

POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

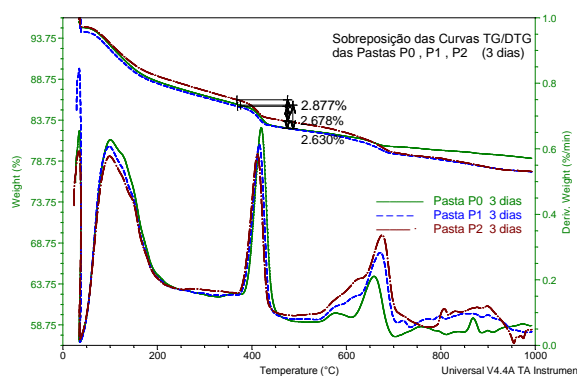
Tabela 52 – Resultados individuais de porosimetria por intrusão de mercúrio – Intrusão total

Porosimetria por intrusão de mercúrio - Res. Individuais						
Classe	Teor de ARR (%)	Idade (dias)	Volume total intrudido (mL/g)	Média (mL/g)	Desvio padrão (mL/g)	CV (%)
80	0	1	0,1511	0,1443	0,0096	6,7
80	0	1	0,1375			
80	0	3	0,1121	0,1111	0,0015	1,3
80	0	3	0,1100			
80	0	7	0,1024	0,1013	0,0016	1,6
80	0	7	0,1001			
80	0	28	0,0875	0,0899	0,0033	3,7
80	0	28	0,0922			
80	1	1	0,1484	0,1416	0,0097	6,8
80	1	1	0,1347			
80	1	3	0,1203	0,1201	0,0003	0,2
80	1	3	0,1199			
80	1	7	0,1092	0,1124	0,0045	4,0
80	1	7	0,1156			
80	1	28	0,1016	0,1013	0,0005	0,5
80	1	28	0,1009			
80	2	1	0,1539	0,1610	0,0100	6,2
80	2	1	0,1680			
80	2	3	0,1230	0,1249	0,0026	2,1
80	2	3	0,1267			
80	2	7	0,1101	0,1108	0,0010	0,9
80	2	7	0,1115			
80	2	28	0,1077	0,1076	0,0001	0,1
80	2	28	0,1075			
60	0	1	0,2439	0,2435	0,0006	0,3
60	0	1	0,2430			
60	0	3	0,2037	0,2037	0,0000	0,0
60	0	3	0,2037			
60	0	7	0,1891	0,1840	0,0072	3,9
60	0	7	0,1789			
60	0	28	0,1827	0,1721	0,0150	8,7
60	0	28	0,1615			
60	1	1	0,3037	0,2887	0,0213	7,4
60	1	1	0,2736			
60	1	3	0,2176	0,2117	0,0083	3,9
60	1	3	0,2058			
60	1	7	0,1881	0,1835	0,0066	3,6
60	1	7	0,1788			
60	1	28	0,1642	0,1687	0,0064	3,8
60	1	28	0,1732			
60	2	1	0,2848	0,2702	0,0207	7,7
60	2	1	0,2555			
60	2	3	0,1999	0,1963	0,0051	2,6
60	2	3	0,1927			
60	2	7	0,2196	0,1994	0,0286	14,4
60	2	7	0,1791			
60	2	28	0,2173	0,2005	0,0238	11,9
60	2	28	0,1836			

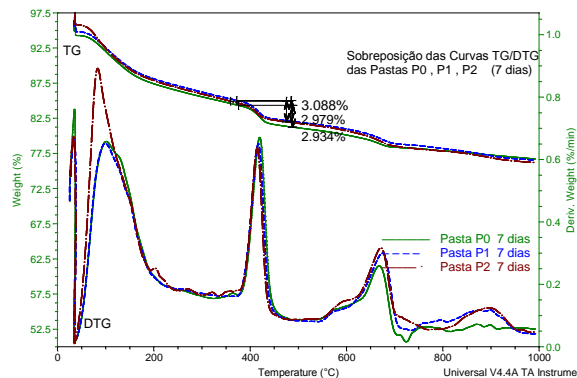
Tabela 53 – Resultados individuais de porosimetria por intrusão de mercúrio –
Volume de Hg por faixa de diâmetro de poro

Teor de ARR (%)	Idade (dias)	Faixa de diâmetro de poro	P80 Volume Hg intrudido (mL/g)	P60 Volume Hg intrudido (mL/g)	Teor de ARR (%)	Idade (dias)	Faixa de diâmetro de poro	P80 Volume Hg intrudido (mL/g)	P60 Volume Hg intrudido (mL/g)	Teor de ARR (%)	Idade (dias)	Faixa de diâmetro de poro	P80 Volume Hg intrudido (mL/g)	P60 Volume Hg intrudido (mL/g)
0	1	1	0,035	0,048	1	1	1	0,038	0,048	2	1	1	0,040	0,045
0	1	1	0,030	0,065	1	1	1	0,035	0,043	2	1	1	0,040	0,038
0	1	2	0,047	0,052	1	1	2	0,049	0,067	2	1	2	0,048	0,061
0	1	2	0,042	0,055	1	1	2	0,043	0,054	2	1	2	0,054	0,050
0	1	3	0,060	0,139	1	1	3	0,053	0,181	2	1	3	0,056	0,174
0	1	3	0,061	0,119	1	1	3	0,055	0,171	2	1	3	0,056	0,164
0	1	4	0,005	0,004	1	1	4	0,005	0,008	2	1	4	0,003	0,004
0	1	4	0,004	0,004	1	1	4	0,002	0,006	2	1	4	0,003	0,003
0	3	1	0,028	0,052	1	3	1	0,039	0,058	2	3	1	0,047	0,059
0	3	1	0,029	0,051	1	3	1	0,037	0,057	2	3	1	0,042	0,054
0	3	2	0,062	0,052	1	3	2	0,061	0,055	2	3	2	0,067	0,050
0	3	2	0,061	0,060	1	3	2	0,065	0,046	2	3	2	0,073	0,047
0	3	3	0,019	0,097	1	3	3	0,008	0,100	2	3	3	0,007	0,089
0	3	3	0,018	0,097	1	3	3	0,015	0,100	2	3	3	0,008	0,090
0	3	4	0,003	0,002	1	3	4	0,004	0,005	2	3	4	0,003	0,001
0	3	4	0,003	0,003	1	3	4	0,002	0,002	2	3	4	0,003	0,002
0	7	1	0,032	0,049	1	7	1	0,033	0,059	2	7	1	0,040	0,075
0	7	1	0,037	0,057	1	7	1	0,035	0,056	2	7	1	0,044	0,059
0	7	2	0,058	0,050	1	7	2	0,061	0,051	2	7	2	0,064	0,052
0	7	2	0,048	0,048	1	7	2	0,064	0,048	2	7	2	0,059	0,048
0	7	3	0,011	0,088	1	7	3	0,012	0,075	2	7	3	0,005	0,089
0	7	3	0,009	0,073	1	7	3	0,015	0,074	2	7	3	0,006	0,073
0	7	4	0,002	0,001	1	7	4	0,004	0,004	2	7	4	0,001	0,003
0	7	4	0,004	0,001	1	7	4	0,002	0,001	2	7	4	0,003	0,001
0	28	1	0,024	0,055	1	28	1	0,038	0,058	2	28	1	0,056	0,081
0	28	1	0,026	0,047	1	28	1	0,041	0,054	2	28	1	0,052	0,057
0	28	2	0,048	0,055	1	28	2	0,054	0,048	2	28	2	0,046	0,069
0	28	2	0,044	0,048	1	28	2	0,050	0,050	2	28	2	0,049	0,058
0	28	3	0,009	0,070	1	28	3	0,006	0,057	2	28	3	0,003	0,065
0	28	3	0,012	0,065	1	28	3	0,006	0,067	2	28	3	0,004	0,062
0	28	4	0,006	0,002	1	28	4	0,005	0,002	2	28	4	0,003	0,002
0	28	4	0,006	0,002	1	28	4	0,005	0,003	2	28	4	0,003	0,006

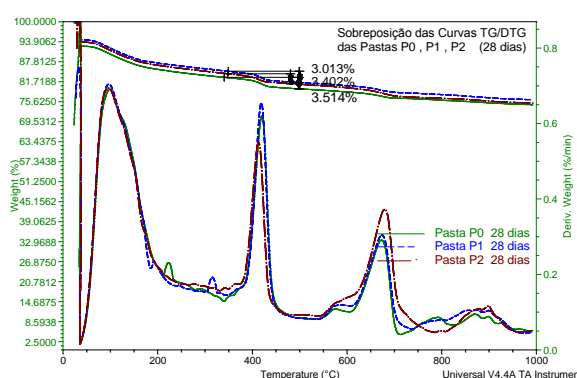
ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA



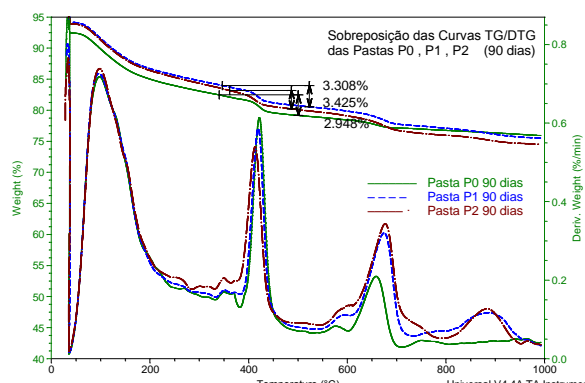
(a) 3 dia



(b) 7 dias

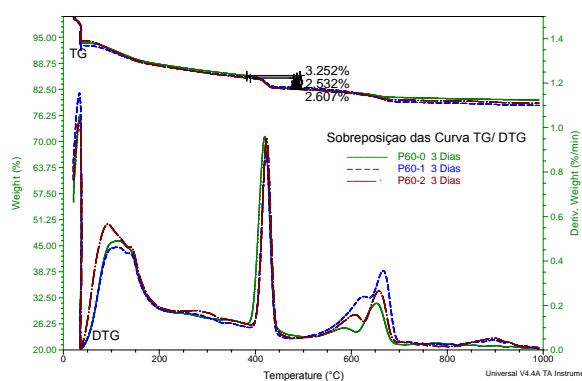


(c) 28 dias

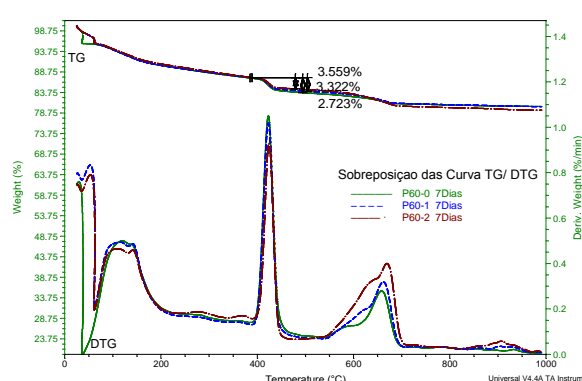


(d) 90 dias

Figura 117 – Curvas TG e DTG da pasta P80, com 0, 1 e 2% de ARR, nas idades de 3 dias (a), 7 dias (b), 28 dias (c) e 90 dias (d)



(a) 3 dias



(b) 7 dias

Figura 118 – Curvas TG e DTG da pasta P60, com 0, 1 e 2% de ARR, nas idades de 3 dias (a), 7 dias (b)

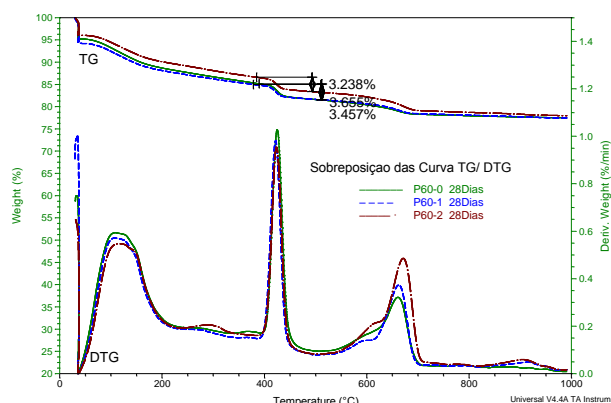


Figura 119 – Curvas TG e DTG da pasta P60, com 0, 1 e 2% de ARR, na idade de 28 dias

Tabela 54 – Perdas de massa de água e por decomposição do carbonato de cálcio e teores de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio obtidas por análise termogravimétrica

Materiais	Idade (dias)	Perdas de massa referentes à massa calcinada do cimento				Teores de CH e CaCO ₃ ⁽¹⁾	
		Perda de água total combinada total (%)	Perda de água do CSH + Aft + Alum + AFm (%)	Perda de água do CH (%)	Decomposição do CaCO ₃ (%)	% CH	% CaCO ₃
Cimento						1,73	5,57
P60_0	1	9,55	6,67	2,88	2,38	11,82	5,42
	3	14,69	10,36	4,33	0,72	17,81	1,64
	7	15,88	11,09	4,79	1,44	19,70	3,28
	28	18,15	13,53	4,62	2,47	19,01	5,60
P60_1	90	17,08	12,31	4,78	0,00	19,63	0,00
	1	11,09	7,79	3,30	1,45	13,55	3,30
	3	13,43	10,31	3,13	3,12	12,85	7,09
	7	15,28	10,97	4,30	2,12	17,70	4,83
P60_2	28	16,66	12,41	4,25	2,29	17,48	5,21
	90	17,08	13,36	3,72	1,64	15,30	3,72
	1	7,55	5,53	2,02	2,10	8,31	4,77
	3	15,59	12,15	3,43	1,50	14,11	3,41
P80_0	7	14,76	11,27	3,49	3,83	14,35	8,70
	28	16,78	12,48	4,30	3,68	17,69	8,36
	90	16,10	12,83	3,27	2,73	13,46	6,22
	1	12,74	9,87	2,87	3,13	11,79	7,11
P80_1	3	16,73	12,80	3,93	0,69	16,16	1,58
	7	18,08	13,89	4,20	2,11	17,25	4,79
	28	18,68	13,95	4,73	1,97	19,45	4,47
	90	18,51	14,73	3,78	0,92	15,56	2,08
P80_2	1	11,33	8,70	2,63	3,49	10,81	7,92
	3	16,29	12,46	3,84	2,43	15,78	5,52
	7	18,10	13,52	4,58	2,30	18,82	5,24
	28	18,17	13,34	4,83	2,47	19,85	5,60
P80_2	90	18,94	14,64	4,30	2,53	17,67	5,75
	1	11,11	8,69	2,42	4,35	9,95	9,90
	3	15,81	12,22	3,59	4,02	14,78	9,15
	7	19,32	14,75	4,57	3,76	18,80	8,56
P80_2	28	18,10	14,25	3,85	4,28	15,84	9,74
	90	19,72	15,22	4,50	4,04	18,49	9,19

Nota⁽¹⁾: Durante o aquecimento das amostras, o hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂] perde água (desidrata) e o carbonato de cálcio [CaCO₃] perde dióxido de carbono - CO₂ (descarbonata). Estas perdas têm uma proporção determinada por estequiometria: para 100% de hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂] perde-se 24,32% de água; para 100% de carbonato de cálcio [CaCO₃] perde-se 44,01% de dióxido de carbono. Então, a partir da quantidade de água e gás que as amostras perderam, por regra de três, determina-se a quantidade dos compostos na amostra.

DIFRAÇÃO DE RAIOS X

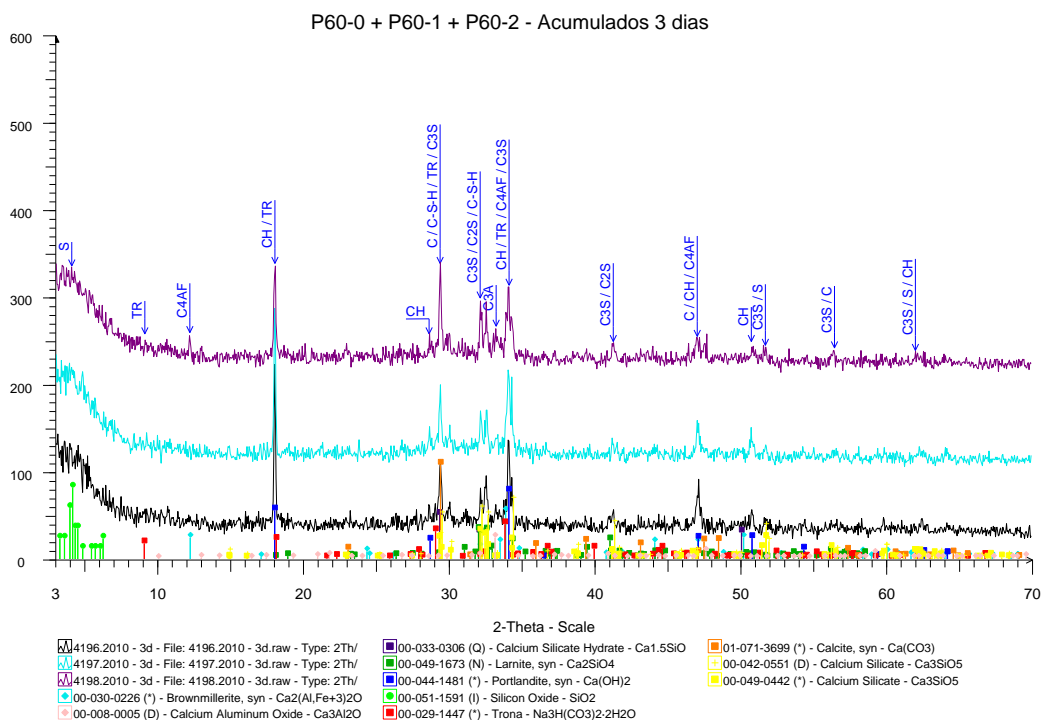


Figura 120 – Difratoograma da pasta P60 aos 3 dias de idade: efeito do aditivo redutor de retração – ARR

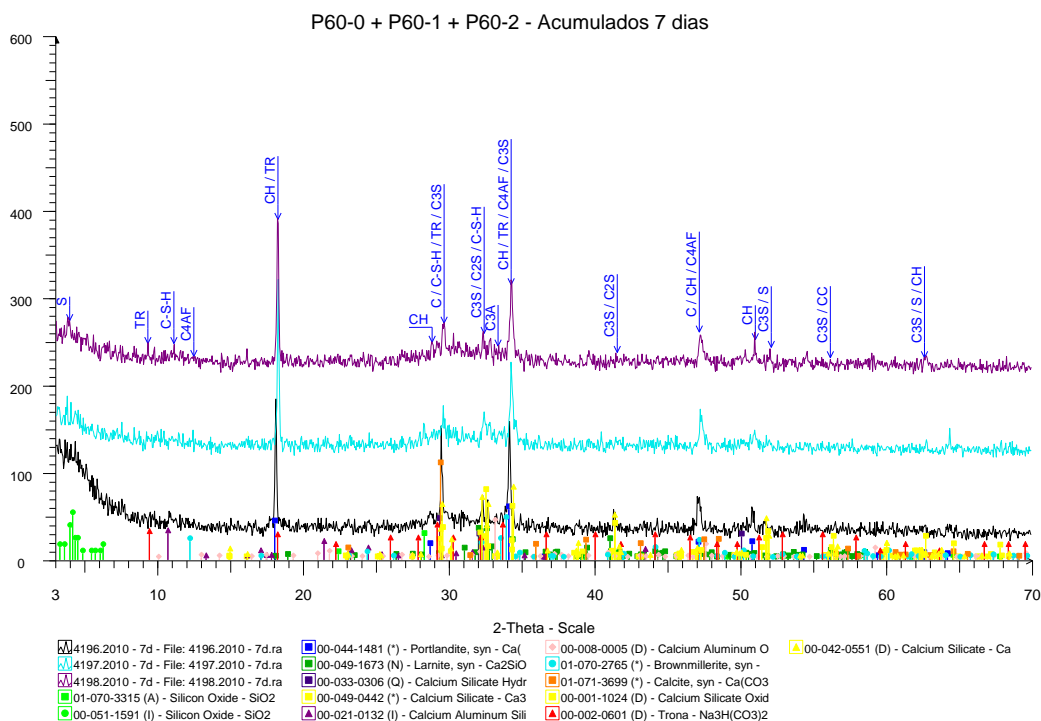


Figura 121 – Difratoograma da pasta P60 aos 7 dias de idade: efeito do aditivo redutor de retração – ARR

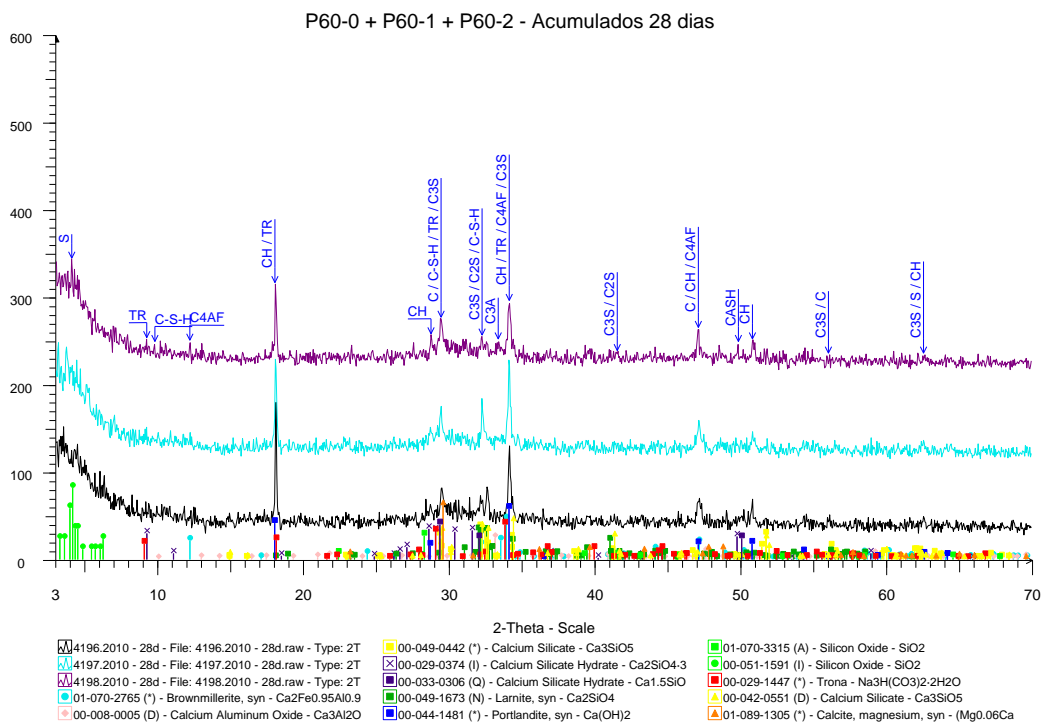


Figura 122 – Difratoograma da pasta P60 aos 28 dias de idade: efeito do aditivo redutor de retração – ARR

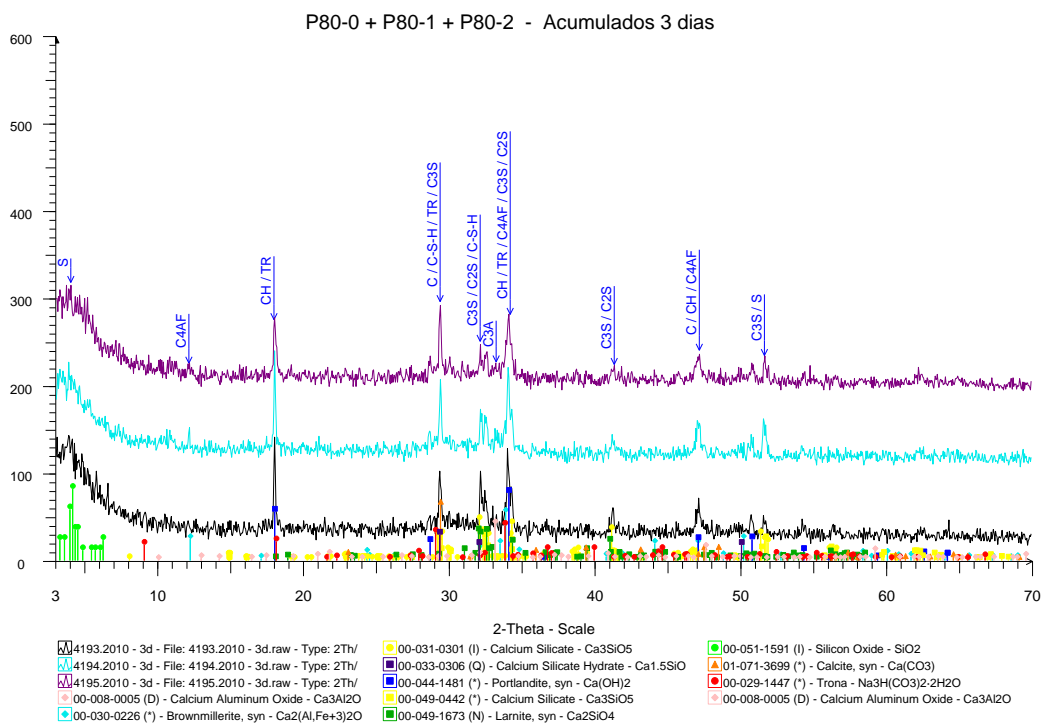


Figura 123 – Difratoograma da pasta P80 aos 3 dias de idade: efeito do aditivo redutor de retração – ARR

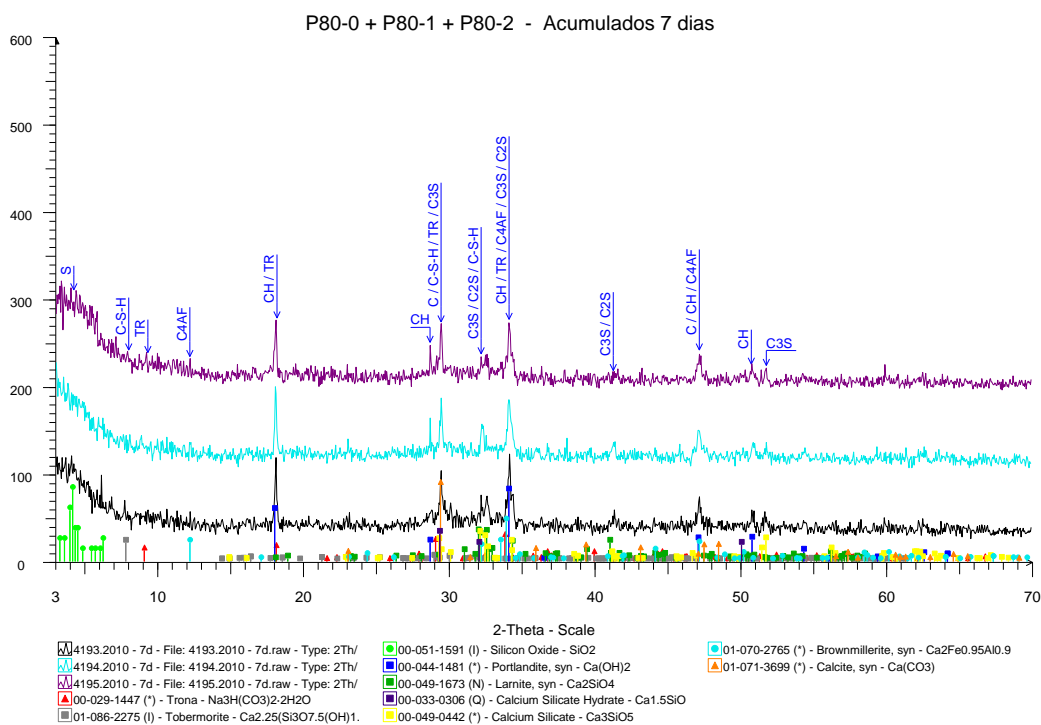


Figura 124 – Difratoograma da pasta P80 aos 7 dias de idade: efeito do aditivo redutor de retração – ARR

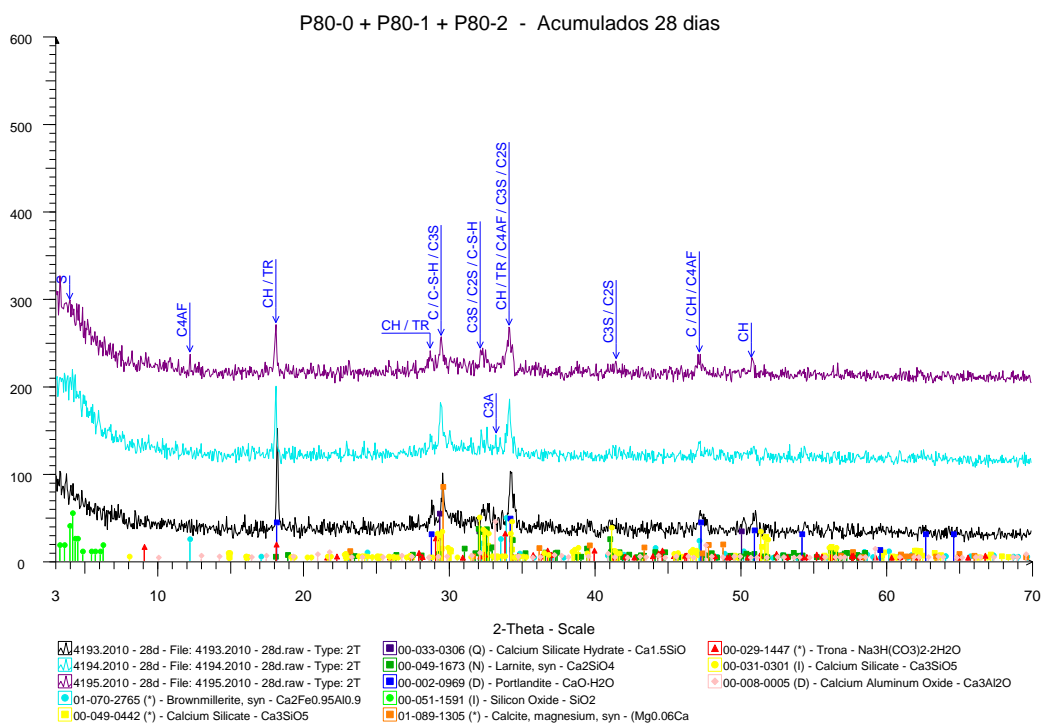


Figura 125 – Difratoograma da pasta P80 aos 28 dias de idade: efeito do aditivo redutor de retração – ARR

Não é preciso consenso

nem arte,

nem beleza ou idade;

a vida é sempre dentro

e agora.

(A vida é minha

para ser ousada)

A vida pode florescer

numa existência inteira.

Mas tem de ser buscada, tem de ser

conquistada.

Lya Luft