

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Johanna Gabriella Roos Coliante

**CURA TÉRMICA EM ARGAMASSAS DE CONCRETO DE
ALTO DESEMPENHO: CARACTERIZAÇÃO DA
MICROESTRUTURA E DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

Porto Alegre
novembro 2013

JOHANNA GABRIELLA ROOS COLIANTE

**CURA TÉRMICA EM ARGAMASSAS DE CONCRETO DE
ALTO DESEMPENHO: CARACTERIZAÇÃO DA
MICROESTRUTURA E DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Carlos Pérez Bergmann
Coorientador: Antonio Pedro Viero

Porto Alegre
novembro 2013

JOHANNA GABRIELLA ROOS COLIANTE

**CURA TÉRMICA EM ARGAMASSAS DE CONCRETO DE
ALTO DESEMPENHO: CARACTERIZAÇÃO DA
MICROESTRUTURA E DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 27 de novembro de 2013

Prof. Carlos Pérez Bergmann
Dr. Ing.pela Universidade Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Eng. Alexandre Lorenzi (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Fernando Antônio Piazza Recena (PUCRS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Carlos Pérez Bergmann (UFRGS)
Dr. pela Universidade Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen

Dedico este trabalho a Deus, pela sua fidelidade e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo infinito amor e misericórdia, por ter me abençoado todos os dias em que estava confusa, alegre, cansada, desmotivada, trazendo o Espírito Santo com a motivação e a inspiração necessária para enfrentar todas as barreiras que foram impostas. Obrigada, Senhor por estar sempre no controle de tudo e por me guiar no caminho da verdade. Concedo a Ti toda a honra, a glória e a vitória, pois sem o Senhor, não teria chegado até aqui.

Agradeço aos meus pais, que sempre investiram e incentivaram o meu crescimento profissional, nos momentos mais difíceis, eles nunca desistiram de lutar por mim, para que eu tivesse uma educação de qualidade. Todas as vezes que pensei em desistir, eles estavam lá, firmes, ao meu lado, me dando todo o suporte necessário.

Agradeço ao meu namorado, Michel, que durante toda essa caminhada esteve comigo, entendendo a importância da dedicação do tempo para esse curso e abrindo mão dos nossos momentos juntos, para que eu pudesse estar envolvida com as atividades estudantis.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Bergmann, pela confiança em mim, pela paciência em sempre estar à disposição e pela segurança, que sempre me fez seguir em frente.

Agradeço ao meu coorientador, Prof. Vieiro, pelo acompanhamento e pela sua experiência.

Agradeço a equipe do LEME, em especial, a Luciane Caetano e ao Luiz Carlos, que me receberam na iniciação científica e me influenciaram, indiretamente, na escolha desse trabalho.

Agradeço a equipe do NORIE, em especial, a Ângela Masuero, que me disponibilizou a infraestrutura do laboratório e pela atenção; ao Abrahão Rohden, pelos debates a respeito do tema do trabalho e pela disponibilidade em me ajudar; aos laboratoristas Gilmar e Airton pela paciência e auxílio nos ensaios.

Agradeço a empresa Melnick Even, em especial, ao Eng. Ernani Magalhães, que me recebeu com toda a paciência e dedicação em sua equipe; a Eng. Viviane Minuzzi, que foi mais que uma chefe, mas sim uma conselheira e amiga; ao Eng. Diogo Fernandes, pelas oportunidades de crescimento e pela confiança no meu trabalho, a toda equipe da obra Ária e Ponta da Figueira e a todos os meus amigos, que sempre torceram pelo meu sucesso.

Porque o Senhor dá a sabedoria; da sua boca é que vem o
conhecimento e o entendimento.
Provérbios 2:6

RESUMO

O desenvolvimento de novas tecnologias na construção civil tem como objetivo aumentar a vida útil dos empreendimentos, melhorando as propriedades dos elementos empregados nos materiais de construção. O emprego de concretos de alto desempenho, no Brasil, é considerado recente quando comparado à utilização do concreto convencional e, por essa razão, é de fundamental importância aprofundar o conhecimento sobre esse tipo de material. Este trabalho versa sobre a análise microestrutural de argamassas de concreto de alto desempenho, quando submetidas à cura térmica, e a determinação da resistência à compressão pela moldagem de corpos de prova à luz da norma NBR 7215/1997. Foram moldados corpos de prova cilíndricos, de dimensões 50 mm x 100 mm, em três traços, sendo eles com relação a/a 0,30; 0,45; 0,55, nos tempos de cura de 3, 7 e 28 dias submetidos à cura térmica a 60 °C e à cura úmida. O método utilizado para análise qualitativa das fases formadas e da configuração microestrutural, foi a microscopia eletrônica de varredura (MEV), no modo ES (elétrons secundários) e EDS (elétrons retrofundidos). Para a análise quantitativa, foi realizada adsorção física com nitrogênio, através do método BJH (Barrett-Joyner-Halenda), que forneceu a distribuição e o tamanho de poros nas amostras já submetidas à compressão. Pelos resultados obtidos, verifica-se que o tipo e o tempo de cura influenciam no comportamento da resistência à compressão das argamassas, assim como no tamanho de poros formados, modificando também o tamanho e organização microestrutural dos cristais decorrentes do processo de hidratação. Aos 28 dias de cura térmica, os três proporcionamentos apresentaram queda no valor da resistência mecânica e aumento do diâmetro dos poros, ao passo que, aos 3 dias de cura térmica, apresentavam poros com tamanho menor.

Palavras-chave: Argamassas de Concreto de Alto Desempenho. Cura térmica a 60°C.
Adsorção física com nitrogênio em argamassas.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Diagrama esquemático do delineamento da pesquisa..... | 22 |
| Figura 2 – Efeito filler nas pastas de cimento hidratadas..... | 26 |
| Figura 3 – Representação esquemática da microestrutura de duas pastas com relação água/ aglomerante de 0,65 e 0,25..... | 29 |
| Figura 4 – Diagrama esquemático das argamassas sem sílica ativa e com sílica ativa..... | 37 |
| Figura 5 – Consistência da argamassa a) traço 1 – 2ª medida = 260 mm b) traço 3 – 3ª medida = 270 mm..... | 45 |
| Figura 6 – Curva granulométrica da sílica ativa utilizada..... | 48 |
| Figura 7 – Curva granulométrica do agregado 1..... | 49 |
| Figura 8 – Curva granulométrica do agregado 2..... | 50 |
| Figura 9 – Aditivo superplastificante adicionado na mistura no período de velocidade alta..... | 52 |
| Figura 10 – Corpos de prova em cura úmida..... | 53 |
| Figura 11 – Corpos de prova em cura térmica..... | 53 |
| Figura 12 – Ciclo de temperatura utilizado..... | 54 |
| Figura 13 – Base do corpo de prova retificado..... | 54 |
| Figura 14 – Ruptura do corpo de prova..... | 55 |
| Figura 15 – Fragmentos da unidade teste embebidos de álcool..... | 55 |
| Figura 16 – Representação esquemática da configuração de detecção gerada pelo MEV e a amostra..... | 56 |
| Figura 17 – Amostras metalizadas com ouro..... | 57 |
| Figura 18 – Microscópio eletrônico JSM 5800..... | 57 |
| Figura 19 – Processo de adsorção física e sua isoterma..... | 58 |
| Figura 20 – Classificação das histereses segundo De Boer adaptado pela IUPAC..... | 59 |
| Figura 21 – Tipos de isoterma..... | 60 |
| Figura 22 – Imagem em modo EDS da amostra T1 – Cura úmida (3 dias)..... | 74 |
| Figura 23 – Espectros de raios-X da amostra T1 – Cura úmida (3 dias)..... | 74 |
| Figura 24 – Imagem em ES da amostra T1 – Cura térmica (3 dias)..... | 75 |
| Figura 25 – Imagem em ES da amostra T1 – Cura térmica (3 dias)..... | 75 |
| Figura 26 – Imagem no modo ES da amostra T2 – Cura térmica (3 dias)..... | 76 |
| Figura 27 – Imagem no modo ES da amostra T2 – Cura úmida (3 dias)..... | 76 |
| Figura 28 – Imagem em EDS da amostra T3 – Cura úmida (3 dias)..... | 77 |
| Figura 29 – Espectros de raios-X da amostra T3 – Cura úmida (3 dias)..... | 77 |

| | |
|---|----|
| Figura 30 – Imagem em ES da amostra T3 – Cura térmica (3 dias)..... | 78 |
| Figura 31 – Imagem no modo ES da amostra T2 – Cura úmida (28 dias)..... | 78 |
| Figura 32 – Imagem no modo ES da amostra T2 – Cura térmica (28 dias)..... | 79 |
| Figura 33 – Imagem no modo ES da amostra T1 – Cura térmica (28 dias)..... | 79 |
| Figura 34 – Imagem em EDS da amostra T1 – Cura úmida (28 dias) e elementos químicos em cada ponto..... | 80 |
| Figura 35 – Espectros de raios-X da amostra T1 – Cura úmida (28 dias)..... | 80 |
| Figura 36 – Imagem no modo ES da amostra T3 – Cura úmida (28 dias)..... | 81 |
| Figura 37 – Imagem em ES da amostra T3 – Cura térmica (28 dias)..... | 81 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Dosagem em massa (g) dos três traços de argamassas pelo Método Mehta/Aïtcin..... | 45 |
| Quadro 2 – Determinação da quantidade de aditivo para cada traço..... | 45 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 – Resistência à compressão média em cura úmida aos 3, 7 e 28 dias..... | 62 |
| Gráfico 2 – Resistência à compressão média em cura térmica aos 3, 7 e 28 dias..... | 63 |
| Gráfico 3 – Ganho de resistência à compressão dos três proporcionamentos..... | 63 |
| Gráfico 4 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T1 – 3 dias – Cura térmica..... | 65 |
| Gráfico 5 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T1 – 3 dias – Cura úmida..... | 65 |
| Gráfico 6 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T1 – 28 dias – Cura térmica..... | 65 |
| Gráfico 7 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T1 – 28 dias – Cura úmida..... | 66 |
| Gráfico 8 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T2 – 3 dias – Cura úmida..... | 66 |
| Gráfico 9 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T2 – 3 dias – Cura térmica..... | 66 |
| Gráfico 10 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T2 – 28 dias – Cura térmica..... | 67 |
| Gráfico 11 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T2 – 28 dias – Cura úmida..... | 67 |
| Gráfico 12 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T3 – 3 dias – Cura térmica..... | 67 |
| Gráfico 13 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T3 – 3 dias – Cura úmida..... | 68 |
| Gráfico 14 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T3 – 28 dias – Cura térmica..... | 68 |
| Gráfico 15 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T3 – 28 dias – Cura úmida..... | 68 |
| Gráfico 16 – Ganho de resistência da cura térmica em comparação a cura úmida..... | 69 |
| Gráfico 17 – Ganho do tamanho do poro em cura térmica em comparação com a cura úmida..... | 69 |
| Gráfico 18 – Isoterma T1 – 3D – Cura térmica..... | 70 |
| Gráfico 19 – Isoterma T1 – 3D – Cura úmida..... | 70 |
| Gráfico 20 – Isoterma T1 – 28D – Cura térmica..... | 71 |
| Gráfico 21 – Isoterma T1 – 28D – Cura úmida..... | 71 |
| Gráfico 22 – Isoterma T2 – 3D – Cura térmica..... | 71 |
| Gráfico 23 – Isoterma T2 – 3D – Cura úmida..... | 71 |
| Gráfico 24 – Isoterma T2 – 28D – Cura térmica..... | 72 |

| | |
|--|----|
| Gráfico 25 – Isoterma T2 – 28D – Cura úmida..... | 72 |
| Gráfico 26 – Isoterma T3 – 3D – Cura térmica..... | 72 |
| Gráfico 27 – Isoterma T3 – 3D – Cura úmida..... | 72 |
| Gráfico 28 – Isoterma T3 – 28D – Cura térmica..... | 73 |
| Gráfico 29 – Isoterma T3 – 28D – Cura úmida..... | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Características químicas do cimento CP V ARI-RS empregado..... | 47 |
| Tabela 2 – Características físicas e mecânicas do cimento CP V ARI-RS empregado.... | 47 |
| Tabela 3 – Composição granulométrica resumida da sílica ativa..... | 47 |
| Tabela 4 – Caracterização física do agregado 1..... | 49 |
| Tabela 5 – Composição granulométrica resumida do agregado 2..... | 50 |
| Tabela 6 – Área superficial, volume do poro, raio e diâmetro médio das amostras..... | 64 |
| Tabela 7 – Classificação do tamanho de poros conforme diâmetro..... | 69 |

LISTA DE SIGLAS

BJH – Barrett-Joyner-Halenda

CAD – Concretos de Alto Desempenho

CME – Centro de Microscopia Eletrônica

CPV-ARI – Cimento Portland Tipo V de Alta Resistência Inicial

ES – Elétrons Secundários

EDS – Elétrons Retrofundidos

IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry

Lacer – Laboratório de Materiais Cerâmicos

LAMTAC – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

C-S-H – silicato de cálcio hidratado

$C_6AS_3H_{32}$ – sulfoaluminato de cálcio ou etringita

C-H – hidróxido de cálcio

β – compacidade virtual de empacotamento

C_2S – silicato dicálcico

AFt – fase etringita

AFm – fase monossulfato hidratado

C_3ACSH_{12} – monossulfoaluminato hidratado

a/a – relação água/ aglomerante

a/c – relação água/ cimento

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 2 DIRETRIZES DA PESQUISA | 20 |
| 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA | 20 |
| 2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA..... | 20 |
| 2.2.1 Objetivo principal | 20 |
| 2.2.2 Objetivos secundários | 20 |
| 2.3 HIPÓTESE | 21 |
| 2.4 PRESSUPOSTO | 21 |
| 2.5 DELIMITAÇÕES | 21 |
| 2.6 LIMITAÇÕES..... | 21 |
| 2.7 DELINEAMENTO | 22 |
| 3. ESTRUTURA DO CONCRETO | 24 |
| 4. FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO | 28 |
| 4.1 RELAÇÃO ÁGUA/ AGLOMERANTE..... | 28 |
| 4.2 VOLUME DE VAZIOS..... | 30 |
| 4.3 TIPO DE CURA..... | 32 |
| 4.4 ADIÇÕES MINERAIS..... | 35 |
| 4.5 ADITIVOS QUÍMICOS..... | 37 |
| 5 EFEITO DA TEMPERATURA DE CURA NA MICROESTRUTURA DOS CONCRETOS | 40 |
| 6 PROGRAMA EXPERIMENTAL | 40 |
| 6.1 ELABORAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 40 |
| 6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS..... | 42 |
| 6.2.1 Cimento | 46 |
| 6.2.2 Sílica ativa | 47 |
| 6.2.3 Agregado miúdo | 48 |
| 6.2.4 Aditivo superplastificante | 51 |
| 6.3 METODOLOGIA..... | 51 |
| 6.3.1 Moldagem dos corpos de prova | 51 |
| 6.3.2 Tipos de cura | 52 |
| 6.3.3 Resistência mecânica à compressão | 54 |
| 6.3.4 Microscopia eletrônica de varredura | 56 |

| | |
|--|-----------|
| 6.3.5 Adsorção física..... | 57 |
| 7 ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 62 |
| 7.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO..... | 62 |
| 7.2 ADSORÇÃO FÍSICA..... | 65 |
| 7.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA..... | 74 |
| 8 CONCLUSÕES..... | 83 |
| REFERÊNCIAS..... | 85 |
| APÊNDICE A..... | 90 |

1 INTRODUÇÃO

O concreto de alto desempenho (CAD) é definido como um concreto com elevada resistência mecânica e alta durabilidade, devida às baixas relações água/cimento. Conforme a definição de Aïtcin (2003, p. [409], tradução nossa), “Uma vez que não existe qualquer definição mais simples para o material conhecido como CAD, é preferível definir como um concreto com baixa relação água/aglomerante [...]”.

Considera-se concreto de alto desempenho aqueles que apresentam resistência mecânica acima de 35 MPa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND¹, 1996 apud SILVA, I. J. da, 2000, p. 13). Em Chicago, 1965, nos pilares da Lake Point Tower, foi utilizado concreto com resistência de 65 MPa. Enquanto que, no Brasil, em 1969, foi construído o Museu de Arte de São Paulo com resistência de 45 MPa, sendo a resistência do concreto considerada recorde na época (SILVA, M. R., 1994, p. 406).

A cura do concreto é um procedimento fundamental para que seja assegurada a hidratação do cimento e, conseqüentemente, o melhor desempenho do concreto, reduzindo a porosidade e contribuindo para o aumento da resistência mecânica. Dentre os tipos de cura utilizados, a cura térmica no vapor à pressão atmosférica tem como objetivo tornar esse processo mais rápido, obtendo resistências mecânicas desejadas em um curto período de tempo (BARDELLA et al., 2006, p. 1415).

Em estudos de concretos produzidos com sílica ativa e curados em temperatura de 60°C, foi concluído por Bardella et al. (2007, p. 11), que “Na cura ao ar, a resistência à compressão foi de aproximadamente 8% superior à resistência obtida pela cura térmica [...]”. Isso ocorre porque em idades avançadas, percebe-se uma diminuição da resistência à compressão em concretos de alto desempenho que utilizaram cura térmica, demonstrando que o tipo e a idade de cura influenciam nas propriedades mecânicas dos concretos com sílica ativa.

O entendimento do comportamento dos concretos de alta resistência se justifica pelo aumento de edificações de grandes alturas, nas quais se tem por objetivo diminuir seções de elementos estruturais em função da estética, funcionalidade e viabilidade de cada empreendimento desse

¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo, 1996.

porte. A agilidade na desforma e a diminuição do tempo de uso de escoramento torna interessante o uso de concreto de alto desempenho utilizando cura térmica. Além de possibilitar altas resistências em pouco tempo, o uso dessa tecnologia otimiza o cronograma de obra, tornando-se uma opção para a redução do período de construção da obra em construções *in loco* de pontes, pavimentos, e na produção de elementos pré-moldados, entre outras obras que demandam rapidez e agilidade de execução.

Os parâmetros empregados no processo de produção de CAD influenciam a microestrutura que esses materiais apresentam em sua vida útil, definindo seu conjunto de propriedades de interesse tecnológico e seu desempenho em serviço. Portanto, o conhecimento da relação entre esses parâmetros, microestrutura e propriedades mecânicas é de fundamental importância no desenvolvimento tecnológico dos CAD. É nesse contexto que se insere este trabalho.

O trabalho está dividido em oito capítulos, sendo o primeiro capítulo, a introdução. O segundo capítulo contém as diretrizes da pesquisa, composto pelos objetivos principal e secundário, questão de pesquisa, hipótese, delimitação, limitação e delineamento. O terceiro capítulo abordou a caracterização da estrutura do concreto e as fases presentes. O quarto capítulo apresentou os fatores que influenciam na resistência mecânica nos concretos de alto desempenho. No quinto capítulo, o efeito da temperatura de cura foi observado na microestrutura dos concretos, assim como, sua ação nas pastas de cimentos, finalizando a revisão bibliográfica.

O programa experimental, juntamente com a caracterização dos materiais utilizados e a metodologia aplicada foi apresentado no capítulo seis. No capítulo sete, foram apresentados os resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão, adsorção física com nitrogênio e as análises realizadas no microscópio eletrônico de varredura. No capítulo oito, as considerações finais e sugestões de pesquisas futuras são apresentadas.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual o motivo da diminuição da resistência à compressão, com o aumento do tempo de cura térmica, em argamassas de concreto de alto desempenho expostos a esse tipo de cura?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho foi a verificação das causas da diminuição da resistência à compressão, em função do aumento do tempo de cura térmica, das argamassas de concreto de alto desempenho estudadas.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho foram:

- a) apresentação da distribuição e do tamanho dos poros formados em cada idade de cura e sua influência com a resistência à compressão;
- b) descrição das fases presentes e da formação dos compostos de hidratação do cimento por meio de microanálises;

- c) apresentação da resistência à compressão das argamassas de concreto de alto desempenho estudadas em função do tempo de cura térmica as quais foram expostas.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho foi que as argamassas de concreto de alto desempenho expostas à cura térmica diminuem seus valores de resistência à compressão, em função do aumento do tempo de cura, pela formação de uma estrutura mais porosa e menos homogênea, ao se comparar às características das argamassas expostas a cura úmida.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho teve por pressuposto que os procedimentos para os ensaios dos corpos de prova são válidos para a determinação da resistência mecânica em argamassas de cimento Portland, conforme descritos na norma NBR 7215/1997, sendo de grande importância, a compreensão das causas da redução da resistência à compressão dessas argamassas para entendimento desse mesmo fenômeno que ocorre nos concretos de alto desempenho.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimitou-se a compreender o comportamento da resistência mecânica à compressão em argamassas de concreto de alto desempenho através de ensaios mecânicos e de microanálises.

2.6 LIMITAÇÕES

Foram limitações do trabalho:

- a) os corpos de prova, submetidos aos ensaios de resistência à compressão, foram moldados e curados em condições de laboratório;
- b) as dimensões dos corpos de prova são 50 mm x 100 mm;

- c) quatro traços de argamassas foram moldados, sendo que todos com as mesmas proporções de sílica ativa e de agregado miúdo;
- d) a temperatura de cura térmica foi mantida a mesma para as três idades de cura;
- e) foram moldados seis corpos de prova da mesma argamassada, para cada traço.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das seguintes etapas, apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do programa experimental;
- c) moldagens dos corpos de prova;
- d) ensaio de resistência mecânica à compressão;
- e) análise da microestrutura;
- f) estudo com ultrassom;
- g) análise e interpretação dos resultados;
- h) apresentação dos resultados e conclusões.

Figura 1 – Diagrama esquemático do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

A etapa de pesquisa bibliográfica consistiu em consultas a artigos, dissertações, teses e demais trabalhos acadêmicos para aprofundar o conhecimento no tema a ser pesquisado e para a coleta de informações sobre como está sendo abordado esse assunto nas pesquisas desenvolvidas nos últimos tempos. Essa etapa se desenvolveu ao longo de todo o trabalho, sendo mais intensa nos meses iniciais, e serviu de embasamento na elaboração de uma hipótese consistente.

Na elaboração do programa experimental foram definidos os traços das argamassas a serem moldadas, assim como as dimensões dos corpos de prova, a escolha da norma a ser aplicada, os tipos de cura, o número de unidades de teste e as idades de cura a serem expostos os corpos de prova e, logo após, foi realizada a moldagens dos corpos de prova definidos anteriormente. Com o plano experimental definido, foram realizadas as moldagens e cura dos corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão. Esses ensaios foram realizados conforme a NBR 7215/1997, a qual descreve os processos para a produção dos corpos de prova, indicando tempo de mistura e equipamentos para moldagem.

A análise da microestrutura foi realizada com o apoio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), para avaliação da morfologia e distribuição de fases presentes, incluindo a visualização dos produtos de hidratação em cada idade de cura ensaiada. A avaliação da porosidade, pela determinação do tamanho e da distribuição de tamanho dos poros, foi realizada por adsorção física com nitrogênio.

A quarta etapa compreendeu a análise e a interpretação dos resultados dos ensaios, relacionando os valores de resistência mecânica com as propriedades da microestrutura e os tipos de cura as quais as argamassas foram submetidas.

A apresentação dos resultados e conclusões consistiu na última etapa do trabalho. Aqui foram apresentados os resultados e conclusões a respeito das causas da diminuição da resistência à compressão nas argamassas expostas à cura térmica, em função do aumento do tempo de cura, relacionando-os às características microestruturais. Por fim, foram sugeridos trabalhos futuros para um aprofundamento da compreensão dos fenômenos abordados neste trabalho.

3 ESTRUTURA DO CONCRETO

O concreto é um material com uma estrutura heterogênea e complexa, composto por três fases bem definidas: pasta endurecida, agregado e zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. Para análise do comportamento mecânico, o concreto deve ser visto como um material compósito, ou seja, uma combinação tridimensional de, pelo menos, dois materiais distintos química e mecanicamente, com uma interface de separação definida entre esses componentes. Este material multifásico tem propriedades distintas das propriedades dos componentes originais (RAMACHANDRAN; FELDMAN, 1996).

Nos concretos convencionais, a fase pasta endurecida é composta pela pasta de cimento Portland, além de quatro tipos de fases sólidas:

- a) silicato de cálcio hidratado (C-S-H), conhecido como gel de tobermorita, que constitui de 50% a 60% da pasta;
- b) hidróxido de cálcio ou portlandita (Ca(OH)_2), de 20% a 25% do volume da pasta;
- c) sulfoaluminato de cálcio ou etringita ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$), de 15% a 20% da pasta;
- d) grãos de clínquer não hidratado;
- e) poros.

A fase agregado é composta pelo agregado graúdo e, geralmente, é mais resistente que as outras duas fases, sendo responsável pela estabilidade adimensional do concreto. A zona de transição é a região localizada entre matriz da pasta de cimento e o agregado, sendo considerada a fase de resistência limite no concreto, pela presença de um grande volume de vazios capilares e microfissuras. Sua função é servir de ponte entre a argamassa matriz e as partículas de agregado graúdo (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Segundo Ramachandran e Feldman (1996), as propriedades da pasta de cimento são determinadas pela natureza química e pela microestrutura, sendo a última, constituída por duas fases, a de corpo sólido e a porção não sólida, chamada de estrutura porosa. O desenvolvimento microestrutural é dependente de fatores, como:

- a) natureza química e física do cimento;

- b) o tipo e a quantidade de aditivo;
- c) a temperatura e o período de hidratação;
- d) a relação água/ cimento inicial.

No estudo da fase sólida, são analisadas a morfologia (forma e tamanho), a ligação das superfícies e a densidade. Para o estudo da fase não sólida, é necessário investigar a porosidade, a forma dos poros e a análise de distribuição e dimensão dos poros. Muitas das propriedades são interdependentes e uma dessas propriedades, analisada isoladamente, não explica adequadamente as características físico-mecânicas das pastas de cimento (RAMACHANDRAN; FELDMAN, 1996).

Os concretos de alto desempenho, CAD, são caracterizados pelas baixas relações água/aglomerante e resistências mecânicas acima de 35 MPa, conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland² (1996 apud SILVA, I. J. da, 2000, p. 13). Na produção desse tipo de concreto, é indispensável o uso de aditivos químicos, para otimizar os efeitos do baixo fator a/a na consistência desse material, e de adições minerais, como a sílica ativa. Comparado com o concreto convencional, o CAD é um material mais homogêneo e menos poroso (SARKAR; AİTCIN, 1987b).

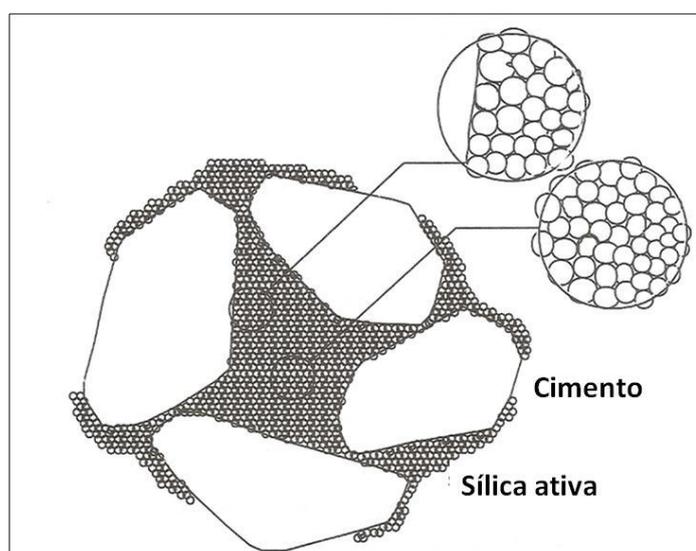
Além das fases formadas nos concretos convencionais, há uma interação entre o cimento Portland e a sílica ativa. A primeira etapa dessa interação é representada por uma hidratação ativa, dissolução e consumo de todas as partículas de sílica ativa (na reação com C-H), esgotamento progressivo de C-H e rápido aumento na resistência mecânica. Em uma segunda etapa, o sistema torna-se ainda mais denso devido ao rearranjo do C-S-H. A conversão de poros maiores em menores, como resultado de uma reação pozolânica, desempenha um papel importante no aumento da resistência mecânica (SARKAR; AİTCIN, 1987b).

Aİtcin (2000) comprovou, através de microanálises, que os produtos de hidratação inicial consistem de cristais compostos por flocos grandes, devido à existência de muita água e de espaços vazios no sistema, ocasionando um volume de vazios considerável. Os produtos externos se cristalizam fora das partículas de cimento e os internos, são produtos da reação de estado sólido, dentro dos limites das partículas de cimento, sendo mais compactos e

² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo, 1996.

crystalinos. Quanto mais compactos esses produtos, ou seja, livre de poros grandes, e menos cristalinos, maior é a resistência mecânica, em virtude do caminho da ruptura ser feito através dos produtos externos de hidratação. Com relação às adições minerais, a sílica ativa gera efeitos benéficos na microestrutura devido à sua finura, preenchendo os vazios entre as partículas maiores de cimento. Além disso, ocorre o efeito *filler*, devido à diminuição da porosidade do sistema com o preenchimento dos vazios e dos poros capilares, resultando em um sistema com maior empacotamento de partículas, conforme figura 2.

Figura 2 – Efeito *filler* nas pastas de cimento hidratadas



(fonte: BACHE³, 1981 apud AÏTCIN, 2000)

Concretos de alto desempenho desenvolvem resistências mecânicas mais rapidamente, devido a menor quantidade de água disponível nas baixas relações água/aglomerante. Esse comportamento pode ser explicado pela rápida saturação da água com íons dos produtos externos de hidratação (*outer*), fazendo com que a distância entre as partículas de cimento e os produtos *outer* seja menor, desenvolvendo uma ligação inicial entre eles (AÏTCIN, 2000).

Outra característica de diferenciação dos concretos de alto desempenho é a redução das heterogeneidades. Ao fazer a dosagem do concreto, geralmente é considerado um percentual de 4 a 5% de teor de ar incorporado, porém essas bolhas de ar presentes no sistema são

³ BACHE, H. H. Densified cement/ ultra-fine particle-based materials. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS IN CONCRETE, 2., 1981, Ottawa. **Proceedings...** Denmark: Aalborg Cement Aalborg, 1981. Não paginado.

consideradas heterogeneidades microestruturais que reduzem a resistência à compressão desse material. Entretanto, a incorporação de ar melhora a trabalhabilidade do concreto, ajudando tanto no momento do lançamento, como no acabamento (AİTCIN, 2000).

4 FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Algumas propriedades importantes do concreto como, resistência mecânica e permeabilidade, são influenciadas pelas propriedades da pasta. Essas, por sua vez, dependem dos aspectos microestruturais como quantidade, distribuição e tipo dos sólidos e dos vazios presentes (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Nos concretos de alto desempenho, a microestrutura da argamassa tem um efeito definitivo sobre a distribuição do tamanho dos poros, porosidade e propriedades mecânicas. A adição de sílica ativa otimiza a ligação entre a matriz de cimento hidratado e a areia, devido à conversão de hidróxido de cálcio em teores de silicato de cálcio hidratado, formando uma microestrutura menos porosa e mais homogênea (FELDMAN; CHENG-YI, 1985).

Este capítulo apresenta os principais fatores que influenciam nas propriedades mecânicas dos concretos de alto desempenho:

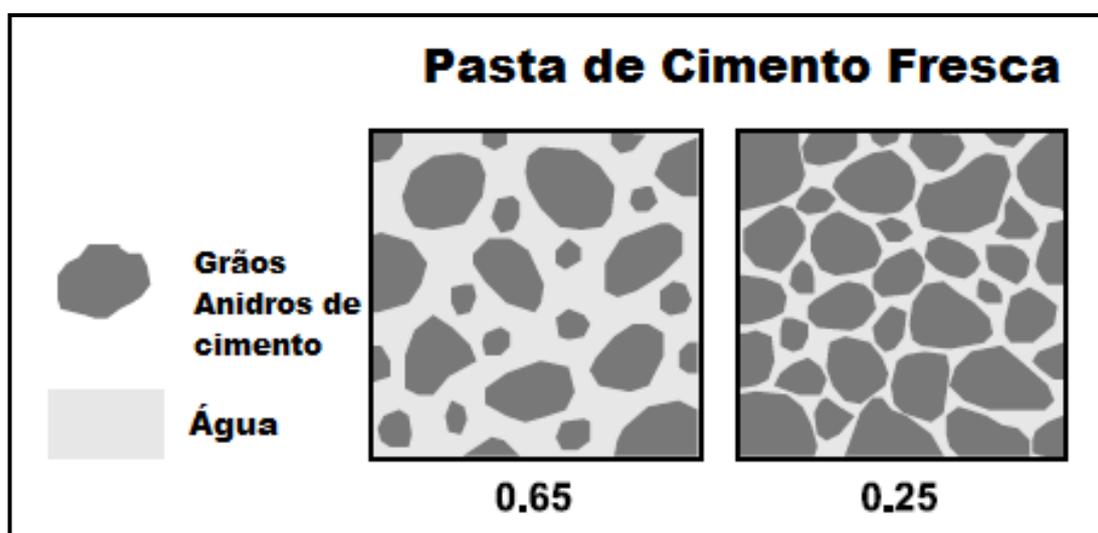
- a) relação água/aglomerante;
- b) volume de vazios;
- c) tipo de cura;
- d) adições minerais;
- e) aditivos químicos.

4.1 RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE

A resistência à compressão está intimamente relacionada com a compacidade da matriz endurecida. Na figura 3, estão representadas, esquematicamente, as diferenças microestruturais fundamentais entre pastas de cimento com relação água/aglomerante (a/a) de 0,65 e 0,25. Na relação a/a de 0,25, há mais grãos de cimento e, conseqüentemente, menos água por unidade de volume, de modo que, os grãos de cimento estão muito mais próximos uns dos outros do que na pasta com relação a/a de 0,65. As pastas de cimento com relações a/a altas são muito porosas e ricas em produtos de hidratação cristalizados *outer*, formados através de um processo de precipitação. As pastas com baixas relações a/a são mais

compactas e compostas essencialmente de produtos de hidratação *inner*, assemelhando-se a um gel desenvolvido através de um processo de difusão. Essa diferença microestrutural essencial resulta numa grande diferença no comportamento mecânico e durabilidade da pasta de cimento (AÏTCIN, 2003).

Figura 3 – Representação esquemática da microestrutura de duas pastas com relação água/aglomerante de 0,65 e 0,25



(fonte: AÏTCIN, 2003, tradução nossa)

Em concretos com baixas relações a/a e com adições minerais, as mudanças na resistência são devido aos efeitos combinados da físico-química das pozolanas no concreto. A influência física é o refinamento da estrutura dos poros, enquanto que, a química, consiste de reações pozolânicas e processos de hidratação (YAZICI, 2007).

Na microestrutura da pasta, o teor de hidróxido de cálcio (C-H) é maior e bem mais cristalizado em concretos convencionais, já nos CAD, ele é raro e não são bem cristalizados, indicando menos planos de fraqueza na forma C-H. Essa diferença no teor de C-H entre esses dois tipos de concreto é atribuído à baixa relação a/a dos concretos de alto desempenho. Uma vez que o cálcio supersaturado em solução é necessário para a formação de C-H, a falta de água na mistura de concreto inibe a sua cristalização e o seu crescimento, além da mobilidade dos íons cloretos serem reduzidas (SARKAR; AÏTCIN, 1987a).

Chengzhi et al. (1996) dividem a água na pasta fresca em duas partes, uma parte é a água de enchimento, que preenche os espaços vazios entre as partículas e não contribuí para a fluidez

da pasta e, a outra, a água na camada superficial. A quantidade de enchimento de água está relacionada com a densidade de empacotamento do sistema. A adição de material pozolânico afeta a densidade de empacotamento, alterando a quantidade de enchimento de água. A quantidade de água na camada de superfície está relacionada com a superfície específica do sistema. Materiais pozolânicos com superfície específica maior que a do cimento, aumentam a quantidade de água na superfície. Se a superfície específica do material pozolânico não é muito grande, a adição desses materiais diminui a quantidade de água de enchimento, mas aumenta a quantidade de água na camada de superfície. Em geral, a quantidade total de água não é alterada.

Aïtcin (2000) concluiu que, nos CAD é possível, em 12 horas, alcançar uma resistência à compressão de 15 MPa; 20 MPa, em 18 horas e 30 MPa, em 24 horas, quando os traços de CAD são projetados em função do consumo de cimento/ aglomerante e da quantidade de água. O autor afirma que, concretos de alto desempenho atingiram resistência à compressão de 75 MPa em 24 horas, utilizando cimento tipo III e com relação a/a de 0,22. Porém, nesse caso, o abatimento acima de 150 mm não conseguia ser mantido por mais de 15 minutos.

4.2 VOLUME DE VAZIOS

Féret⁴ (1894 apud LARRARD; SEDRAN, 1994) formulou uma regra geral para prever a resistência à compressão de materiais cimentícios, provando que a máxima força é alcançada quando a porosidade inicial da matriz, ou seja, a proporção de vazios pelo total do volume da matriz é mínima, isto é, a densidade de empacotamento é máxima.

O conceito de alta densidade de empacotamento é um parâmetro chave para o desenvolvimento de materiais cimentícios com ultra-alto desempenho, podendo ser compreendido como a correta seleção da proporção e do tamanho dos materiais, de modo que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores (STUDART et al.,1998).

Um dos modelos mais aprimorados que solucionam a questão do empacotamento de misturas secas para a dosagem de componentes do concreto é o Modelo de Empacotamento Compressível, o qual é fundamentado no conceito da compacidade virtual de empacotamento

⁴ FÉRET, R. **Compacité des mortiers hydrauliques**: compactness of hydraulic mortars. Paris: 1894. Annales des Ponts et Chaussées..

(β), definida como “[...] a máxima compacidade de uma mistura granular monodispersa [...], mantendo a forma original dos grãos e empilhando-os um a um num volume infinito.” (FORMAGINI, 2005, p. 15).

A estrutura de poros dos compósitos de cimento é considerada como um coproduto integrante do processo de formação desse material. Ela começa a se desenvolver com a adição de água na mistura, durante a compactação e hidratação do cimento. Durante a mistura e a compactação, prossegue a formação dos poros em longo prazo, devido ao processo de hidratação do cimento e formação dos produtos de hidratação (JAMBOR, 1990).

Distinguem-se duas fases no desenvolvimento da estrutura de poros, sendo a primeira fase determinada pela composição e o grau de compactação da mistura. Nessa fase, a estrutura inicial é composta por poros com raio acima de 1 μm , sendo a porosidade inicial dada pela soma do volume de água da mistura e dos vazios de ar da unidade de volume da mistura, após sua compactação. A segunda fase é decisivamente influenciada pelo processo de hidratação do cimento e o aumento do volume dos produtos dessa hidratação. A diminuição gradual dos poros e a formação de microporos com um raio inferior a 1 μm são características dessa fase (JAMBOR, 1990).

A porosidade total do compósito diminui e a distribuição do tamanho dos poros muda expressivamente, devido à rápida queda do valor da mediana do raio dos microporos. Esse valor deve ser considerado como uma importante característica do grau de hidratação do cimento. O fator mais importante na influência do valor da porosidade inicial e na dos seus parâmetros é a quantidade de água da mistura (JAMBOR, 1990).

Um dos fatores mais importantes, no controle da resistência e do módulo de elasticidade de sistemas de cimento Portland, é a porosidade, assim como a morfologia que envolve os cristais de ligação e a densidade dos produtos da hidratação. Cristais pouco alinhados e mal cristalizados possuem melhores propriedades de ligação. Em sistemas altamente porosos, a ligação dos materiais bem cristalizados é pequena e a resistência é menor do que em materiais com a mesma porosidade, porém mal cristalizados. O melhor valor de resistência é obtido pela combinação ideal de material bem e mal cristalizado. A formação de produtos de baixa densidade também melhora a resistência, devido à redução inerente da porosidade dos produtos com baixa densidade, como por exemplo, a formação de hidratos de C_2S , a qual

resulta em materiais fracos em função da pobre ligação intercristais, da alta densidade e, conseqüentemente, da alta porosidade (FELDMAN; BEAUDOIN, 1976).

Tendo em vista que há uma relação inversa entre resistência mecânica e porosidade, a tentativa para melhorar a resistência mecânica baseia-se na redução da porosidade total, produzindo um material mais denso e forte. Conforme Griffith⁵ (1920 apud ALFORD, 1981), a falha crítica é o maior poro e continuará sendo a falha crítica até que outra parte da microestrutura produza uma maior concentração de tensões maior que esse poro, portanto se a dimensão do poro é maior que o tamanho do defeito, a resistência é controlada pelo poro; se o tamanho do poro for menor que o tamanho do defeito, então a concentração de tensão associada ao poro não é suficientemente grande para influenciar na resistência do material.

Alford et al. (1982) observaram que, para uma resistência entre 60 e 70 MPa, pode-se esperar uma falha inerente em torno de 100 a 150 μm , porém em pastas com poros muito menores, com tamanho máximo de 20 μm , foi sugerido que alguma outra parte da microestrutura do cimento estivesse atuando como a falha crítica. Considerando que a pasta de cimento se comporta de forma linear e elástica, considera-se válida a aplicação da mecânica da fratura e o seu parâmetro, o fator de intensidade de tensão crítica. No caso de não ser possível remover a falha crítica, pode-se aumentar a força aumentando o fator de intensidade de tensão crítica. Esse aumento pode ser alcançado através do reforço da ligação entre o gel e as partículas de clínquer que não reagiram, ou, simplesmente, aumentando o número de ligações por unidade de área.

4.3 TIPO DE CURA

A cura é composta por processos realizados para a manutenção da condição de saturação do concreto, de forma que seja assegurada a temperatura, a hidratação do cimento, a saída e a entrada de umidade, a fim de que os espaços preenchidos pela água cedam lugar aos produtos de hidratação do cimento. A cura pode ser classificada em duas categorias: por molhagem e por membrana. O primeiro método consiste na imersão do concreto em água e, o segundo, no impedimento da perda de água pela superfície, através do cobrimento da superfície do concreto com mantas, também conhecido como método da barreira à água (NEVILLE, 1997).

⁵ GRIFFITH, A. A. **Philosophical Transactions**. London: The Royal Society of London, 1920. Series A.

Nesse trabalho foi aplicado o método de cura com vapor à pressão atmosférica, mais conhecida como cura térmica, que é um caso particular de cura úmida, na qual a água está em uma temperatura abaixo de 100°C e submetida à pressão atmosférica. Camarini e Cincotto (1995), testaram argamassas confeccionadas com dois tipos de cimento (Portland e o de alto-forno) expostas a três temperaturas em cura térmica. Nas argamassas de cimento Portland, os autores relatam que a maior resistência foi resultado do ciclo de cura a 60°C, em que foi obtido, em 2 dias de cura térmica, 97% da resistência em relação à cura úmida e 51% da resistência alcançada ao 28 dias.

Em idades avançadas, esse ciclo não resultou em bom desempenho em relação à cura normal, ocorrendo perdas na resistência de 5% aos 28 dias e 22% aos 90 dias. Para as argamassas de cimento de alto-forno, as resistências à compressão inicial apresentaram-se significativas nas situações de regime longo a 60°C (7,5 horas) e regime curto a 95°C (3 horas). Os valores de resistência à compressão das argamassas de cimento de alto-forno foram maiores com relação ao cimento Portland (CAMARINI; CINCOTTO, 1995).

Em estudos realizados por Ferreira Júnior (2003), com concretos de cimento CPV-ARI expostos à cura térmica, os valores de resistência foram inferiores aos demais regimes de cura normal e por imersão, durante 7 dias, à exceção das 24 horas iniciais. A cura térmica a 60 e 80°C se mostraram menos eficientes nesses concretos, estando esses resultados relacionados com o aparecimento de microfissuras, devido ao incremento das tensões internas quando aumentada a temperatura, em um momento que o concreto não atingiu maturidade suficiente para resistir a esforços desse tipo. Isso fez com que houvesse aumento da porosidade, e conseqüentemente, diminuição da resistência mecânica.

Bardella et al. (2006), em estudos de concreto com sílica ativa, observaram que a substituição do cimento em 10% por sílica ativa, melhorou a resistência à compressão dos concretos, tanto na cura térmica à 60°C, quanto na cura ao ar. Na cura térmica, as resistências à compressão nas idades iniciais foram maiores à compressão e a utilização da sílica ativa aumentou ainda mais esses valores. Foram realizados ensaios de absorção de água por imersão total, sendo observado que o índice de vazios foi menor na cura térmica, porém, nos concretos com sílica ativa, os valores foram similares tanto na cura térmica, quanto ao ar. Os concretos com sílica ativa apresentaram melhores resultados quando comparados aos concretos sem sílica ativa quando foram submetidos ao mesmo tipo de cura.

Amostras de concreto, submetidas a temperaturas de cura de até 46°C, mostraram semelhante microestrutura à observada a 20°C. Nas temperaturas mais elevadas, na faixa dos 80°C, os concretos apresentaram uma microestrutura mais grosseira que a 20°C, em relação à formação de portlandita. Foram observadas microfissuras no interior do concreto, que se caracterizaram pelo preenchimento de etringita associada à portlandita. As microfissuras foram localizadas na interface pasta-agregado, onde a etringita ocorreu como uma casca na superfície das partículas de agregado graúdo. A presença de microfissuras aumentou a mobilidade da umidade dentro do concreto, produzindo gradientes de densidade dentro da matriz, promovendo aumento das fissuras. A dominação da matriz por uma rede de microfissuras foi devido à formação de etringita secundária (PATEL et al., 1995).

O desenvolvimento da resistência à compressão, em argamassas com escórias de alto-forno curadas em idades diferentes, estava relacionado com a temperatura de cura. Em idades precoces, a resistência à compressão foi superior a temperaturas mais elevadas, uma vez que a velocidade de reação foi maior. Já nas idades posteriores, a resistência foi menor em alta temperatura de cura. Esse comportamento pode ser explicado devido à formação de fases hidratadas densas em torno das partículas de cimento que não reagiram, impedindo a hidratação (BARNETT et al., 2006).

A distribuição não uniforme dos produtos de hidratação também leva a formação de poros maiores na microestrutura. Argamassas que possuíam altos níveis de grão de escória granulada de alto forno eram mais dependentes da temperatura com o aumento da quantidade dos grãos. Nas temperaturas mais elevadas, o ganho de resistência é muito mais rápido e mais significativo nas argamassas com maiores níveis de grãos de escoria granulada de alto forno, devido ao aumento da energia de ativação com o aumento da quantidade desse material (BARNETT et al., 2006).

4.4 ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais são materiais com propriedades pozolânicas, ou seja, quando em contato com umidade reagem com hidróxido de cálcio, formando compostos cimentícios. O uso de adições minerais em concretos tem como objetivo a melhora da resistência à fissuração térmica, devido ao baixo calor de hidratação, aumento da resistência e da impermeabilidade em função do refinamento dos poros, e conseqüentemente maior durabilidade a ataques

químicos. A sílica ativa é classificada como uma pozolana altamente reativa, composta por partículas extremamente finas, de esferas sólidas de diâmetro médio de 0,1 μm (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Mazloom et al. (2004) afirmaram que concretos com sílica ativa exigem maiores quantidades de aditivo superplastificante, sendo isso atribuído ao tamanho e a finura desse material, fazendo com que o aditivo seja adsorvido na superfície. Na idade de 28 dias, a resistência do concreto contendo 15% de sílica ativa foi 21% maior que a amostra controle, sem sílica ativa. Já aos 90 dias de cura, a resistência à compressão dos concretos com sílica ativa não aumentou. A umidade da cura melhorou a resistência à compressão do concreto sem sílica ativa cerca de 10%, porém não teve efeito significativo nas amostras com sílica ativa.

Mazloom et al. (2004) também testaram os espécimes de concreto quanto à penetração de água por 24 horas, a fim de investigar o efeito da fluência e do encolhimento na microestrutura. Quando a proporção de sílica ativa aumentou, a penetração de água diminuiu devido à distribuição de poros mais fina e ao tamanho médio de poro reduzido. A penetração de água no topo da amostra foi menor por causa do longo período de cura, resultando em maior grau de hidratação e diminuição da porosidade. Nas amostras de 7 dias, a penetração de água foi menor que nas amostras com 28 dias.

Em estudos realizados com pastas e argamassas com sílica ativa, Toutanji e El-Korchi (1995), observaram que a substituição de cimento por sílica ativa, independente da relação a/c, juntamente com a utilização de aditivo superplastificante, promoveu um aumento na resistência das argamassas. Isso pode ser atribuído à melhoria da ligação matriz-agregado associada com a formação de uma zona interfacial menos porosa. Nas pastas de cimento com sílica ativa e proporções com relação a/c de 0,22, a resistência à compressão se mostrou menor que nas pastas sem sílica ativa em função da falta de água na mistura, resultando em autosssecagem dos espécimes.

Toutanji e El-Korchi (1995) salientam que, em teores constantes de sílica ativa e aditivo superplastificante, a resistência máxima das pastas e das argamassas com sílica ativa é atingida com diferentes relações a/c. Nos casos de relações a/c constantes, a pasta com sílica ativa requer uma maior dosagem de aditivo superplastificante que argamassa com sílica ativa

para atingir um nível de trabalhabilidade adequado. A presença de agregados na mistura proporciona uma melhor dispersão das partículas de sílica ativa.

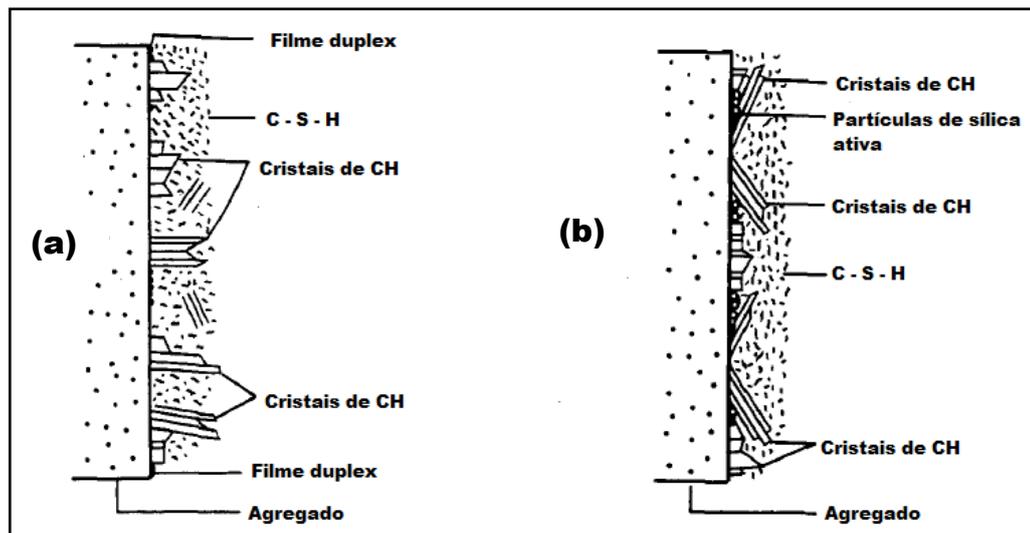
A sílica ativa também provoca alterações na microestrutura de argamassas. Larbi e Bijen (1990) procuraram entender a orientação do hidróxido de cálcio na zona interfacial da pasta com o agregado, visto que, compreender os fatores que afetam a orientação é fundamental para o desenvolvimento de um mecanismo de melhor hidratação do hidróxido de cálcio na zona de transição. Nos pontos em que as partículas de sílica ativa ocorrem na superfície do agregado, sua forma esférica tende a orientar os cristais de C-H na medida em que eles crescem. Nas placas de C-H que utilizam o agregado como núcleo de cristalização, o padrão e a orientação são os mesmos que nas misturas sem sílica. A ausência de um filme duplex na superfície dos agregados das argamassas é atribuível ao aumento dos locais de nucleação por cristais de C-H, devido à presença de partículas de sílica muito finas.

As partículas ultrafinas de sílica bem distribuídas na pasta e na superfície do agregado permitiram a precipitação de cristais de C-H para núcleos, não sendo permitido a formação do filme duplex. O desaparecimento de cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e a melhoria da adesão da pasta com o agregado são devido à reação pozolânica da sílica ativa. A figura 4 apresenta um diagrama esquemático da orientação dos cristais de C-H nas argamassas com adição de sílica ativa e nas argamassas sem sílica ativa, visualizando uma orientação mais inclinada desses cristais nas argamassas com sílica ativa (LARBI; BIJEN, 1990).

O material pozolânico, assim caracterizada a sílica ativa, possuem três características fundamentais e, portanto, três efeitos. Chengzhi et al. (1996), abordaram o efeito físico desse material, considerando sua menor densidade e menor tamanho de partícula. Sem a hidratação e o efeito da densidade, a adição de material pozolânico altera o estado de empacotamento do sistema, diminuindo o grande número de poros grandes e aumentando o número de poros pequenos.

Essa alteração ocorre em função da finura da pozolana, ou seja, quanto mais finas forem as partículas, mais eficaz é o efeito desse material. A adição de pozolana influencia na demanda de água, e, conseqüentemente, na resistência mecânica. As propriedades físicas desses materiais são significativas, especialmente no papel de enchimento, influenciando no estado de empacotamento e reduzindo a quantidade de enchimento da água, porém aumentando a água na camada superficial e diminuindo o tamanho dos poros (CHENGZHI et al., 1996).

Figura 4 – Diagrama esquemático das argamassas sem sílica ativa (a) e com sílica ativa (b)



(fonte: LARBI; BIJEN, 1990, tradução nossa)

4.5 ADITIVOS QUÍMICOS

Concretos de alto desempenho possuem baixas relações a/a e adição de minerais extremamente finos. E essas duas condições tornam esse material pouco trabalhável, devido à pouca água que está livre dentro da mistura. Por essa razão, é essencial o uso de aditivos para harmonizar esses efeitos.

A NBR 11768 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011) classifica os tipos de aditivos de acordo com as suas funções em sete categorias:

- a) aditivo redutor de água/ plastificante;
- b) de alta redução de água/ superplastificante tipo I;
- c) de alta redução de água/ superplastificante tipo II;
- d) incorporador de ar, acelerador de pega;
- e) acelerador de resistência;
- f) retardador de pega.

Os aditivos superplastificantes são classificados em quatro categorias, de acordo com a sua natureza química:

- a) condensados sulfonados de melamina-formaldeído (também chamados de superplastificantes de melamina);
- b) condensados sulfonados de naftaleno-formaldeídos (também conhecidos por superplastificantes de naftaleno);
- c) condensados de lignossulfonatos modificados;
- d) ésteres de ácido sulfônico e de carboidratos.

Nos concretos de alto desempenho, a utilização de aditivo superplastificante atua como redutor de água, sendo capaz de reduzir em até quatro vezes o teor de água em certos traços de concreto (CINCOTTO, 1994).

Entre os aditivos superplastificantes, os dois primeiros tipos são os mais utilizados, sendo que os melamínicos incorporam menos ar, comparado com o naftaleno; não retardam a pega do concreto; por possuir 22% de teor de sólidos, a superdosagem não seria tão crítica se comparado com o naftaleno, com teor de 40 a 42% de sólidos. Já os superplastificantes naftalenos retardam a pega, facilitando o controle da reologia dos CAD; são mais baratos, resultando numa melhor relação custo-benefício para se obter determinado grau de trabalhabilidade (AÏTCIN, 2000).

Durekovic (1995) ensaiou pastas compostas por sílica ativa, aditivo superplastificante do tipo melamina-formaldeído e baixa relação água/sólido, as quais foram submetidas à cura imersa em água a 20 °C. Conclui-se que o uso do aditivo superplastificante foi benéfico para a formação de pequenos poros capilares, principalmente nas misturas com sílica ativa. Mudanças nos parâmetros estruturais ocorreram em um curto espaço de tempo, devido à redução da hidratação, a qual foi influenciada pela restrição da mobilidade da água pela densificação da estrutura. Nas pastas sem aditivo superplastificante e com grande quantidade de sílica ativa, essa restrição ocorreu mais precocemente e de forma mais acentuada. A presença do aditivo superplastificante foi fundamental para o processo de hidratação nas pastas de cimento com baixos teores de água.

5 EFEITO DA TEMPERATURA DE CURA NA MICROESTRUTURA DOS CONCRETOS

A elevação de temperatura nos concretos de alto desempenho tem efeitos completamente diferentes dos concretos convencionais e, devido ao aumento de temperatura não ser uniforme ao longo de toda a massa, as temperaturas variam dentro do elemento estrutural, de modo que a hidratação não é a mesma em todos os lugares e nem a velocidade de hidratação (AÏTCIN, 2000).

Kjellsen e Detwiler (1992) testaram argamassas de cimento Portland, curadas a diferentes temperaturas, variando de 5 a 50°C. O efeito da temperatura nas idades mais precoces foi mais significativo que nas idades mais avançadas. Zonas densas de produtos de hidratação se formaram ao redor dos grãos hidratados em altas temperaturas, e a formação de cascas (também caracterizadas como carapaças) limitou e impediu a difusão de íons, reduzindo assim, o grau de hidratação final. Essas cascas são mais densas, quando formadas a temperaturas mais elevadas, funcionando como barreiras para a difusão de íons sulfato. A temperatura de hidratação influenciou fortemente na distribuição de produtos de hidratação ao longo da matriz pasta de cimento em graus de hidratação acima de 30%.

Em estudos em pastas de cimento com relação a/c de 0,50, comparadas a CAD com relação a/a de 0,31, foi evidenciado que nas idades mais avançadas, a fase de produtos *inner* da pasta de cimento, curada a 50°C, revelou uma porosidade fina menor que na fase de produtos *outer* ou na fase de produtos *inner* curadas a 5°C. A relação Ca/Si dos produtos *inner* e *outer* não foram influenciadas pela temperatura de cura. A distribuição dos produtos da reação C-S-H na matriz pasta de cimento, nas idades posteriores, era mais uniforme nas baixas temperaturas de cura (KJELLSSEN, 1996).

A cura térmica nos CAD apresentou maior porosidade nas cavidades das cascas nas idades mais avançadas do que nos concretos curados a 20°C. Formou-se menos CH na formação das cascas dos concretos submetidos à cura térmica, sendo uma razão para a alta porosidade das cascas. Concreto de alto desempenho curado termicamente e em seguida, armazenado ao ar livre, apresentou maior porosidade nas cascas e maior porosidade capilar. A distribuição de

C-S-H na matriz da pasta não foi influenciada pela cura térmica, por outro lado, a composição das fases de C-S-H foram influenciadas pelo regime de cura. A relação $(Al + Fe)/Ca$ da fase dos produtos *inner* aumentou com a diminuição da temperatura de cura, em função de Al e Fe se difundirem menos facilmente a baixas temperaturas, podendo influenciar na formação das fases etringita (AFt) e das fases monossulfato hidratado (AFm) na matriz. Nas pastas de cimento curadas a 50°C, a fase AFm é formada em pequenos cristais nos poros capilares ou misturada com C-S-H em idades posteriores; nas pastas curadas a 5°C, a fase AFm é formada por grandes fases (mais de 10 µm de diâmetro) em cascas ocas nas idades posteriores (KJELLEN, 1996).

Na cura térmica, a formação da etringita secundária pode ocorrer, em função da sua instabilidade e da ligação do sulfato com outras fases como a fase monossulfato (C_3ACSH_{12}), a fase C-S-H ou estar livre na solução de poros. Após o tratamento térmico, a etringita pode se reformatar em condições de saturação de umidade frequente ou prolongada nas pastas de cimento ou argamassa. Essa reformatação no cimento endurecido pode levar a uma pressão de cristalização e expansão, caso não seja proporcionado espaço suficiente para os produtos da reação (SIEDEL et al., 1993).

A quantidade da fase etringita secundária e a morfologia dos cristais são dependentes da relação a/c, influenciando na densidade da estrutura de concreto. Após 500 dias do tratamento térmico em temperaturas máximas, a formação de etringita secundária foi apenas nos espaço proporcionados na zona de transição pasta-agregado, não ocorrendo nenhum fenômeno de expansão. A morfologia do cristal de etringita está relacionada com as condições de crescimento, como o espaço para a cristalização (SIEDEL et al., 1993).

Cao e Detwiler (1995) testaram pastas de cimento com sílica ativa em diferentes níveis de hidratação e temperatura. Com 30% de hidratação, a microestrutura das pastas curadas a 23°C foram mais uniformes no espaço intergranular e formaram-se mais hidratos na zona da matriz do que ao redor dos grãos de cimento. Comparadas com as pastas sem sílica ativa, com a mesma idade e temperatura de cura, existiam formações em forma de placa de $Ca(OH)_2$ nas pastas com sílica ativa. Os grãos de Hadley, definidos como grãos maiores envolvidos por cascas ocas de hidratação, foram prevalentes na pasta de cimento Portland.

A pasta de sílica ativa possui uma matriz menos porosa que a matriz da pasta sem sílica ativa. A ausência de grandes formações de hidróxido de cálcio, nas pastas com sílica ativa, indica

que a sílica ativa tem um efeito de refinamento da estrutura na pasta hidratada, devido aos efeitos *filler* e efeitos de nucleação. Nas pastas de sílica ativa, curadas a 70°C e com 30% de hidratação, as formações de Ca(OH)_2 são menos agrupadas. Embora a distribuição dos produtos de hidratação seja relativamente uniforme, nesse caso, parece ser mais ampla com poros contínuos entre os grãos de cimento (CAO; DETWILER, 1995).

As pastas contendo sílica ativa, em 30% de hidratação, possuem uma estrutura mais densa com relação às pastas sem sílica ativa. Com 70% de hidratação, a presença dos grãos de Hadley é mais visível na pasta curada a 23°C e alguns desses grãos contêm grãos de cimento não hidratados. Formações maciças de Ca(OH)_2 foram desenvolvidas com o aumento do percentual de hidratação, assim como as cascas densas dos produtos de hidratação são bem desenvolvidas também (CAO; DETWILER, 1995).

De acordo com os autores, Cao e Detwiler (1995), nas pastas observadas curadas a 70°C, ocorreu a formação um grande número de grãos de Hadley. Uma redução notável, tanto em termos de tamanho, como quantidade, de Ca(OH)_2 é visível devido a cura à alta temperatura e a presença da sílica ativa. A microestrutura da pasta está mais porosa e o conteúdo de Ca(OH)_2 é menor do que a 23°C. Nas pastas com sílica ativa, o Ca(OH)_2 estava mais disperso, sugerindo que uma dosagem de 5% de sílica ativa tem mais influência na microestrutura da pasta, através dos mecanismos físicos de nucleação e do efeito *filler*, do que nos mecanismos químicos da reação pozolânica.

Em concretos com adição de cinza volante, curados a 50°C e 20°C e com relação a/a de 0,30, Ba et al. (2011) mostraram que há influência nas propriedades mecânicas, quando aplicada cura térmica em diferentes durações. Os resultados mostraram que a resistência à compressão das amostras, com 90 dias e curadas a vapor, foi maior do que as das amostras que não foram submetidas à cura a vapor. Esse comportamento pode ser explicado pela cura inicial à vapor, a qual possivelmente causou uma hidratação mais estendida e uma reação pozolânica.

A duração da primeira cura a vapor a 50°C também afetou a resistência à flexão dos concretos. Com o aumento da duração da cura inicial de 0 a 14 horas, ocorreu um aumento da resistência, enquanto que, após as 24 horas de cura, foi observada uma redução da resistência à compressão e à flexão. A partir das 24 horas de cura a vapor, o volume das partículas de

cinza volante diminuiu e a fração de C-S-H gel aumentou, indicando que o grau de hidratação das cinzas volantes cresceu (BA et al., 2011).

A matriz da pasta de cimento também se modificou, mostrando-se com partículas mais grosseiras, resultando assim, na diminuição da resistência à compressão. Com relação à estrutura de poros formada, o aumento da duração da cura a vapor até 14 horas diminuiu os poros mais grosseiros, no entanto, em 24 horas, houve um aumento da porosidade. A duração cada vez maior de cura inicial levou a mudanças na porosidade e na distribuição de tamanho dos poros, atribuído ao aumento da hidratação das cinzas volantes e do cimento (BA et al., 2011).

Verificou-se também, nos estudos de Ba et al. (2011), que a variação da porosidade foi medida por microscopia eletrônica de varredura e estava em conformidade com as mudanças na resistência à compressão, enquanto que a porosidade total, medida por porosimetria de mercúrio, foi irrelevante para essas mudanças de resistência, indicando que os poros mais grosseiros contribuíram mais significativamente para a redução da resistência à compressão.

Segundo Ba et al. (2011), os poros capilares e os macroporos foram medidos e divididos em três grupos: os poros capilares finos (com diâmetro menor que $0,5 \mu\text{m}$), os poros capilares maiores (com diâmetro maior que $0,5 \mu\text{m}$) e os macroporos (com diâmetro maior que $50 \mu\text{m}$). Concluíram que, existe um período crítico de cura a vapor, localizado na temperatura de 50°C , após o período de 24 horas de duração, que torna os poros mais grosseiros e incapazes de serem hidratados, mesmo sendo submetidos depois a cura úmida à temperatura de 20°C , por 90 dias.

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desenvolvido nesse trabalho objetiva avaliar a resistência mecânica das argamassas expostas a cura térmica e a cura úmida. O comportamento microestrutural dessas argamassas frente aos dois tipos de cura em três períodos de exposição, para que fosse possível determinar as causas da diminuição da resistência à compressão nas argamassas submetidas à cura térmica ao longo dos períodos de cura estudados também foi avaliado.

No presente trabalho, o comportamento das resistências mecânicas foi observado em argamassas de concreto de alto desempenho, devido à logística do processo ser mais fácil, se tratando de resistências à compressão menores das que resultariam em CAD. A comparação entre as pastas de cimento que se forma na argamassa e no concreto pode ser feita, pois ambas possuem uma estrutura de poros semelhante entre si. As pastas com a mesma quantidade de água, as quais se hidratam sob diferentes circunstâncias, mas para o mesmo grau de hidratação, possuem a distribuição do tamanho dos poros semelhantes (WINSLOW; LIU, 1990).

Foram escolhidos três traços de argamassas com diferentes relações a/a, mantendo as proporções de agregado miúdo constantes. A dosagem das argamassas foi calculada a partir do Método Mehta-Aïtcin, usado para dosagem de CAD. Para cada traço, foram moldados doze corpos de prova, sendo que, seis desses foram submetidos à cura térmica a 60°C e, o restante, à cura úmida em câmara climatizada.

6.1 ELABORAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A opção do método e o cálculo da dosagem foram definidos na primeira etapa realizada. Foi escolhido o método Mehta/Aïtcin pela praticidade na definição dos traços, pois a dosagem é feita não pela relação água/aglomerante, mas pelo consumo de água por metro cúbico de concreto. A quantidade de água para cada mistura foi calculada, partindo-se da massa específica do cimento (3,15 g/cm³) e considerando o teor de pasta igual a 35%, sendo 2% o volume de ar incorporado e 65% de volume de agregados para todas as misturas. Como não

foi utilizado agregado graúdo, o volume de 65% de agregados foi dividido entre as duas granulometrias de areia utilizadas.

Para que fosse possível avaliar a resistência mecânica e as demais variáveis, foram escolhidos três valores para a relação a/a, sendo 0,30; 0,45; 0,55. As proporções de areia fina e média foram mantidas constantes para os três traços moldados. O quadro 1 apresenta as quantidades de cada material, em gramas, utilizado para a moldagem de um metro cúbico de argamassa. A trabalhabilidade das argamassas foi fixada em 270 +/- 20mm para todos os traços, tornando a quantidade de aditivo uma variável livre para cada traço. A quantidade de aditivo foi estipulada por tentativa, através do ensaio de consistência, conforme NBR 13276 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005), para cada traço, até encontrar a medida de espalhamento a ser fixada, conforme quadro 2. As figuras 5 e 6 apresentam imagens respectivamente do espalhamento das argamassas de traço 1 e 3.

Quadro 1 – Dosagem em massa (g) dos três traços de argamassas pelo Método Mehta/Äitcin

| MÉTOD0 METHA-ÄITCIN | | | | | | | | |
|---------------------|-----------|------|---------|--------------|---------|------|------------|--------------|
| TRAÇO | 35% PASTA | Água | Cimento | Sílica Ativa | Cim+SA | a/a | Areia fina | Areia grossa |
| TRAÇO 1 | 330 | 157 | 490,455 | 38,406 | 528,861 | 0,30 | 854,75 | 854,75 |
| TRAÇO 2 | 330 | 191 | 394,065 | 30,858 | 424,923 | 0,45 | 854,75 | 854,75 |
| TRAÇO 3 | 330 | 207 | 348,705 | 27,306 | 376,011 | 0,55 | 854,75 | 854,75 |

(fonte: elaborada pela autora)

Quadro 2 – Determinação da quantidade de aditivo para cada traço

| ENSAIO DE CONSISTÊNCIA | | | |
|------------------------|---------|---------------------------|---------------------------------|
| Traço | Amostra | Aditivo GLENIUM 51 (g) | Medidas de espalhamento (mm) |
| TRAÇO 1 | 1 | 70 | 260/ 260/ 265 |
| TRAÇO 2 | 1 | 25 | 210 |
| | 2 | 35 | 260/ 260/ 270 |
| TRAÇO 3 | 1 | 20 | 270/ 270/ 260 |

(fonte: elaborada pela autora)

Figura 5 – Consistência da argamassa a) traço 1 – 2ª medida = 260 mm b) traço 3 – 3ª medida = 270 mm



(fonte: foto da autora)



(fonte: foto da autora)

6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados para a moldagem das argamassas foram o cimento tipo CPV-ARI RS, areia fina e grossa, sílica ativa, água e aditivo superplastificante. Sabendo da influência que os materiais têm sobre as argamassas, nesse item são descritas as suas principais características.

6.2.1 Cimento

A escolha do cimento foi realizada em função de um material com menos adições e com maior pureza, com o objetivo de diminuir a variabilidade dos resultados de resistência mecânica dos corpos de prova. Para isso, foi utilizado o cimento Portland CPV-ARI RS para a produção das argamassas. Conforme a NBR 5733 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991), é necessário respeitar uma relação de 100 a 95% de clínquer e sulfatos de cálcio e de 0 a 5% de material carbonático, assim como exigências químicas, conforma tabela 1 e exigências mecânicas e físicas, conforme tabela 2. O cimento utilizado possui uma massa específica de $2,98 \text{ g/cm}^3$ e diâmetro médio de $14,1 \text{ }\mu\text{m}$.

Tabela 1 – Características químicas do cimento CP V ARI-RS empregado

| Propriedade Químicas | % | Limites (NBR 5733) |
|---|------|--------------------|
| Resíduos insolúveis | 1,00 | 1,0% |
| Perda ao fogo | 3,74 | < 4,5% |
| Óxido de magnésio (MgO) | 5,67 | < 6,5% |
| Trióxido de enxofre (SO ₃): quando C ₃ A do clínquer < 8% | 2,72 | < 3,5% |

(fonte: adaptado de VOTORANTIM CIMENTOS, 2013)

Tabela 2 – Características físicas e mecânicas do cimento CP V ARI-RS empregado

| Propriedades física e mecânicas | Unidade | CP V ARI | | |
|-----------------------------------|--------------------|------------|---------|------|
| | | Fabricante | Limites | |
| Finura (resíduo na peneira 75 µm) | % | 0,02 | < 6,0 | |
| Tempo de início de pega | minutos | 224 | > 60 | |
| Tempo de fim de pega | minutos | 281 | NA | |
| Blaine | m ² /kg | 481,5 | > 300 | |
| Resistência à compressão | 1 dia | MPa | 20,83 | > 14 |
| | 3 dias | MPa | 31,29 | > 24 |
| | 7 dias | MPa | 37,08 | > 34 |
| | 28 dias | MPa | 45,18 | NA |

(fonte: adaptado de VOTORANTIM CIMENTOS, 2013)

6.2.2 Sílica ativa

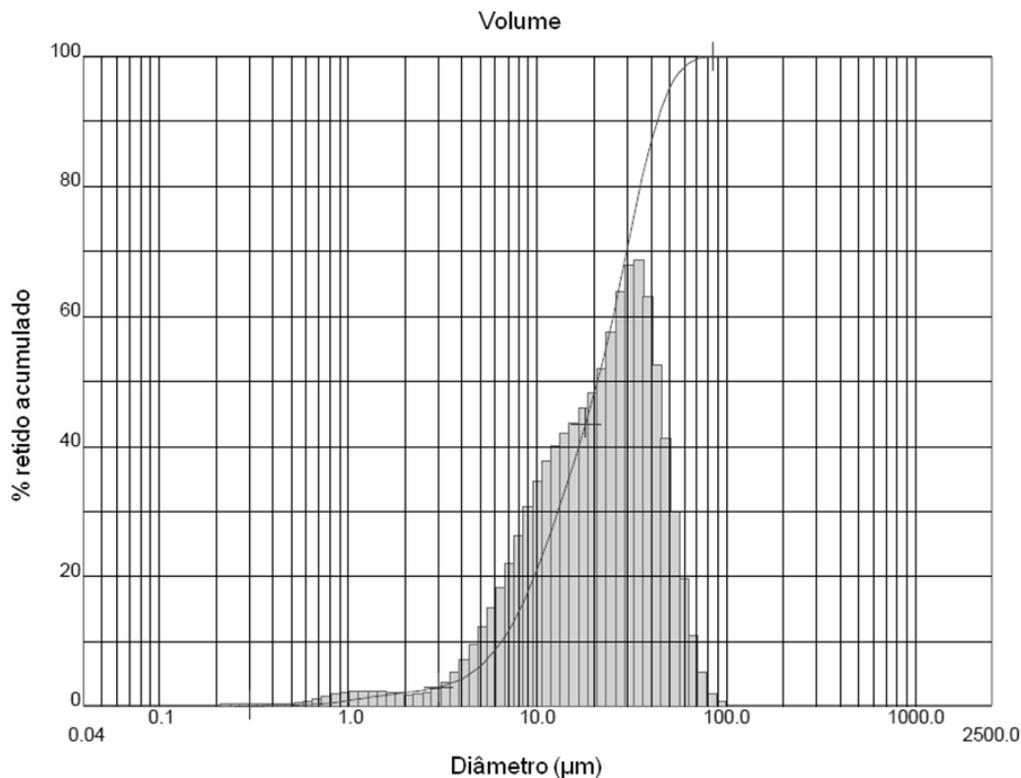
A caracterização da sílica ativa foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos (Lacer) da UFRGS, através do ensaio de granulometria a laser. O diâmetro médio das partículas de sílica foi de 23,04 µm. A tabela 3 apresenta o percentual passante nas peneiras e a figura 6 ilustra a curva granulométrica.

Tabela 3 – Composição granulométrica resumida da sílica ativa

| Diâmetro (µm) | % passante |
|---------------|------------|
| 6,48 | 10 |
| 20,79 | 50 |
| 43,03 | 90 |
| 23,04 | médio |

(fonte: elaborado pela autora)

Figura 6 – Curva granulométrica da sílica ativa utilizada



(fonte: elaborado pela autora)

6.2.3 Agregado miúdo

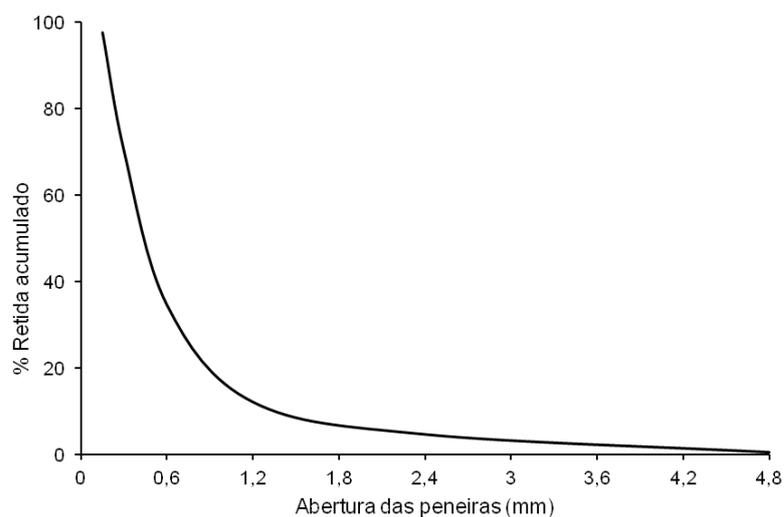
As areias utilizadas neste trabalho foram areias naturais quartzosas, oriunda do Rio Jacuí, na região de Porto Alegre, e de Osório, sendo que foram utilizadas duas granulometrias diferentes para a produção das argamassas. A caracterização física do agregado 1 foi realizada através do ensaio de determinação granulométrica, de acordo com o preconizado pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005), e da determinação da massa específica e unitária, conforme NM 23 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002). Os resultados obtidos desses ensaios, para o agregado 1, são apresentados na tabela 4 e na figura 7. A caracterização do agregado 2 foi realizada por granulometria a laser no Lacer, conforme figura 8. O percentual passante nas peneiras está na tabela 5.

Tabela 4 – Caracterização física do agregado 1

| Ensaio | Resultados | | |
|--|--------------|----------|--------------------|
| | Peneira (mm) | % retido | % retido acumulado |
| Granulometria | 4,8 | 1 | 1 |
| | 2,4 | 4 | 5 |
| | 1,2 | 7 | 12 |
| | 0,6 | 22 | 34 |
| | 0,3 | 36 | 69 |
| | 0,15 | 28 | 98 |
| | Fundo | 2 | 100 |
| Dimensão máxima característica (mm) | 2,40 | | |
| Módulo de finura | 2,19 | | |
| Massa unitária (kg/dm ³) | 1,50 | | |
| Massa específica (kg/dm ³) | 2,64 | | |

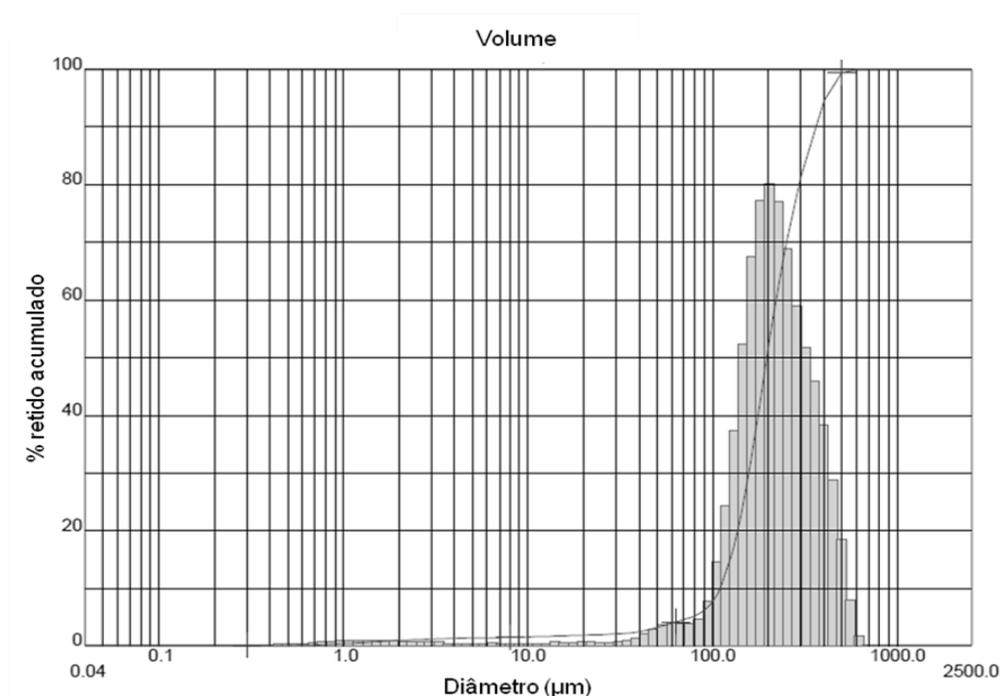
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 7 – Curva granulométrica do agregado 1



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 8 – Curva granulométrica do agregado 2



(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 5 – Composição granulométrica resumida do agregado 2

| Diâmetro (µm) | % passante |
|---------------|------------|
| 109,48 | 10 |
| 196,36 | 50 |
| 362,59 | 90 |
| 215,95 | médio |

(fonte: elaborada pela autora)

6.2.4 Aditivo superplastificante

O aditivo utilizado na produção das argamassas foi um superplastificante à base de éter policarboxílico. O uso desse material proporciona uma plasticidade à argamassa, reduzindo assim a quantidade de água necessária. No presente trabalho, as relações a/a foram calculadas e a quantidade de aditivo foi estabelecida em função da medida de espalhamento fixada, com

o objetivo de manter a trabalhabilidade das argamassas e possibilitar a moldagem dos corpos de prova.

Segundo o fabricante, as principais características técnicas são:

- a) base química: éter policarboxílico;
- b) pH: entre 5 e 7;
- c) densidade: entre 1,067 e 1,107 g/cm³;
- d) partículas sólidas: entre 28,5 e 31,5%.

6.3 METODOLOGIA

Os ensaios realizados nas argamassas objetivaram verificar a relação da resistência mecânica à compressão ao longo do tempo, quando expostas a duas condições de cura. Para avaliação da microestrutura, foram utilizadas a adsorção de gás nitrogênio, que avaliou a quantidade e o tamanho dos poros formados e os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que possibilitaram a análise qualitativa das fases presentes nos três tempos de cura estudados.

6.3.1 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados conforme a NBR 7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), totalizando 108 corpos de prova cilíndricos de dimensões 50 x 100 mm, distribuídos em uma amostra de 36 unidades de teste para cada traço. A produção das argamassas foi realizada no inverno, sendo a temperatura média de moldagem de 13°C +/- 2. A quantidade de aditivo foi adicionada em duas etapas, quando a mistura estava em velocidade rápida na argamassadeira, em quantidades iguais, conforme figura 9. Após cada mistura, foi verificada a consistência das argamassas e imediatamente realizada a moldagem dos corpos de prova.

Figura 9 – Aditivo superplastificante adicionado na mistura no período de velocidade alta



(fonte: foto da autora)

6.3.2 Tipos de cura

Utilizaram-se dois tipos de cura para as argamassas moldadas, a cura em banho térmico, com água à temperatura de 60°C e a cura úmida, em câmara climatizada com temperatura de 21°C. Após a moldagem das argamassas, os corpos de prova ficavam por um período de 24 horas cobertos por pano de saco umedecido com água à temperatura ambiente, para evitar a evaporação prematura de água, e após, eram colocados seis corpos de prova em câmara úmida e seis corpos de prova em banho térmico, conforme ilustrado nas figuras 10 e 11.

No banho térmico, os corpos de prova eram colocados em água, na temperatura de 21°C e após alguns minutos, a temperatura atingiu 60°C, observando um ciclo de temperatura, conforme figura 12. Esse ciclo de temperatura foi proposto por Camarini et al. (1995), para que as peças não fossem danificadas com um aumento rápido e excessivo de temperatura. Nesse ciclo, devem-se observar alguns períodos:

- a) T1: temperatura ambiente em °C;
- b) T2: temperatura máxima atingida no ciclo em °C;
- c) to: período de espera em h:min. Período decorrido entre a mistura do aglomerante com a água e o início do aquecimento;
- d) t1: período de elevação da temperatura em h:min;

- e) t2: período de manutenção da temperatura até que se atinja a resistência desejada;
- f) t3: período de resfriamento em h:min;
- g) G1: gradiente de aquecimento;
- h) G2: gradiente de resfriamento.

Figura 10 – Corpos de prova em cura úmida



(fonte: foto da autora)

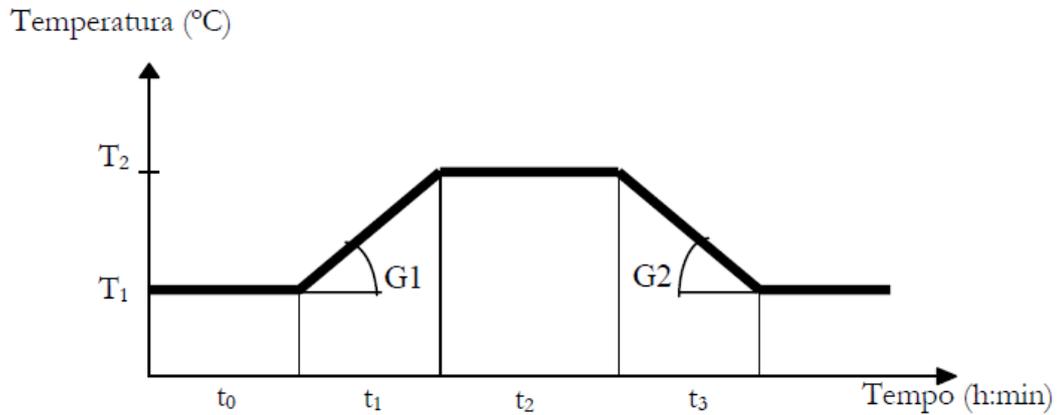
Figura 11 – Corpos de prova em cura térmica



(fonte: foto da autora)

Optou-se pela temperatura de 60°C em virtude dos possíveis prejuízos ocasionados na microestrutura de concretos, em temperaturas superiores a 80°C, conforme Bardella et al (2006). Além disso, o acréscimo de temperatura até o valor ensaiado obedeceu à taxa de aquecimento (G1) de 20°C/h, assim como à taxa de resfriamento (G2), de 20 a 30°C/h. A cura térmica foi realizada em câmara térmica de vapor à pressão atmosférica no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) da UFRGS.

Figura 12 – Ciclo de temperatura utilizado



(fonte: CAMARINI et al., 1995)

6.3.3 Resistência mecânica à compressão

Os ensaios para a determinação da resistência mecânica à compressão foram realizados conforme a NBR 7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), nos tempos de cura de 3, 7 e 28 dias para os três traços moldados. Antes do ensaio, os corpos de prova foram retificados nas duas superfícies de contato, a fim de obter uma distribuição homogênea de tensão sobre a área da unidade de teste. Os rompimentos ocorreram em uma prensa hidráulica computadorizada no LAMTAC. As figuras 13 e 14 apresentam respectivamente imagens dos corpos de prova, antes e durante o ensaio mecânico.

Figura 13 – Base do corpo de prova retificado



(fonte: foto da autora)

Figura 14 – Ruptura do corpo de prova



(fonte: foto da autora)

Após o rompimento dos corpos de prova, foi selecionada uma unidade de teste de cada traço, as quais resultaram em um valor médio de resistência à compressão em relação à amostra, para serem analisados quanto a sua microestrutura. Para que as reações de hidratação cessassem na idade em que foram rompidas, as unidades testes selecionadas foram embebidas de uma solução com 99% de álcool, a fim de paralisar as reações internas de hidratação, ocorrendo assim, a evaporação da água, conforme ilustrado na figura 15.

Figura 15 – Fragmentos da unidade teste embebido de álcool

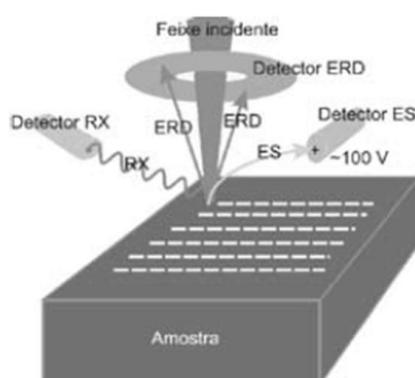


(fonte: foto da autora)

6.3.4 Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica utilizada para caracterização da microestrutura de matrizes cimentícias em várias escalas, em função de sua elevada resolução espacial e magnificação. Quando um feixe de elétrons primários atinge uma massa sólida, os elétrons são refletidos ou absorvidos, gerando padrões de sinais. A intensidade dos elétrons refletidos é proporcional ao número atômico das substâncias no objeto e a densidade do material. Elétrons secundários (ES), retroespalhados (EDS) e raios-x são alguns sinais empregados para microanálises, conforme figura 16 (SARKAR et al., 2000)

Figura 16 – Representação esquemática da configuração de detecção gerada pelo MEV e a amostra



(fonte: COSTA et al., 2009)

No modo ES, os elétrons emitidos são resultado da colisão inelástica entre os átomos da amostra e os elétrons incididos, produzidos junto à superfície da amostra, possibilitando imagens de alta resolução e detalhes topográficos. O modo de visualização com sinal de ES é utilizado para análise de superfícies de fratura como também para caracterização da morfologia das fases presentes, objetivando a identificação dos produtos de hidratação formados (COSTA et al., 2009).

No modo EDS, os elétrons incidentes na amostra originam fótons de raios-x de acordo com a energia do elemento químico incidente. Com isso, é possível obter mapas de distribuição dos elementos químicos presentes na amostra, permitindo a caracterização da composição química

do material. Porém, é necessário cuidado na interpretação dos resultados, devido ao sinal ter origem em mais de uma fase (COSTA et al., 2009).

No presente trabalho, as amostras dos três proporcionamentos, escolhidas pelo critério de resistência à compressão média obtida dentre a população ensaiada, foram observadas no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFRGS, no microscópio modelo JSM 5800, com intensidade de corrente de 20 Kv, no modo EDS e no microscópio eletrônico modelo JSM 6060, com intensidade de corrente de 20 Kv, no modo ES, sendo que todas as amostras foram metalizadas com ouro, figuras 17 e 18.

Figura 17 – Amostras metalizadas com ouro



(fonte: foto da autora)

Figura 18 – Microscópio eletrônico JSM 5800



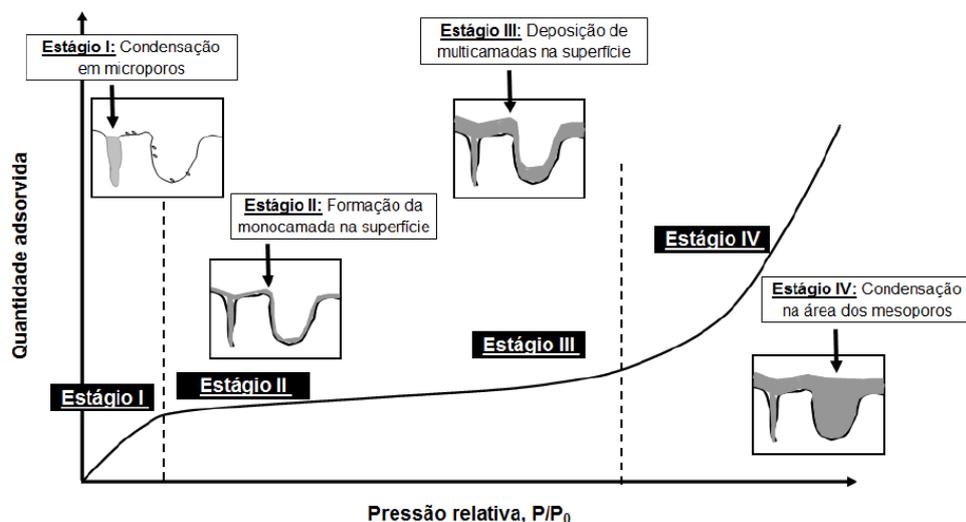
(fonte: foto da autora)

6.3.5 Adsorção física

A adsorção física é definida por Pena et al.⁶ (2006 apud OLIVEIRA, 2010) como um fenômeno resultante da força de van der Waals entre as moléculas do gás e a superfície do sólido. As moléculas gasosas se acumulam na superfície do sólido, conforme esquematizado na figura 19.

⁶ PENA, E. Q., VIEIRA, C. B., SILVA, C. A., SILVA, F. G. Aplicação do método de adsorção de nitrogênio para caracterização dos parâmetros de porosidade de *pellet feed* de minérios de ferro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 7., 2006, Ouro Preto. **Anais...**São Paulo: ABM, 2006, p. 473-482.

Figura 19 – Processo de adsorção física e sua isoterma



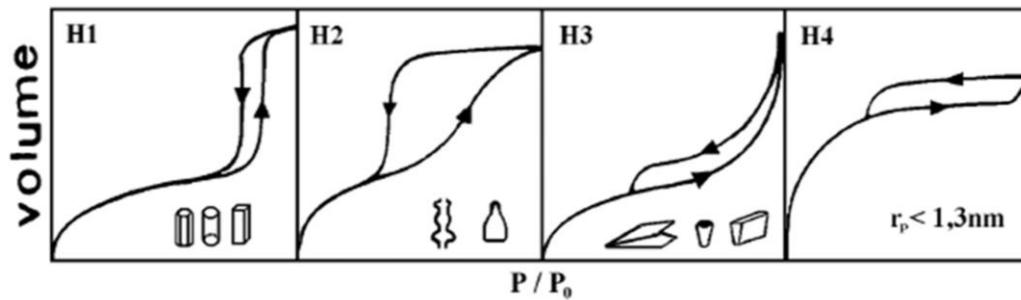
(fonte: PENA et al.⁷, 2006 apud OLIVEIRA, 2010)

A isoterma é determinada pela etapa de adsorção e dessorção, onde a primeira consiste no confinamento da amostra exposta a uma quantidade de gás a temperatura constante (77 K). Com a adsorção, a pressão vai decrescendo até que o equilíbrio do sistema seja reestabelecido. Esse procedimento é repetido, aumentando a quantidade de gás até que ocorra a condensação. A dessorção é o oposto da adsorção, nessa etapa ocorre a formação de histerese, a qual é resultado da diferença entre a condensação e a evaporação, sendo sua forma determinada pela geometria dos poros. As histereses podem ser classificadas em quatro tipos, de acordo com a classificação de De Boer adaptada pela *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), conforme figura 20:

- a) H1: poros regulares de formato cilíndrico ou poliédrico com as extremidades abertas;
- b) H2: poros cilíndricos abertos e fechados, com morfologia tipo garrafa;
- c) H3: poros com morfologia tipo cunha, cone ou placas paralelas;
- d) H4: poros com raio < 1,3 nm, com morfologia indefinida.

⁷ PENA, E. Q., VIEIRA, C. B., SILVA, C. A., SILVA, F. G. Aplicação do método de adsorção de nitrogênio para caracterização dos parâmetros de porosidade de *pellet feed* de minérios de ferro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 7., 2006, Ouro Preto. *Anais...*São Paulo: ABM, 2006, p. 473-482.

Figura 20 – Classificação das histereses segundo De Boer adaptado pela IUPAC



(fonte: SANTILLI; PULCINELLI⁸, 1993 apud OLIVEIRA, 2010)

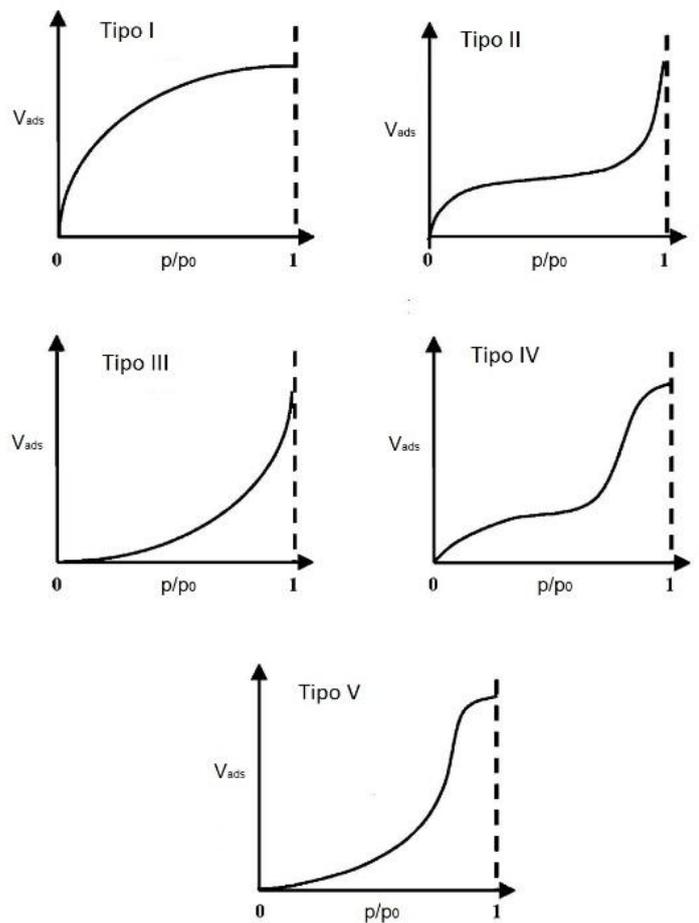
Lowell e Shields⁹ (1984 apud OLIVEIRA, 2010), as curvas isotermas podem ser classificadas em cinco tipos, conforme ilustra figura 21, sendo:

- a) isoterma tipo I: ocorre em materiais microporos, onde o tamanho do poro não excede o tamanho das moléculas do adsorbato, sendo mínima a adsorção quando os poros são preenchidos pelo gás ao elevar as pressões;
- b) isoterma tipo II: ocorre em materiais macroporosos ou não porosos, onde a adsorção é irrestrita e infinita a partir da segunda e das demais camadas de gás adsorvida;
- c) isoterma tipo III: ocorre em materiais macroporosos ou não porosos, porém o calor de adsorção é menor que o de liquefação do adsorbato, sendo o calor de adsorção praticamente nulo;
- d) isoterma tipo IV: ocorre em materiais mesoporosos, sendo identificada pela presença de um degrau na curva em pressões relativas altas;
- e) isoterma tipo V: são correspondentes as de tipo III, ocorrendo um pequeno potencial de interação entre o adsorbato-adsorvente, sendo incomuns.

⁸ SANTILLI, C. V.; PULCINELLI, S. H. Análise da textura de materiais cerâmicos a partir das isotermas de adsorção de gases. **Cerâmica Industrial**: São Paulo, v. 39, n. 1, p. 11-16, 1993.

⁹ LOWELL, S., SHIELDS, J. E. **Powder surface area and porosity**. New York: Chapman e Hall, 2nd ed., 1984.

Figura 21 – Tipos de isoterma



(fonte: LOWELL; SHIELDS¹⁰ 1984 apud OLIVEIRA, 2010)

Para avaliação do tamanho e distribuição dos poros das argamassas produzidas, foi utilizado o método BJH (Barret-Joyner-Halenda), realizado no aparelho modelo Quantachrome Nova 1000, no Lacer. Propriedades como quantidade e forma do poro foram possíveis de quantificar, sendo fundamentais para a avaliação de desempenho quanto à resistência mecânica do sistema ensaiado.

O método BJH utiliza as curvas de adsorção ou dessorção da isoterma para cálculo da distribuição dos poros pela equação de Kelvin, sendo que a aplicação desse método é limitada para faixa do tamanho de mesoporos. Ele fundamenta-se no fato de a condensação e a evaporação do adsorbato ocorrem no centro dos poros, promovendo a formação de

¹⁰ LOWELL, S., SHIELDS, J. E. **Powder surface area and porosity**. New York: Chapman e Hall, 2nd ed., 1984.

multicamadas de adsorbato sobre as paredes do poro. Quando a pressão é aumentada, ocorre o preenchimento do poro com o líquido (adsorção); no momento em que a pressão é reduzida, ocorre a evaporação da camada de adsorbato, ocasionando a dessorção (OLIVEIRA, 2010).

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão dispostos os resultados obtidos nos ensaios realizados para os tempos de cura e os proporcionamentos ensaiados.

7.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

Para o cálculo da resistência à compressão, foram considerados espúrios, os valores que se encontravam fora do intervalo de $1,5 \cdot$ desvio padrão para mais ou para menos e também, os valores que aumentavam o desvio máximo relativo maior que 6%, conforme indica a norma NBR 7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Aplicando esse critério, foram excluídos esses valores para o cálculo do desvio padrão. Os limites superiores e inferiores foram obtidos pelo desvio padrão global, o qual foi calculado como a média dos desvios padrão de cada amostra em cada idade.

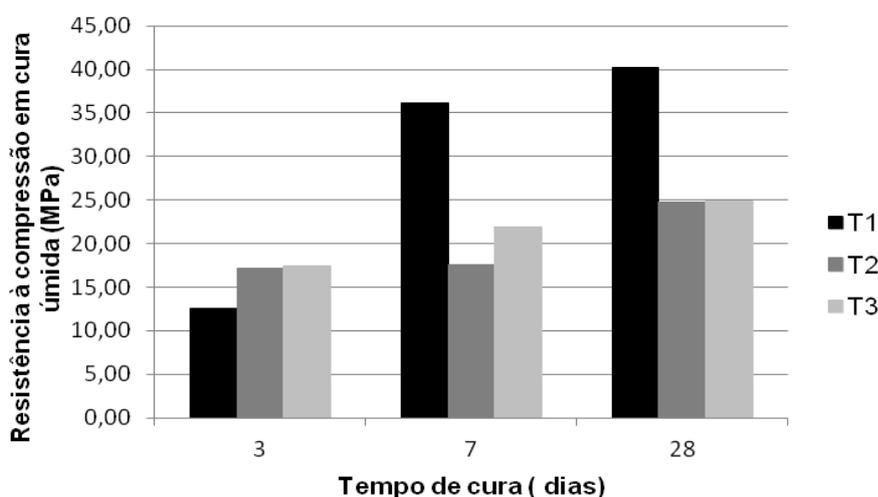
O desvio padrão global para as amostras de 3 dias em cura úmida foi de 1,95 MPa, para as de 7 dias, 1,83 MPa e para as de 28 dias, 1,92 MPa. Para as amostras de 3 dias em cura térmica, o desvio padrão global foi de 4,07 MPa, para as de 7 dias, 4,28 MPa e para as amostra de 28 dias, o desvio foi de 5,25 MPa. No apêndice A, apresentam-se os resultados de resistência à compressão nos três tempos de cura sem os valores espúrios, em cura úmida e em cura térmica, respectivamente.

O desvio padrão global para as amostras em cura úmida, sem os valores espúrios, aos 3 dias, foi de 1,28 MPa. Para os 7 dias de cura, foi de 0,79 MPa e para os 28 dias de cura, o desvio foi de 1,45 MPa. Nas amostras em cura térmica, o desvio padrão global foi de 2,07 MPa aos 3 dias, 1,84 MPa aos 7 dias e 2,30 MPa aos 28 dias de cura. O desvio relativo máximo das amostras T2-3D e T3-7D ainda apresentaram-se acima de 6%, mesmo retirando os valores espúrios, assim como, as amostras T2-3D, T1-7D, T1-28D e T3-28D.

Tratando-se de argamassas de concreto de alto desempenho, não há uma definição de valores aceitáveis para o desvio máximo relativo. Esses desvios foram considerados, pois se trata de um material mais sensível a erros, em decorrência de sua alta resistência. Devido ao

comportamento diferenciado e ao alto valor de desvio máximo relativo, o proporcionamento T2-3D, em cura úmida, foi excluído da população, mesmo apresentando um alto valor de resistência à compressão. Os valores médios das resistências à compressão, sem os valores espúrios, estão expressos nos gráficos a seguir, em cura úmida (gráfico 1) e em cura térmica (gráfico 2).

Gráfico 1 – Resistência à compressão média em cura úmida aos 3, 7 e 28 dias

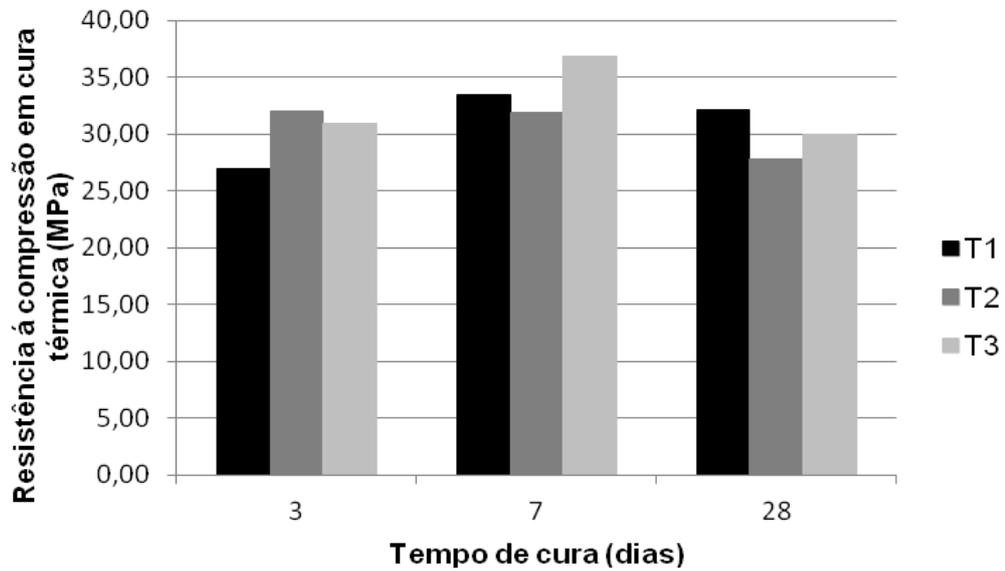


(fonte: elaborado pela autora)

Com base no gráfico 1, é possível analisar que em cura úmida, as máximas resistências foram atingidas pelo proporcionamento T1, o qual teve menor volume de água adicionado a mistura. Os demais proporcionamentos, T2 e T3 se mantiveram com valores de resistência próximos, uma vez que a diferença de volume de água é de aproximadamente 8%. O ganho de resistência em T2 e T3 foi maior aos 28 dias de cura, não havendo grande variação aos 7 dias de cura, quando comparado com os valores obtidos aos 3 dias.

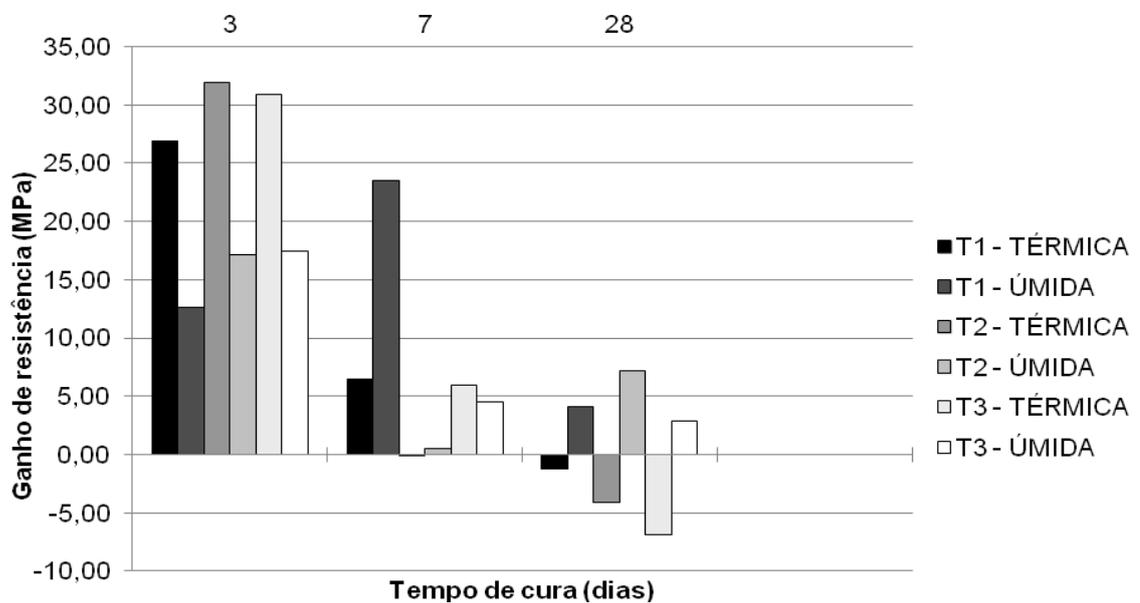
No gráfico 2, os valores das resistências à compressão em cura térmica foram aproximadamente 100% maiores que as resistências em cura úmida, como era de se esperar, devido à ação catalisadora da temperatura em acelerar as reações de hidratação da pasta de cimento. Porém, aos 28 dias de cura, pode-se ver que os três proporcionamento apresentaram uma queda dos valores de resistência. No tempo de cura de 3 dias, as resistências apresentaram valores altos, porém houve pouco incremento de resistência aos 7 dias. No gráfico 3, são apresentados os ganhos nos valores das resistências à compressão ao longo do tempo.

Gráfico 2 – Resistência à compressão média em cura térmica aos 3, 7 e 28 dias



(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 3 – Ganho de resistência à compressão dos três proporcionamentos



(fonte: elaborado pela autora)

7.2 ADSORÇÃO FÍSICA

A tabela 6 apresenta os valores obtidos nos ensaios de adsorção física pelo Método BJH. São listados os valores do raio médio dos poros, da área superficial e do volume dos poros das amostras ensaiadas aos 3 e 28 dias de cura. Foram realizados os ensaios apenas nesses tempos de cura, pois a variação de resistência foi maior nesse intervalo de tempo, tanto para cura úmida quanto para a térmica.

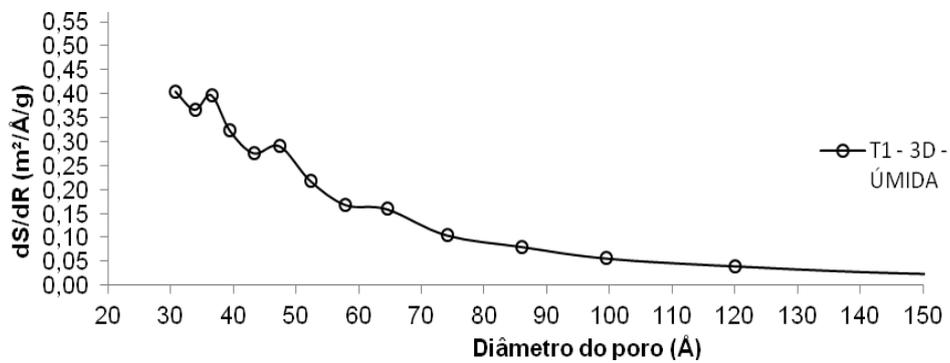
Tabela 6 – Área superficial, volume do poro, raio e diâmetro médio das amostras

| TRAÇO | Raio médio (Å) | Diâmetro médio (nm) | Área Superficial (m ² /g) | Volume do poro (cm ³ /g) |
|--------------------|-------------------|------------------------|---|--|
| 3 DIAS | | | | |
| T1 - 3D - TÉRMICA | 15,46 | 309,14 | 10,75 | 0,034 |
| T1 - 3D - ÚMIDA | 17,28 | 345,50 | 8,96 | 0,027 |
| T2 - 3D - TÉRMICA | 15,25 | 304,94 | 10,48 | 0,040 |
| T2 - 3D - ÚMIDA | 16,66 | 333,10 | 9,19 | 0,029 |
| T3 - 3D - TÉRMICA | 17,00 | 339,98 | 10,65 | 0,040 |
| T3 - 3D - ÚMIDA | 19,82 | 396,32 | 7,14 | 0,025 |
| 28 DIAS | | | | |
| T1 - 28D - TÉRMICA | 16,80 | 335,96 | 5,71 | 0,017 |
| T1 - 28D - ÚMIDA | 15,32 | 306,44 | 7,15 | 0,027 |
| T2 - 28D - TÉRMICA | 16,58 | 331,56 | 5,91 | 0,028 |
| T2 - 28D - ÚMIDA | 15,39 | 307,74 | 5,03 | 0,023 |
| T3 - 28D - TÉRMICA | 17,98 | 359,54 | 8,28 | 0,037 |
| T3 - 28D - ÚMIDA | 15,16 | 303,24 | 7,23 | 0,027 |

(fonte: elaborado pela autora)

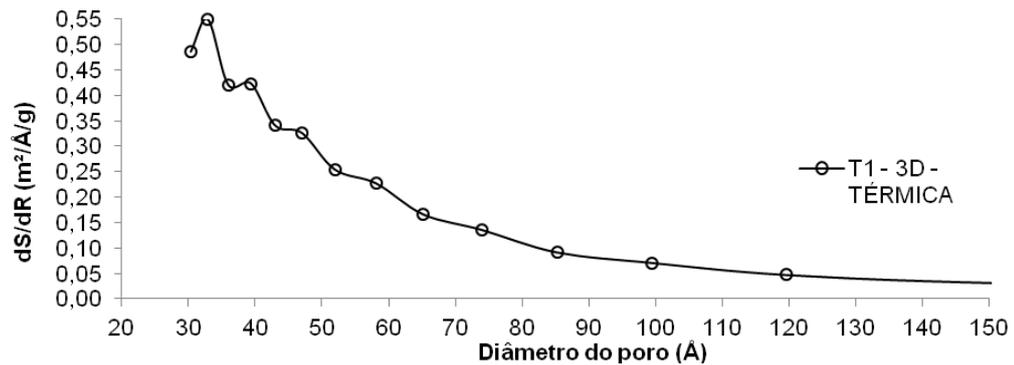
Nos gráficos 4 a 15, estão apresentadas as curvas em função da área dos poros e os diâmetros, na forma $dS/dR = f(R)$, onde S é a área superficial e R é a largura do poro, para os proporcionamentos T1, T2 e T3 para os tempos de cura de 7 e 28 dias em cura térmica e úmida.

Gráfico 4 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T1 – 3 dias – Cura úmida



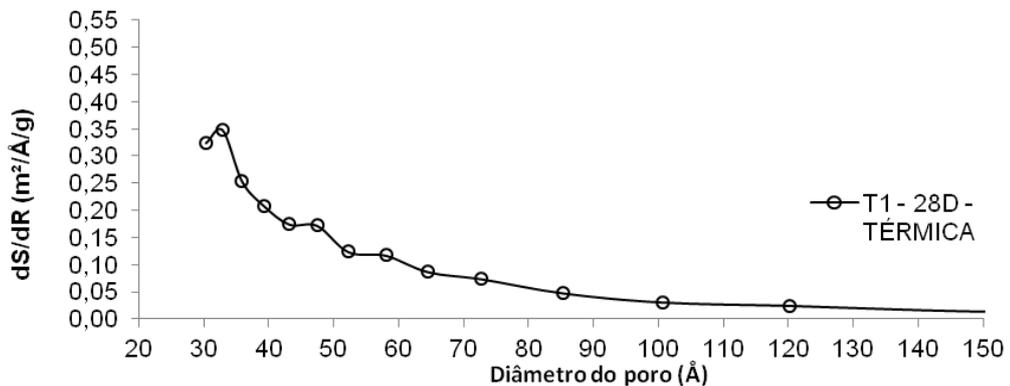
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 5 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T1 – 3 dias – Cura térmica



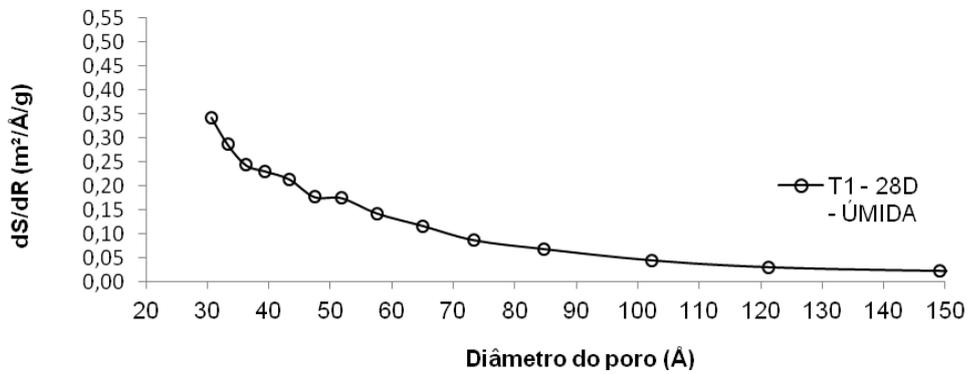
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 6 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T1 – 28 dias – Cura térmica



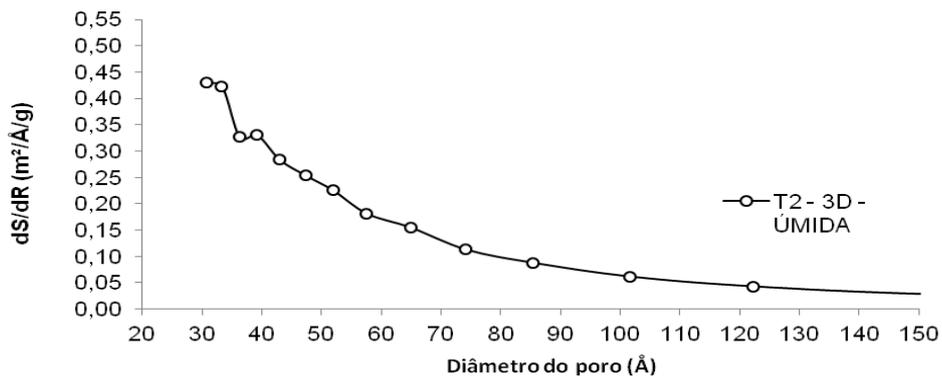
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 7 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T1 – 28 dias – Cura úmida



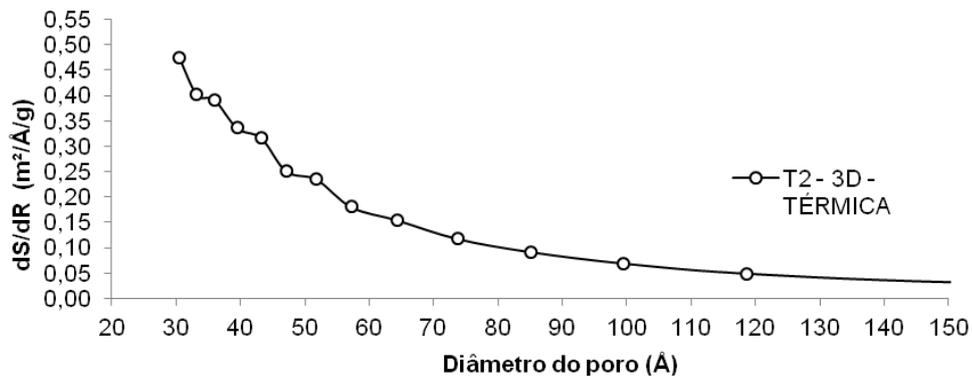
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 8 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T2 – 3 dias – Cura úmida



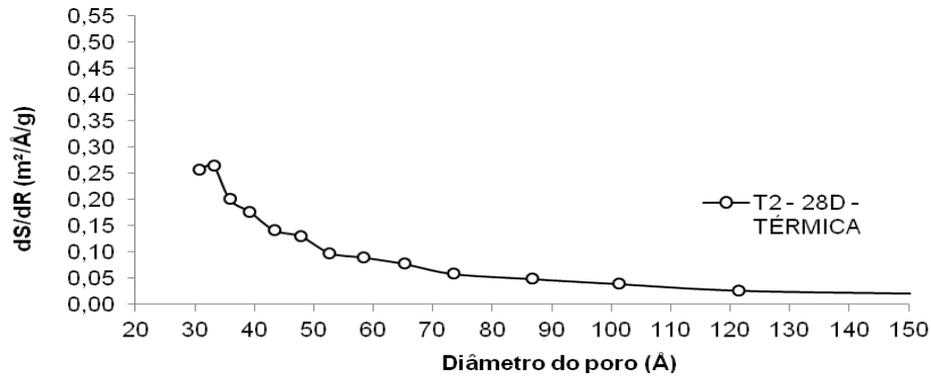
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 9 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T2 – 3 dias – Cura térmica



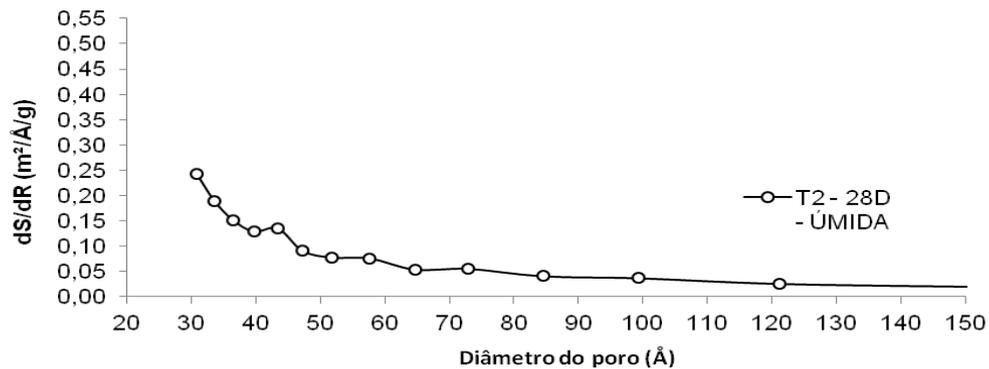
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 10 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T2
– 28 dias – Cura térmica



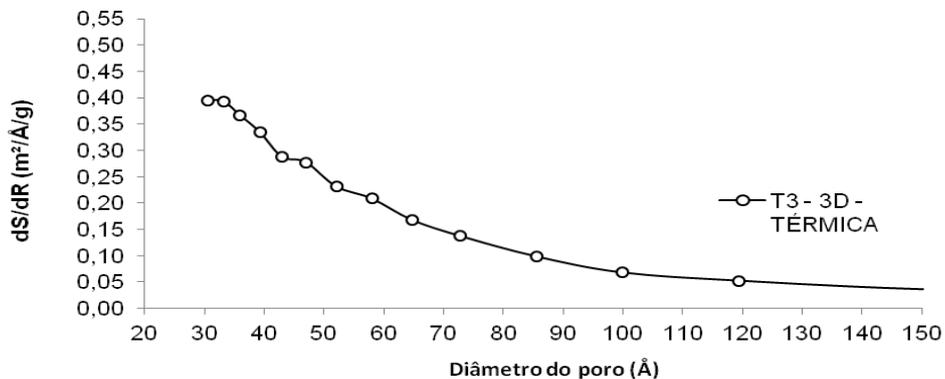
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 11 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T2
– 28 dias – Cura úmida



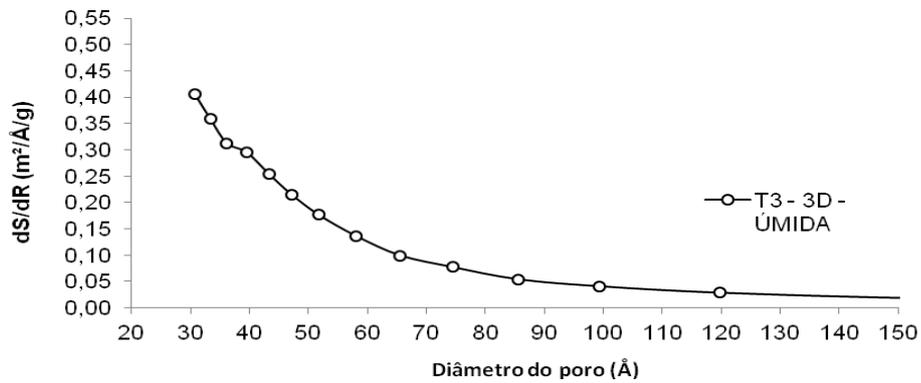
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 12 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T3
– 3 dias – Cura térmica



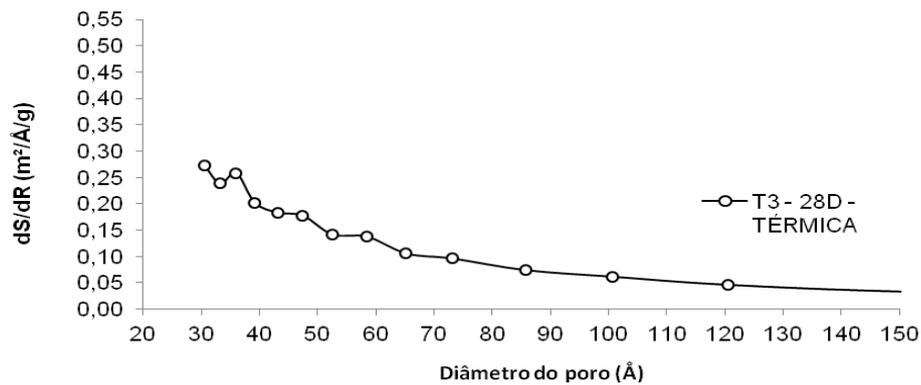
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 13 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T3
– 3 dias – Cura úmida



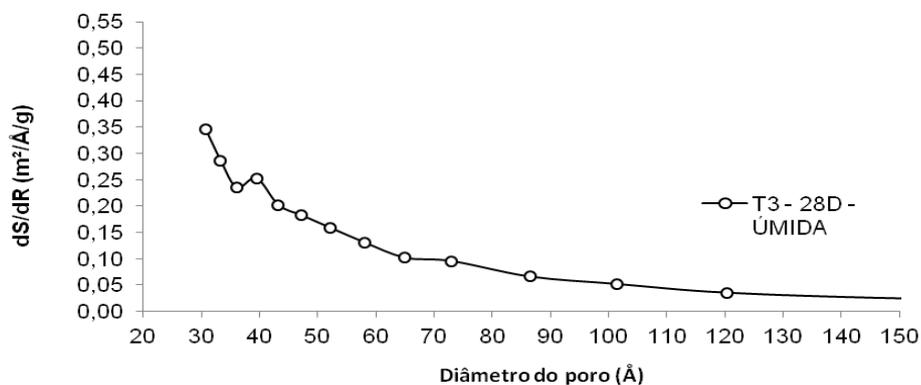
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 14 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T3
– 28 dias – Cura térmica



(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 15 – Distribuição da área superficial dos poros em função do diâmetro – T3
– 28 dias – Cura úmida



(fonte: elaborada pela autora)

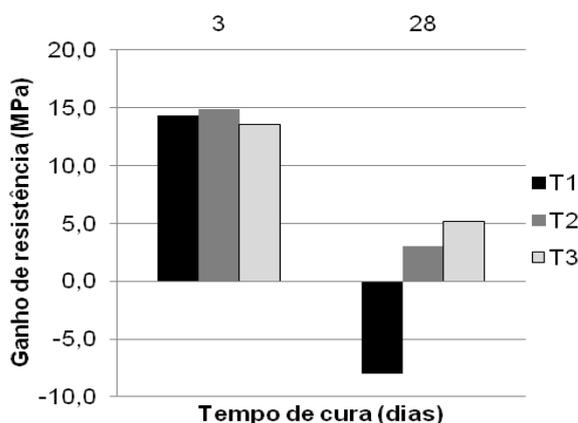
A distribuição de poros, para todas as amostras, manteve-se constante tanto para cura térmica como para cura úmida, conforme se pode observar nos gráficos 4 a 15. O diâmetro dos poros manteve-se na faixa dos 30 a 36 Å, classificando-se como mesoporos, conforme tabela 7. Aos três dias de cura, as amostras submetidas à cura úmida apresentaram poros com diâmetro maiores, ao passo que, aos 28 dias de cura, apresentaram diâmetros menores do que as amostras submetidas a cura térmica. O ganho do tamanho do poro está relacionado com os valores de resistência mecânica atingidos, pois aos 28 dias de cura térmica, as resistências diminuem e o tamanho de poros aumenta. Já aos 3 dias, há um ganho positivo de resistência mecânica e o tamanho do poro diminui, conforme gráficos 16 e 17.

Tabela 7 – Classificação do tamanho de poros conforme diâmetro

| Classificação | Diâmetro (Å) |
|---------------|----------------------|
| Microporo | $\varphi < 20$ |
| Mesoporo | $20 < \varphi < 500$ |
| Macroporo | $\varphi > 500$ |

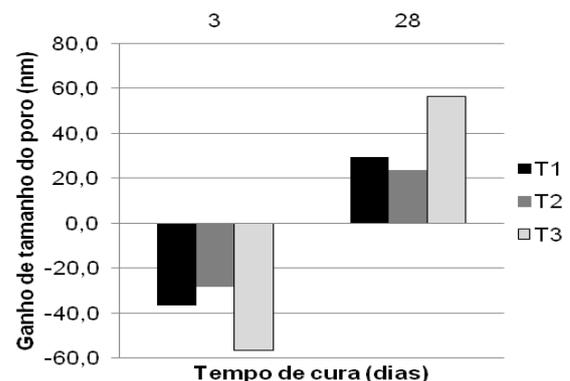
(fonte: SING et al.¹¹, 1985 apud OLIVEIRA, 2010)

Gráfico 16 – Ganho de resistência da cura térmica em comparação a cura úmida



(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 17 – Ganho do tamanho do poro em cura térmica em comparação com a cura úmida

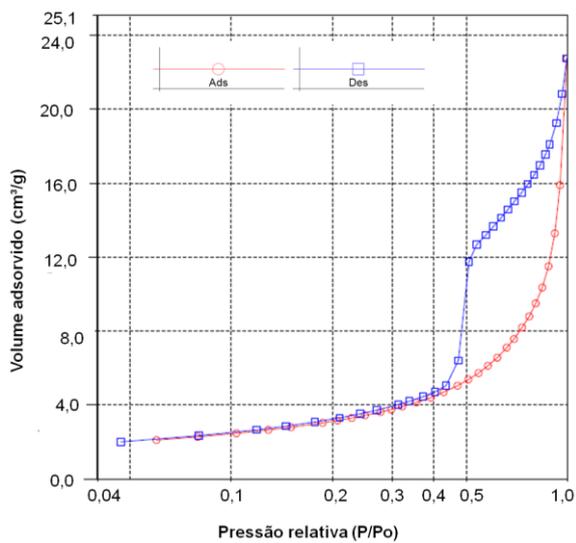


(fonte: elaborado pela autora)

¹¹ SING, K. S. W.; EVERETT, D. H.; HAUL, R. A. W.; MOSCOU, L.; PIEROTTI, R. A.; ROUQUÉROL, J.; SIEMIENIEWSKA, T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. **Pure & Applied Chemistry**, v. 57, n. 4, p. 603-619, 1985.

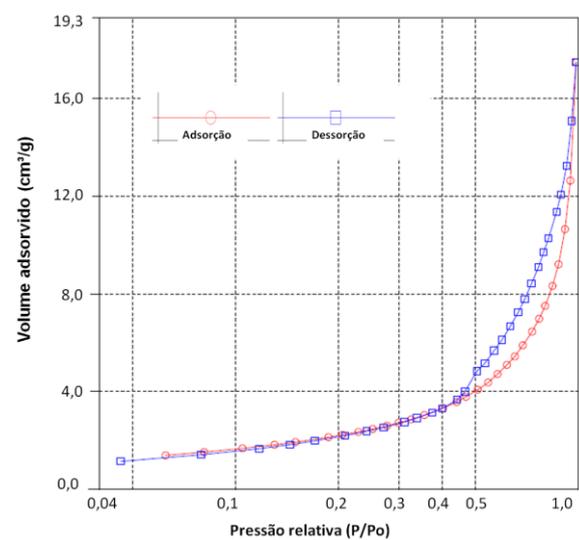
Pela adsorção física, foi possível obter as isotermas de cada amostra ensaiada. Conforme Lowell e Shields¹² (1984 apud OLIVEIRA, 2010), as isotermas de adsorção de todas as amostras, classificaram-se como isotermas do tipo III, as quais ocorrem em materiais macroporos ou não porosos. Com relação à caracterização das histereses formadas, de acordo com a classificação de De Boier, conforme Santilli e Purchenelli¹³ (1993 apud OLIVEIRA, 2010), todas as amostras apresentaram histereses do tipo H3, caracterizando poros com morfologia de cunha, cones ou placas paralelas.

Gráfico 18 – Isoterma T1 – 3D – Cura térmica



(fonte: elaborada pela autora)

Gráfico 19 – Isoterma T1 – 3D – Cura úmida

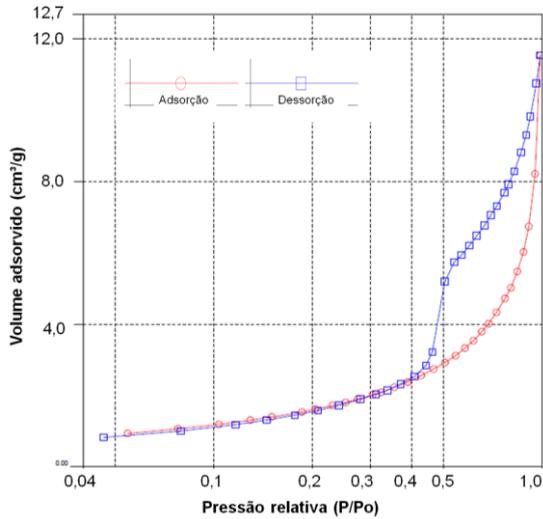


(fonte: elaborada pela autora)

¹² LOWELL, S., SHIELDS, J. E. **Powder surface area and porosity**. New York: Chapman e Hall, 2nd ed., 1984.

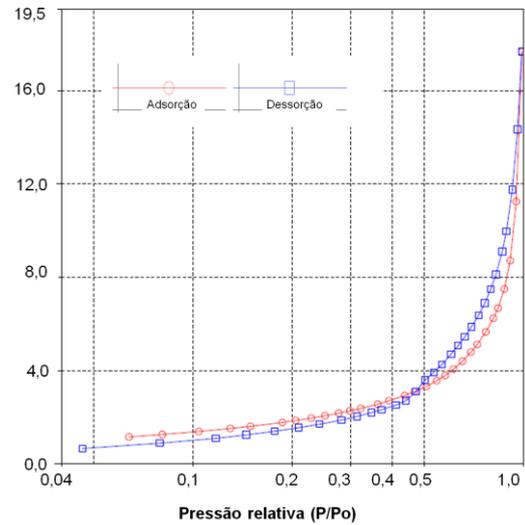
¹³ SANTILLI, C. V.; PULCINELLI, S. H. Análise da textura de materiais cerâmicos a partir das isotermas de adsorção de gases. **Cerâmica Industrial**: São Paulo, v. 39, n. 1, p. 11-16, 1993.

Gráfico 20 – Isoterma T1 – 28D – Cura térmica



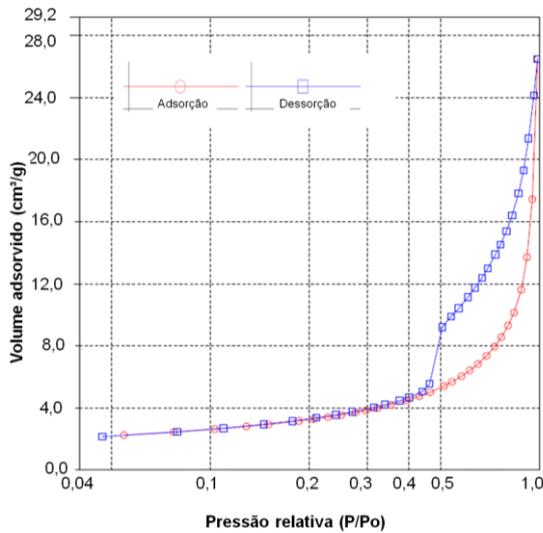
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 21 – Isoterma T1 – 28D – Cura úmida



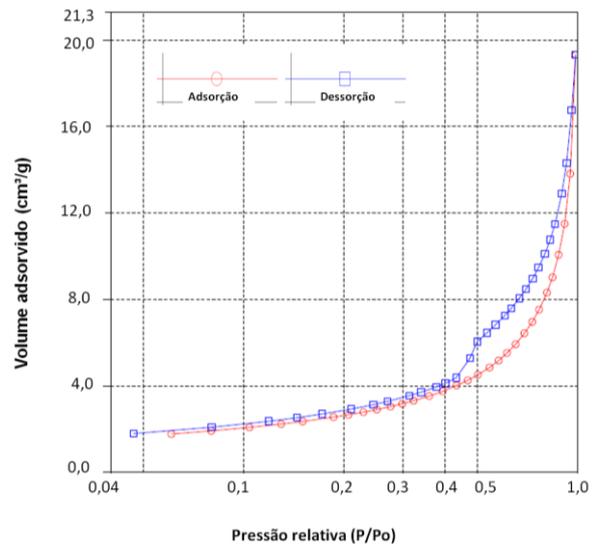
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 22 – Isoterma T2 – 3D – Cura térmica



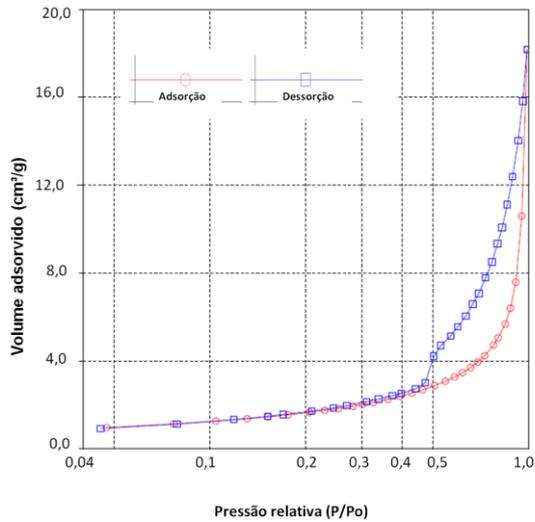
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 23 – Isoterma T2 – 3D – Cura úmida



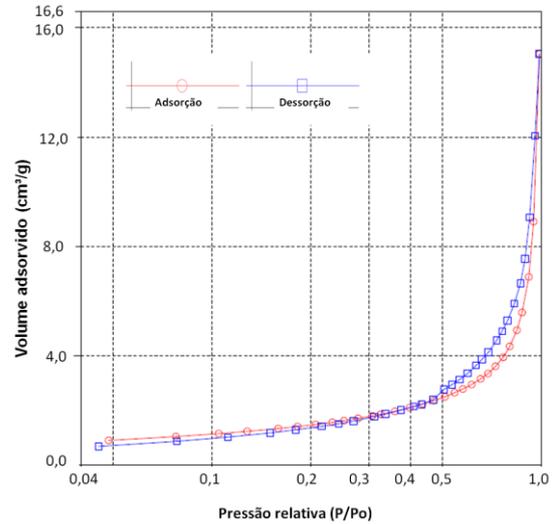
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 24 – Isoterma T2 – 28D – Cura térmica



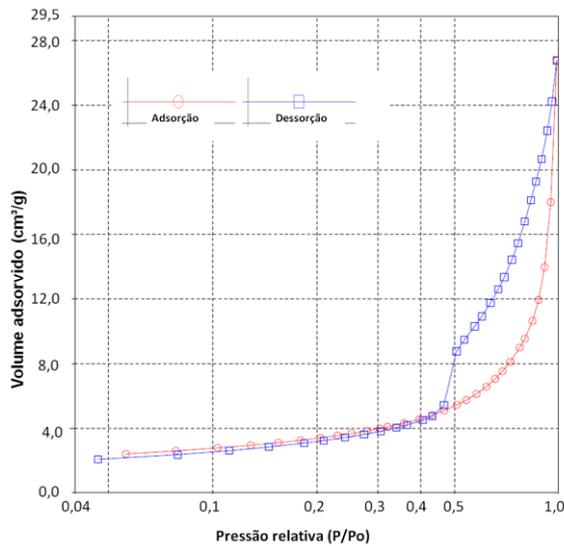
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 25 – Isoterma T2 – 28D – Cura úmida



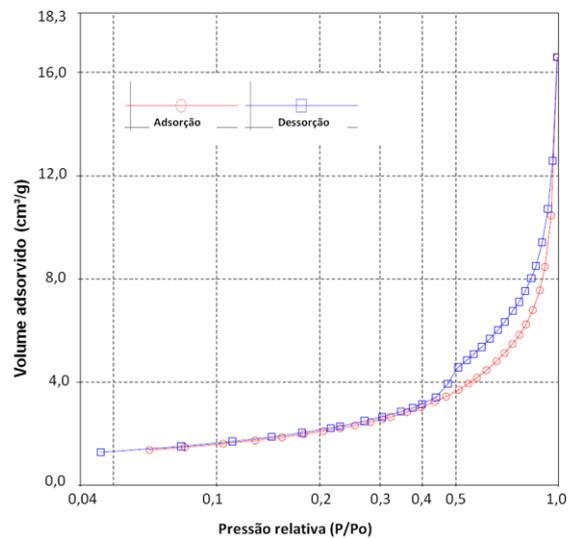
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 26 – Isoterma T3 – 3D – Cura térmica



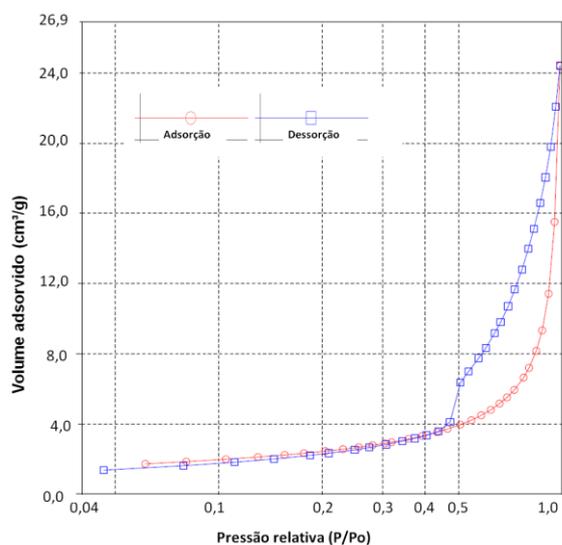
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 27 – Isoterma T3 – 3D – Cura úmida



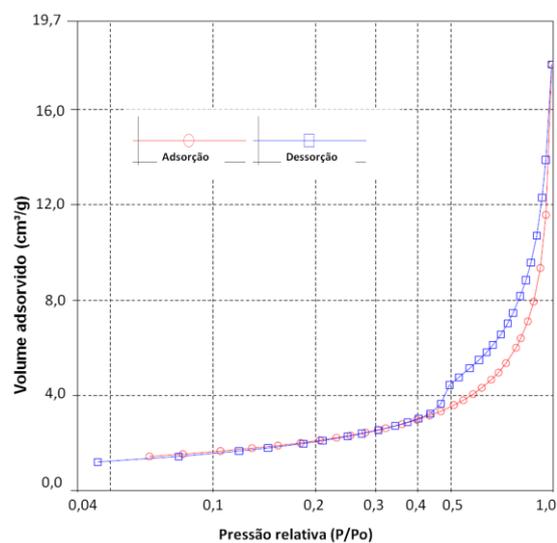
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 28 – Isoterma T3 – 28D – Cura térmica



(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 29 – Isoterma T3 – 28D – Cura úmida



(fonte: elaborado pela autora)

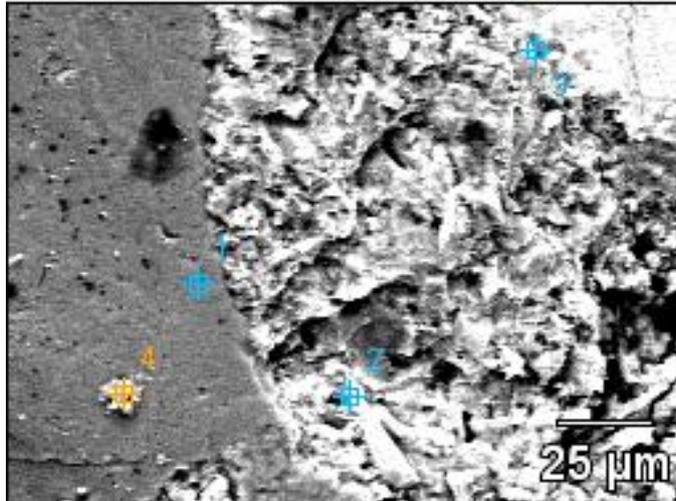
7.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A análise qualitativa das fases presentes e a morfologia dos produtos de hidratação formados foram identificadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) por meio de imagens através dos elétrons retroespalhados e elétrons secundários.

Na figura 22, para o traço T1 aos 3 dias de cura úmida, se visualiza a interação zona entre a matriz de cimento e o agregado miúdo representado pelo ponto 1. Pelos espectros de raios-x ilustrados na figura 23, se conclui que os pontos 2, 3 e 4 são os produtos originados da hidratação do cimento, sendo que, os pontos 2 e 4 são as fases anidro e o ponto 4 é a fase C-H ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), conforme as relações em percentuais de cada fase formada.

A figura 24 ilustra aos 3 dias, em cura térmica, o proporcionamento T1 com os produtos melhor hidratados e bem desenvolvidos, com relação ao exposto à cura úmida, com a ocorrência da fase etringita dentro de um espaço vazio. Na figura 25, se identifica a fase C-H em uma matriz de cimento bem compacta e densa, formada por grãos anidro.

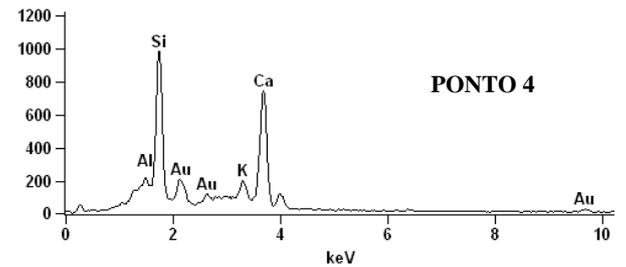
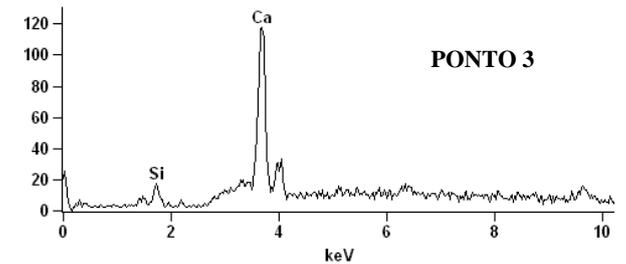
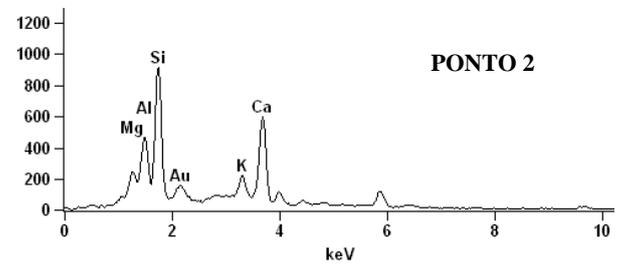
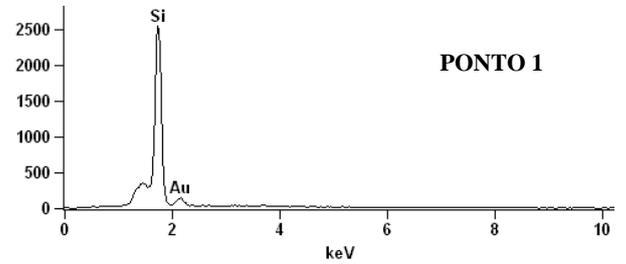
Figura 22 – Imagem em modo EDS da amostra T1 –
Cura úmida (3 dias)



| RELAÇÕES EM % | | | |
|---------------|-------|-------|------------|
| Ponto | Ca/Si | Al/Ca | Ca/(Si+Al) |
| 1 | - | - | - |
| 2 | 1,22 | 0,33 | 0,87 |
| 3 | 16,12 | - | 16,12 |
| 4 | 1,70 | 0,03 | 1,63 |

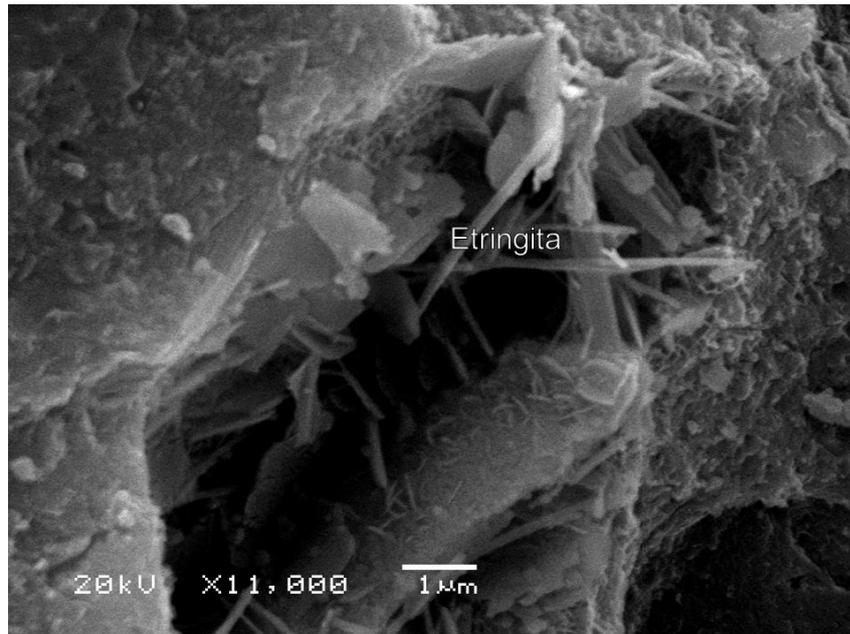
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 23 – Espectros de raios-X da amostra T1 –
Cura úmida (3 dias)



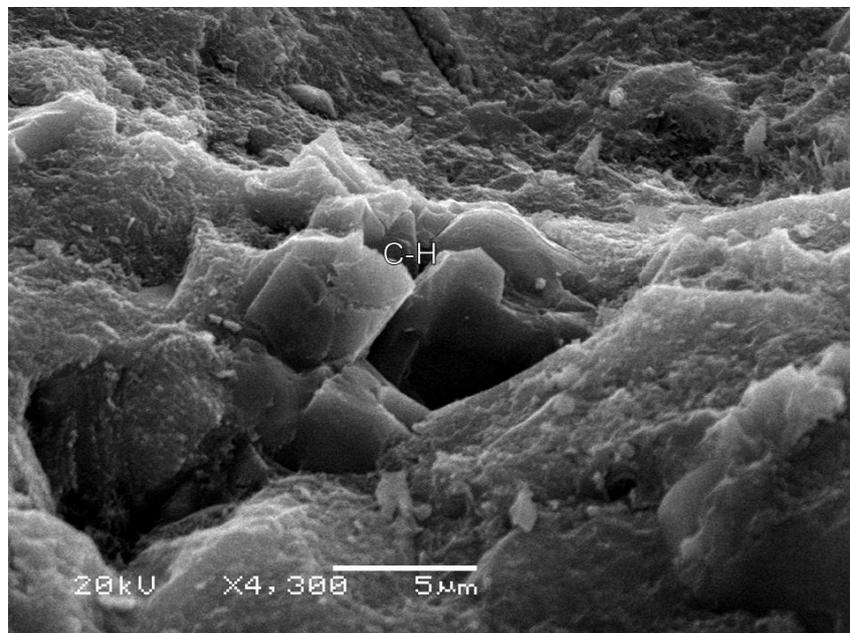
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 24 – Imagem em ES da amostra T1 – Cura térmica (3 dias)



(fonte: foto da autora)

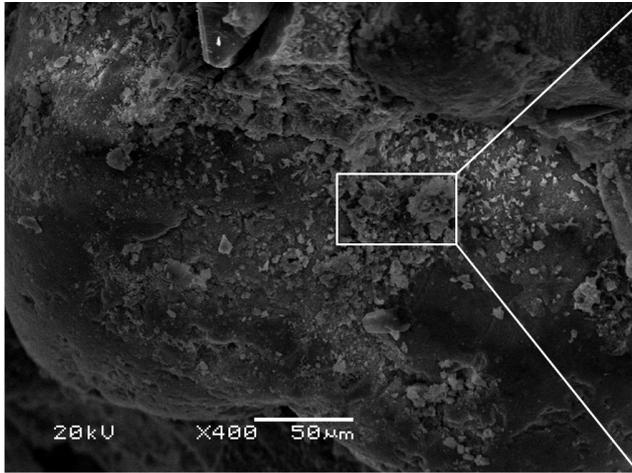
Figura 25 – Imagem em ES da amostra T1 – Cura térmica (3 dias)



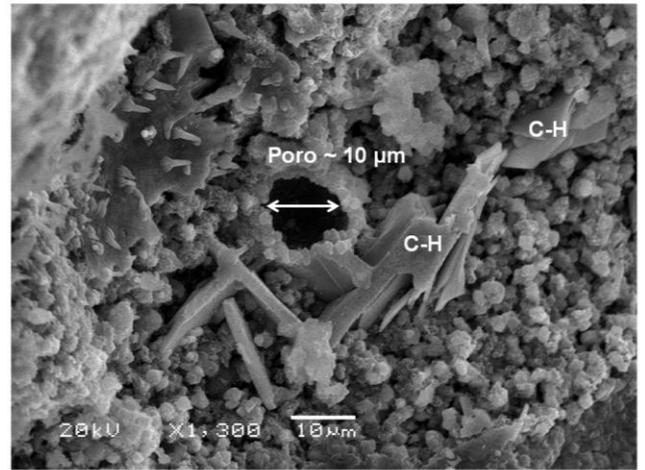
(fonte: foto da autora)

Na figura 26, pode-se observar a hidratação do cimento ao redor do agregado, ocorrendo a formação da fase C-H, aos 3 dias de cura térmica, no proporcionamento T2.

Figura 26 – Imagem no modo ES da amostra T2 – Cura térmica (3 dias)



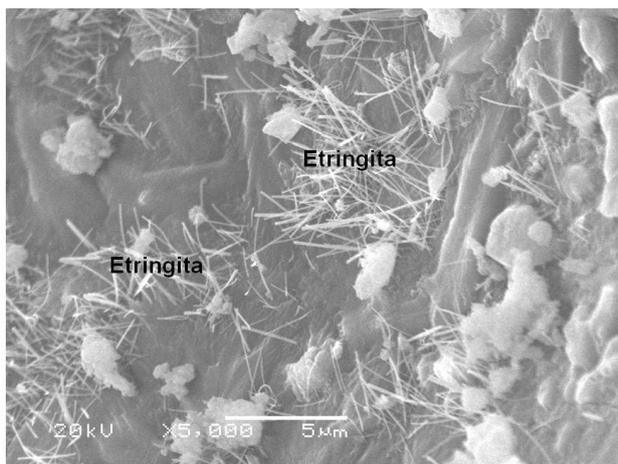
(fonte: foto da autora)



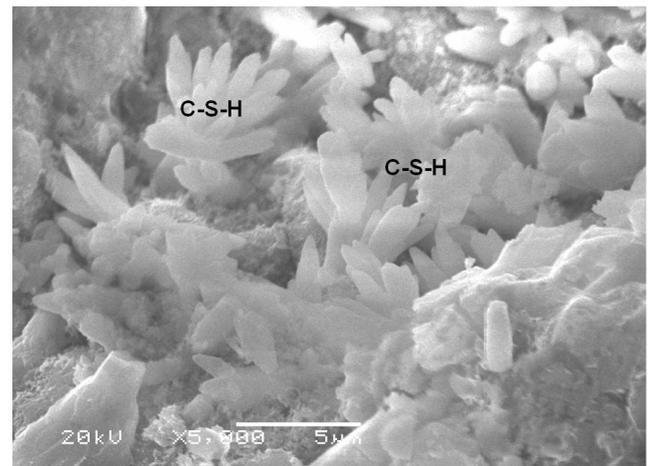
(fonte: foto da autora)

Na figura 27, pode-se visualizar a formação de duas fases de hidratação do cimento, a fase C-S-H e a fase etringita, aos 3 dias de cura úmida, no proporcionamento T2. Nessa idade, os cristais de C-S-H continuam crescendo e ocorre a formação da fase etringita, em forma de agulhas.

Figura 27 – Imagem no modo ES da amostra T2 – Cura úmida (3 dias)



(fonte: foto da autora)



(fonte: foto da autora)

Na figura 28, o proporcionamento T3, aos 3 dias de cura úmida, já apresenta a formação de cristais de etringita, em uma matriz pouco homogênea, conforme identificado pelo espectro de raios-x do ponto na figura 29. Na figura 30, aos 3 dias de cura térmica, há a formação das fases etringita e C-H, com cristais mais desenvolvidos e com tamanho maiores, aproximadamente 4 μm ., ao passo que na cura úmida, na mesma idade, os cristais dessa fase se apresentavam menores, no tamanho, aproximadamente, de 1 μm .

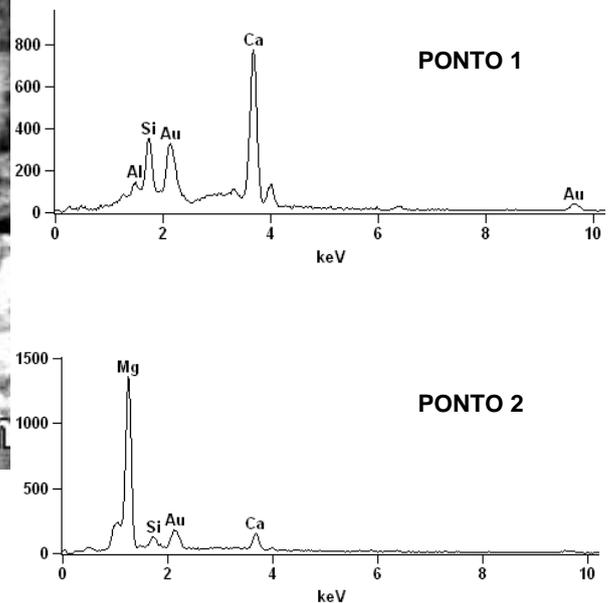
Figura 28 – Imagem em EDS da amostra T3 – Cura úmida (3 dias)



| RELAÇÕES EM % | | | |
|---------------|-------|-------|------------|
| Ponto | Ca/Si | Al/Ca | Ca/(Si+Al) |
| 1 | 5,85 | 0,03 | 4,87 |
| 2 | 2,26 | - | 2,26 |

(fonte: foto da autora)

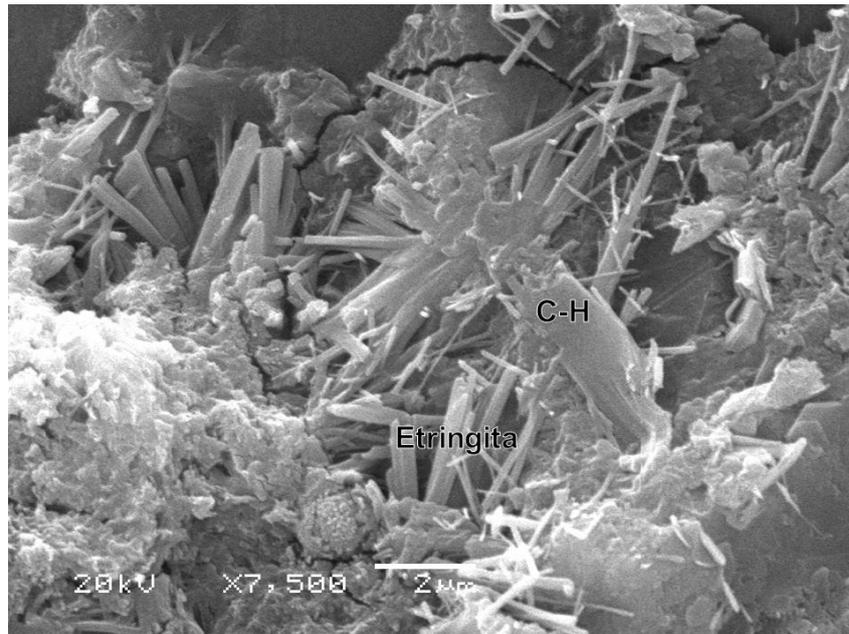
Figura 29 – Espectros de raios-x da amostra T3 – Cura úmida (3 dias)



(fonte: foto da autora)

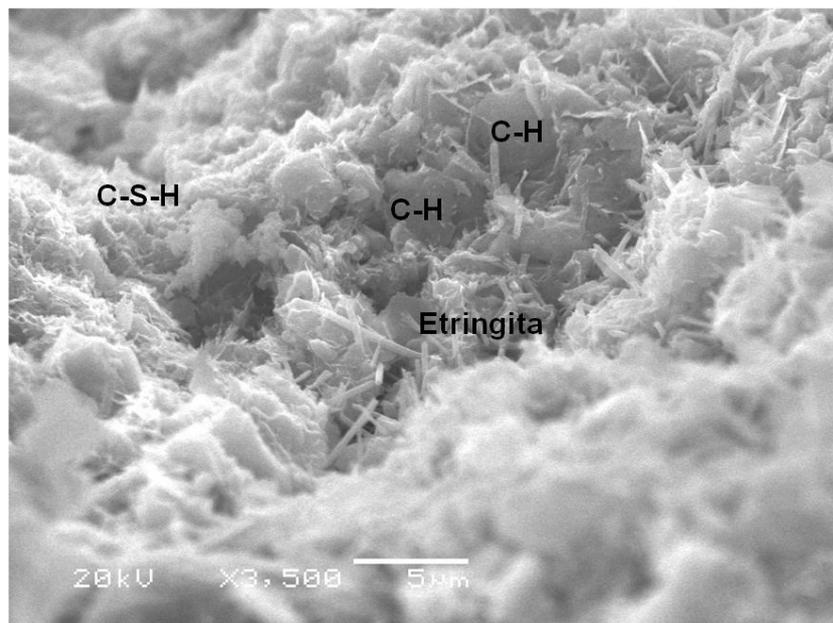
Na figura 31, observa-se a formação das três fases de hidratação do cimento, aos 28 de cura úmida, no proporcionamento T2. A fase C-S-H é composta por favos, em grande quantidade, a fase etringita é formada por agulhas e a C-H, por estruturas prismáticas. Nota-se que a organização na formação das estruturas é bastante heterogênea, ocorrendo a superposição das três fases. Observa-se na figura 33, aos 28 dias de cura térmica, no proporcionamento T2, a formação de fissuras ao longo dos planos de clivagem das partículas de C-H. Essas partículas estão bem cristalizadas e se caracterizam por afetar negativamente a resistência mecânica, devido aos planos de clivagem formados no momento da ruptura das argamassas.

Figura 30 – Imagem em ES da amostra T3 – Cura térmica (3 dias)



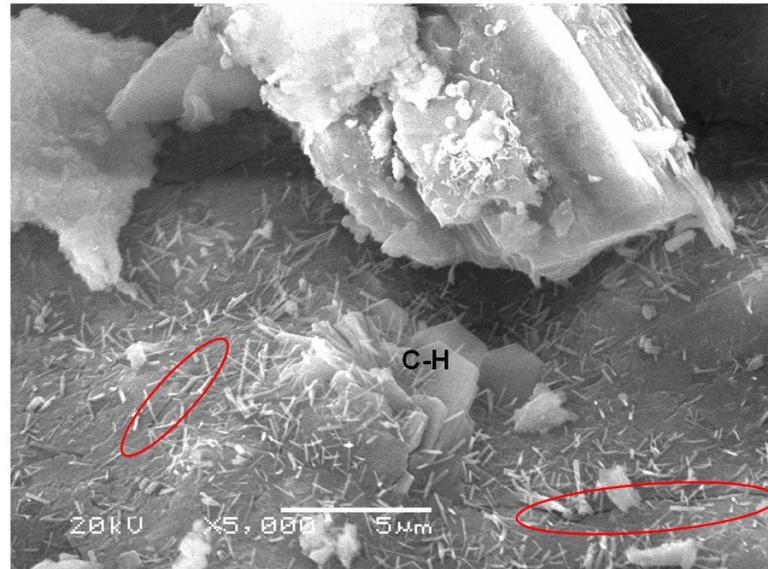
(fonte: foto da autora)

Figura 31 – Imagem no modo ES da amostra T2 – Cura úmida (28 dias)



(fonte: foto da autora)

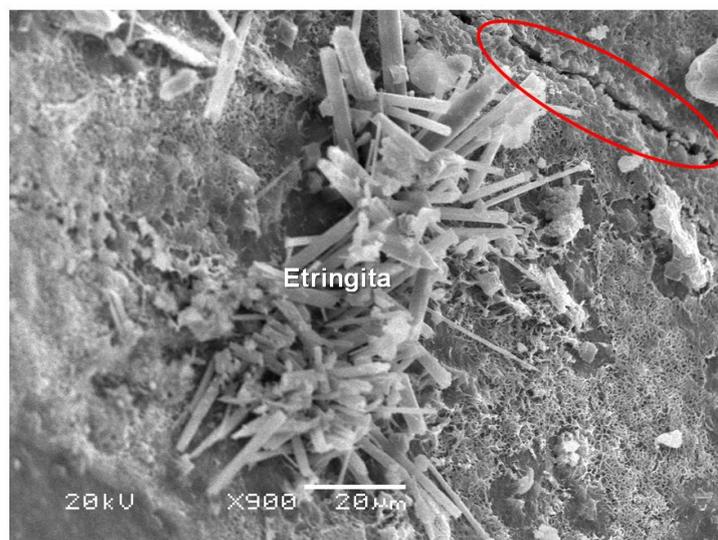
Figura 32 – Imagem no modo ES da amostra T2 – Cura térmica (28 dias)



(fonte: foto da autora)

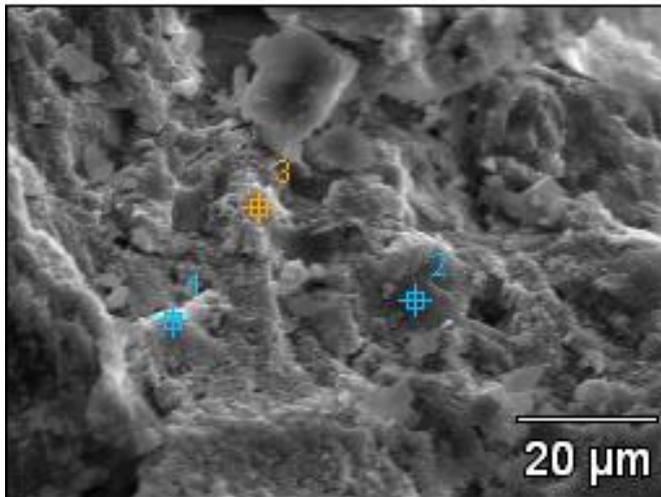
Na figura 33, no proporcionamento T1, é possível observar a formação da fase etringita bem desenvolvida, com uma morfologia de agulhas, aos 28 dias de cura térmica. Nota-se a presença de uma microfissura na matriz da argamassa, conforme elipse em vermelho. A figura 34 mostra uma imagem no modo de visualização EDS, com aumento de 1400 vezes. A matriz é mais heterogênea, a fase C-S-H é identificada pelos dois pontos, conforme os espectros de raios-X dos pontos 1 e 2, da figura 35 e pelas relações em %.

Figura 33 – Imagem no modo ES da amostra T1 – Cura térmica (28 dias)



(fonte: foto da autora)

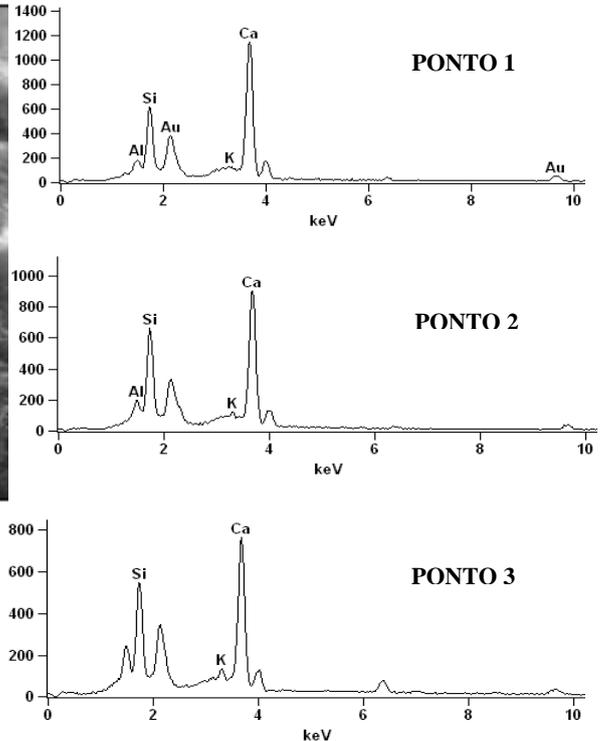
Figura 34 – Imagem em EDS da amostra T1 – Cura úmida (28 dias) e elementos químicos em cada ponto



| RELAÇÕES EM % | | | |
|---------------|-------|-------|------------|
| Ponto | Ca/Si | Al/Ca | Ca/(Si+Al) |
| 1 | 4,41 | 0,04 | 3,71 |
| 2 | 2,57 | 0,07 | 2,19 |
| 3 | 2,72 | - | 2,72 |

(fonte: elaborado da autora)

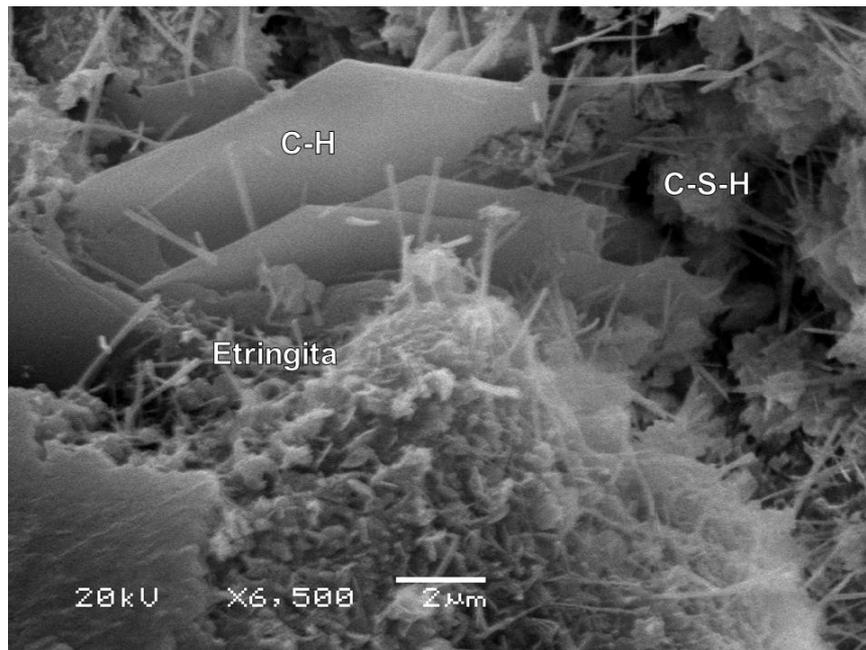
Figura 35 – Espectros de raios-x da amostra T1 – Cura úmida (28 dias)



(fonte: elaborado pela autora)

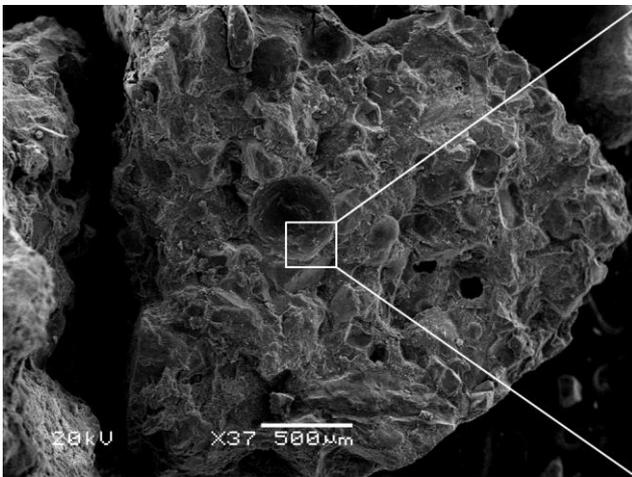
Na figura 36, se pode observar as três fases ocorridas em função da hidratação do cimento, sendo a fase etringita e C-S-H mais desenvolvidas que a fase C-H. O proporcionamento T3 possui uma relação água/aglomerante maior, por essa razão, mais água disponível para hidratação e, conseqüentemente, maior quantidade de produtos formados. A figura 37, no proporcionamento T3 em cura térmica aos 28 dias, mostra a formação da fase etringita dentro de um poro, assim como as microfissuras identificadas pelos círculos em vermelho. Na cura térmica, as agulhas de etringita são maiores, com tamanho aproximado de 50 µm, ao passo que, na cura úmida, os cristais apresentam tamanho aproximado de 2 µm.

Figura 36 – Imagem no modo ES da amostra T3 – Cura úmida (28 dias)

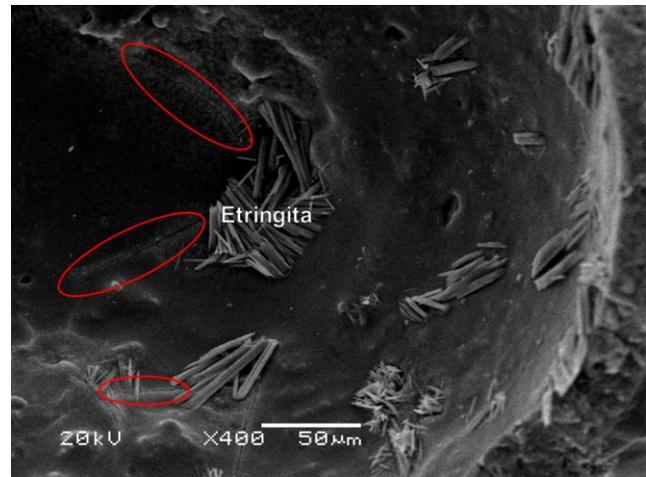


(fonte: foto da autora)

Figura 37 – Imagem em ES da amostra T3 – Cura térmica (28 dias)



(fonte: foto da autora)



(fonte: foto da autora)

8 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo principal avaliação das possíveis causas da diminuição da resistência à compressão das argamassas expostas à cura térmica aos 28 dias. A partir dos resultados obtidos dos ensaios de resistência mecânica, se observou esse fenômeno, ocorrendo uma diminuição dos valores, com relação aos 7 dias, de 4% para o proporcionamento T1; 13% para o T2 e de 19% para o T3. A maior redução foi no proporcionamento com maior relação água/aglomerante, confirmando o aumento da eficiência do cimento e da sílica ativa em traços com menores consumos de água.

O tipo de cura não se mostrou significativo na definição da quantidade de poros nas duas condições de cura, na qual as argamassas foram submetidas, mesmo em tempos diferentes de exposição. O tamanho médio de poros se manteve na faixa de 15 a 20Å, caracterizando um material mesoporoso. A adição de sílica ativa em todos os proporcionamentos desenvolveu misturas com maiores densidades de empacotamento, ocorrendo à formação de matrizes de cimento com densidades maiores.

Com relação à resistência à compressão, o comportamento foi influenciado pelo tipo de cura utilizado, na qual, argamassas expostas à cura térmica a 60°C, apresentaram valores maiores que as expostas em cura úmida, aos 3 dias de cura, pequenas variações aos 7 dias e uma diminuição de 20%, no proporcionamento T3, aos 28 dias. Essa diminuição está associada à formação de planos de clivagem que ocorreram paralelos ao C-H, em função da expansão do tamanho dos produtos formados, sendo observada em toda a população exposta a cura térmica. Na cura úmida, os valores de resistência mecânica se desenvolveram de forma crescente, ocorrendo maiores valores para o proporcionamento T1, com menor relação a/a.

A análise dos resultados obtidos por MEV apontam que a relação a/a afeta não somente a porosidade do material, mas também as características dos produtos de hidratação formados. A relação entre resistência mecânica e porosidade não é exclusiva para a determinação da capacidade resistente de um material, porém, a estrutura cristalina, a morfologia e tamanho dos produtos formados também influenciam nessa propriedade.

Os produtos formados em decorrência da hidratação do cimento, no regime de cura térmica, eram diferentes com relação ao tamanho dos produtos formados em cura úmida. Com o aumento da temperatura, os cristais formados foram maiores e se organizaram de maneira mais heterogênea, ao passo que, na cura úmida, ocorreu à formação de uma estrutura interna mais homogênea e com cristais de tamanho menores.

A hipótese do trabalho se confirmou, visto que a microestrutura das argamassas, expostas à cura térmica, foi heterogênea, comparada com a formação em cura úmida. Aos 28 dias de cura térmica, as argamassas apresentaram poros com diâmetros maiores que os formados aos 3 dias, ao passo que, as argamassas em cura úmida, apresentaram uma diminuição do diâmetro do poro aos 28 dias. O proporcionamento T3 apresentou maior tamanho de poro aos 28 dias, em cura térmica.

A relação entre resistência à compressão e tamanho de poros é inversamente proporcional, ou seja, aos 3 dias de cura térmica se observou valores maiores de resistência, quando comparados com os valores obtido em cura úmida, ao passo que, os diâmetros dos poros formados foi menor com relação aos diâmetros formados na condição de cura úmida. Nos 28 dias de cura térmica ocorreu diminuição da resistência e aumento dos diâmetros dos poros.

Para trabalhos futuros, sugere-se variar o volume de pasta, visto que diferentes proporções também podem influenciar os resultados de resistência mecânica, em função da alteração na densidade e trabalhabilidade do sistema. O uso de capeamento de enxofre na superfície dos corpos de prova, visto que a variabilidade nos resultados de resistência à compressão é influenciada pela distribuição de tensões que ocorrem no momento da ruptura dos corpos de prova.

REFERÊNCIAS

AITCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2000.

_____. The durability characteristics of high performance concrete: a review. **Cement & Concrete Composites**, Canada, v. 25, n. 4-5, p. 409-420, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09589465/25/4-5>>. Acesso em: 6 abr. 2013.

ALFORD, N. McN. A theoretical argument for the existence of high strength cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 11, n. 4, p. 605-610, July 1981. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884681900909>>. Acesso em: 22 maio 2013.

ALFORD, N. McN.; GROVES, G. W.; DOUBLE, D. D. Physical properties of high strength cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 12, n. 3, p. 349-358, May 1982. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884682900837>>. Acesso em: 22 maio 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland com alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7215**: resistência à compressão do cimento Portland. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 7211**: agregado para concreto. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 11768**: aditivos químicos para concreto de cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2002.

BA, M –F.; QIAN, C. -X.; GUO, X. –J.; HAN, X. –Y. Effects of steam curing on strength and porous structure of concrete with low water/ binder ratio. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 25, n. 1, p. 123-128, Jan. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810002989>>. Acesso em: 01 jun. 2013.

BARDELLA, P. S.; BARBOSA, D. C.; CAMARINI, G. Influência da cura térmica na estrutura porosa do concreto com sílica ativa. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 6., 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 2006. p. 1413-1424. Disponível em: <<http://engipapers.com.br/artigos/00302COAD2006.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2013.

BARDELLA, P. S., BARBOSA, D. C., PEREIRA, V. M., CAMARINI, G. Estrutura porosa de concretos produzidos com cimento Portland de alto-forno e sílica ativa para utilização em pré-moldados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: Ibracon, 2007. p. 1-16. 1 CD-ROM.

BARNETT, S. J.; SOUTSOS, M. N.; MILLARD, S.G.; BUNGEY, J. H. Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: effect of curing temperature and determination of apparent activation energies. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 36, n. 3, p. 434-440, Mar. 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888460500270X>>. Acesso em: 31 maio 2013.

CAMARINI, G.; CINCOTTO, M. A. **Efeito da cura térmica na resistência de argamassas de cimento Portland comum e de alto-forno**. São Paulo: EPUSP, 1995. Boletim Técnico PCC n. 156.

CAO, Y.; DETWILER, R. J. Backscattered electron imaging of cement pastes cured at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 25, n. 3, p. 627-638, Apr. 1995. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000888469500051D>>. Acesso em: 31 maio 2013.

COSTA, C.; CARVALHO, P. A. de, BORDADO, J. C.; NUNES, A. Estudo de argamassas de base cimentícia por microscopia eletrônica de varrimento. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 21, n.3-4, p. 31-35, Jul. 2009. Disponível em: <http://www.scielo.oces.mctes.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122009000200006>. Acesso em: 12 out. 2013.

CHENGZHI, Z.; AIQIN, W.; MINGSHU, T.; XIAOYU, L. The filling role of pozzolanic material. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 26, n. 6, p. 943-947, June 1996. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884696000646>>. Acesso em: 31 maio 2013.

CINCOTTO, M. A. Aditivos. In: MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (Ed.). **Concreto: estrutura, propriedade e materiais**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1994. p. 273-309.

DUREKOVIC, A. Cement pastes of low water to solid ratio: an investigation of the porosity characteristics under the influence of a superplasticizer and silica fume. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 25, n. 2, p. 365-375, Feb. 1995. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884695000224>>. Acesso em: 05 jun. 2013.

FELDMAN, R. F.; CHENG-YI, H. Properties of Portland cement-silica fume pastes: porosity and surface properties. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 15, n. 5, p. 765-774, Sept. 1985. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884685901413>>. Acesso em: 18 maio 2013.

FELDMAN, R. F.; BEAUDOIN, J. J. Microstructure and strength of hydrated cement. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 6, n. 3, p. 389-400, May 1976. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884676901022>>. Acesso em: 22 maio 2013.

FERREIRA JÚNIOR, E. L. **Avaliação de propriedades de concretos de cimento Portland de alto-forno e cimento Portland de alta resistência inicial submetidos a diferentes**

condições de cura. 2003. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho.** 2005. 285 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

JAMBOR, J. Pore structure and strength development of cement composites. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 20, n. 6, p. 948-954, Nov. 1990. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884690900586>>. Acesso em: 21 maio 2013.

KJELLSSEN, K. O.; DETWILER, R. J. Reaction kinetics of Portland cement mortars hydrated at different temperatures. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 22, n. 1, p. 112-120, Jan. 1992. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000888469290141H>>. Acesso em: 31 maio 2013.

KJELLSSEN, K. O. Heat curing and post-heat curing regimes of high-performance concrete: influence on microstructure and C-S-H composition. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 26, n. 2, p. 295-307, Feb. 1996. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884695002022>>. Acesso em: 31 maio 2013.

LARBI, J. A.; BIJEN, J. M. J. M. Orientation of calcium hydroxide at the portland cement paste-aggregate interface in mortars in the presence of sílica fume: a contribution. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 20, n. 3, p. 461-470, May 1990. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000888469090037X>>. Acesso em: 29 maio 2013.

LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 24, n. 6, p. 997-1009, 1994. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884694900221>>. Acesso em: 29 maio 2013.

MAZLOOM, M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; BROOKS, J. J. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. **Cement & Concrete Composites**, Canada, v. 26, n. 4, p. 347-357, May 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946503000179>>. Acesso em: 29 maio 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: Pini, 1994.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: Pini, 1997.

OLIVEIRA, V.de, M. **Estudo da porosidade de Pelotas de minério de ferro para altos-fornos através de adsorção física.** 2010, 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

PATEL, H. H.; BLAND, H.; POOLE, A. B. The microstructure of concrete cured at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 25, n. 3, p. 485-490, Apr. 1995. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000888469500036C>>. Acesso em: 24 maio 2013.

RAMACHANDRAN, V. S.; FELDMAN, R. F. Concrete Science. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). **Concrete Admixtures Handbook: properties, science and technology**. 2nd ed. Canada: National Research Council Canada, 1996. p. 1-66.

SARKAR, S. L.; AİTCIN, P. C. Comparative study of the microstructures of normal and very high-strength concretes. **Cement, Concrete and Aggregates**, Pennsylvania, v. 9, n. 2, p. 57-64, Winter 1987a. Disponível em: <http://enterprise.astm.org/SUBSCRIPTION/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/CEMENT/PAGES/CCA10070J.htm>. Acesso em: 20 maio 2013.

_____. Dissolution rate of silica fume in very high strength concrete. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 17, n. 4, p. 591-601, July 1987b. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884687901323>>. Acesso em: 18 maio 2013.

SARKAR, S. L.; AIMIN, X.; JANA, D. Scanning electron microscopy, x-ray microanalysis of concretes. In: RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. (Ed.). **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques, and applications**. Canada: Noyes Publications, 2000, p. 233-234.

SIEDEL, H.; HEMPEL, S.; HEMPEL, R. Secondary ettringite formation in heat treated Portland cement concrete: influence of different w/ c ratios and heat treatment temperatures. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 23, n. 2, p. 453-461, Mar. 1993. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000888469390110U>>. Acesso em: 31 maio 2013.

SILVA, I. J. da. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. 2000. 303 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação Interunidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SILVA, M. R. Avanços em tecnologia do concreto. In: MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (Ed.). **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994, p. 385-474.

STUDART, A. R.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A.; VENDRASCO, S. L. Efeito das características da microssílica no processamento e propriedades finais de concretos refratários auto-escoantes de ultra-baixo teor de cimento. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 3, n. 3, p. 42-46, Maio/ Jun. 1998. Disponível em: <http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v03n03/v3n3_5.pdf>. Acesso em: 31 maio 2013.

TOUTANJI, H. A.; EL-KORCHI, T. The influence of silica fume on the compressive strength of cement paste and mortar. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 25, n. 7, p. 1591-1602, Oct. 1995. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884695001523>>. Acesso em: 29 maio 2013.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Boletim de análises de cimento: CP V ARI RS**. Vidal Ramos: maio 2013. Boletim técnico s. n.

YAZICI, H. The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. **Building and Environment**, Amsterdam, v. 42, n. 5, p. 2083-2089, May 2007. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306000928>>. Acesso em: 19 maio 2013.

WINSLOW, D.; LIU, L. The pore structure of paste in concrete. **Cement and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 20, n. 2, p. 227-235, Mar. 1990. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884690900759>>. Acesso em: 21 maio 2013.

**APÊNDICE A – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos
três proporcionamentos nas duas condições de cura,
com e sem os valores espúrios**

| RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO - CURA ÚMIDA | | | | | | | | |
|--|----|------------|-------------------------------|-------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| AMOSTRA | CP | CARGA (KN) | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO(MPa) | MÉDIA (MPa) | DESVIO PADRÃO (MPa) | LIMITE SUPERIOR (MPa) | LIMITE INFERIOR (MPa) | DESVIO RELATIVO MÁXIMO (MPa) |
| T1-3D | 1 | 33,5 | 17,04* | 14,15 | 1,93 | 17,08 | 11,22 | 0,20 |
| | 2 | 27,9 | 14,23* | | | | | |
| | 3 | 31,1 | 15,85* | | | | | |
| | 4 | 24,1 | 12,27 | | | | | |
| | 5 | 25,2 | 12,84 | | | | | |
| | 6 | 24,9 | 12,67 | | | | | |
| T2-3D | 1 | 30,1 | 15,32 | 18,01 | 3,03 | 20,93 | 15,08 | 0,15 |
| | 2 | 30,3 | 15,45 | | | | | |
| | 3 | 40,5 | 20,64* | | | | | |
| | 4 | 40,5 | 20,61 | | | | | |
| | 5 | 40,5 | 20,61 | | | | | |
| | 6 | 30,3 | 15,45 | | | | | |
| T3-3D | 1 | 37,6 | 19,16* | 17,96 | 0,90 | 20,89 | 15,03 | 0,07 |
| | 2 | 36,9 | 18,79* | | | | | |
| | 3 | 33,4 | 17,00 | | | | | |
| | 4 | 35 | 17,83 | | | | | |
| | 5 | 33,3 | 16,97 | | | | | |
| | 6 | 35,3 | 18,00 | | | | | |
| T1-7D | 1 | 81 | 41,25* | 36,76 | 2,29 | 39,50 | 34,02 | 0,12 |
| | 2 | 71,7 | 36,52 | | | | | |
| | 3 | 71,6 | 36,49 | | | | | |
| | 4 | 79,8 | 35,56 | | | | | |
| | 5 | 70,6 | 35,96 | | | | | |
| | 6 | 68,3 | 34,8* | | | | | |
| T2-7D | 1 | 34,3 | 17,47 | 18,03 | 1,42 | 20,77 | 15,29 | 0,12 |
| | 2 | 34,6 | 17,6 | | | | | |
| | 3 | 31,6 | 16,08 | | | | | |
| | 4 | 34,9 | 17,77 | | | | | |
| | 5 | 37,4 | 19,06* | | | | | |
| | 6 | 39,6 | 20,18* | | | | | |
| T3-7D | 1 | 42 | 21,37 | 22,57 | 1,77 | 25,31 | 19,83 | 0,08 |
| | 2 | 46,5 | 23,69 | | | | | |
| | 3 | 48 | 24,45 | | | | | |
| | 4 | 40,8 | 20,78* | | | | | |
| | 5 | 46,5 | 23,69 | | | | | |
| | 6 | 48 | 24,45 | | | | | |
| T1-28D | 1 | 78,6 | 40,03 | 40,43 | 2,69 | 43,31 | 37,55 | 0,12 |
| | 2 | 74,4 | 37,91* | | | | | |
| | 3 | 75,8 | 38,61* | | | | | |
| | 4 | 80,7 | 41,12 | | | | | |
| | 5 | 89,2 | 45,42* | | | | | |
| | 6 | 77,6 | 39,5 | | | | | |
| T2-28D | 1 | 49,2 | 25,08 | 25,86 | 2,18 | 28,74 | 22,98 | 0,13 |
| | 2 | 48,7 | 24,78 | | | | | |
| | 3 | 48,1 | 24,48 | | | | | |
| | 4 | 57,2 | 29,11* | | | | | |
| | 5 | 48,7 | 24,78 | | | | | |
| | 6 | 48,1 | 24,48 | | | | | |
| T3-28D | 1 | 49,4 | 25,18 | 24,90 | 0,89 | 27,77 | 22,02 | 0,06 |
| | 2 | 49,3 | 25,11 | | | | | |
| | 3 | 46,5 | 23,69* | | | | | |
| | 4 | 49 | 24,94 | | | | | |
| | 5 | 51,6 | 26,27* | | | | | |
| | 6 | 47,5 | 24,18 | | | | | |

* valores espúrios

| RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO - CURA TÉRMICA | | | | | | | | |
|--|----|------------|-------------------------------|-------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| AMOSTRA | CP | CARGA (KN) | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO(MPa) | MÉDIA (MPa) | DESVIO PADRÃO (MPa) | LIMITE SUPERIOR (MPa) | LIMITE INFERIOR (MPa) | DESVIO MÁXIMO RELATIVO (MPa) |
| T1-3D | 1 | 83,2 | 42,38* | 33,07 | 7,41 | 39,18 | 26,96 | 0,28 |
| | 2 | 53,5 | 27,23 | | | | | |
| | 3 | 66,2 | 33,71* | | | | | |
| | 4 | 53,9 | 27,46 | | | | | |
| | 5 | 51,1 | 26,04 | | | | | |
| | 6 | 81,7 | 41,59* | | | | | |
| T2-3D | 1 | 59,6 | 30,34 | 30,36 | 3,07 | 36,47 | 24,25 | 0,16 |
| | 2 | 50,2 | 25,57* | | | | | |
| | 3 | 61,9 | 31,53 | | | | | |
| | 4 | 66,8 | 34,01 | | | | | |
| | 5 | 59,6 | 30,34 | | | | | |
| | 6 | 61,9 | 31,53 | | | | | |
| T3-3D | 1 | 58,9 | 30,01 | 30,01 | 1,74 | 36,11 | 23,90 | 0,08 |
| | 2 | 54,4 | 27,72* | | | | | |
| | 3 | 64,2 | 32,69 | | | | | |
| | 4 | 59,2 | 30,17 | | | | | |
| | 5 | 60,5 | 30,83 | | | | | |
| | 6 | 56,2 | 28,62* | | | | | |
| T1-7D | 1 | 62 | 31,59 | 30,92 | 6,08 | 37,35 | 24,50 | 0,21 |
| | 2 | 51,3 | 26,1* | | | | | |
| | 3 | 72,2 | 36,76 | | | | | |
| | 4 | 42,7 | 21,77* | | | | | |
| | 5 | 62,6 | 31,89 | | | | | |
| | 6 | 73,5 | 37,42* | | | | | |
| T2-7D | 1 | 63,9 | 32,52 | 31,19 | 2,35 | 37,61 | 24,76 | 0,10 |
| | 2 | 59,4 | 30,24 | | | | | |
| | 3 | 55,3 | 28,15* | | | | | |
| | 4 | 57,3 | 29,18* | | | | | |
| | 5 | 64,4 | 32,82 | | | | | |
| | 6 | 67,2 | 34,2* | | | | | |
| T3-7D | 1 | 75 | 38,21 | 34,71 | 4,42 | 41,14 | 28,29 | 0,19 |
| | 2 | 55,5 | 28,25* | | | | | |
| | 3 | 71,6 | 36,46 | | | | | |
| | 4 | 70,5 | 35,93 | | | | | |
| | 5 | | | | | | | |
| | 6 | | | | | | | |
| T1-28D | 1 | 62,7 | 31,93 | 32,34 | 7,61 | 40,22 | 24,45 | 0,29 |
| | 2 | 81,8 | 41,69* | | | | | |
| | 3 | 58,4 | 29,74 | | | | | |
| | 4 | 71,8 | 36,56* | | | | | |
| | 5 | 37,8 | 19,25* | | | | | |
| | 6 | 68,4 | 34,84 | | | | | |
| T2-28D | 1 | 49,5 | 25,21 | 29,53 | 4,72 | 37,41 | 21,65 | 0,26 |
| | 2 | 61,4 | 31,26 | | | | | |
| | 3 | 73,3 | 37,35* | | | | | |
| | 4 | 52,8 | 26,9 | | | | | |
| | 5 | 49,5 | 25,21 | | | | | |
| | 6 | 61,4 | 31,26 | | | | | |
| T3-28D | 1 | 61,6 | 31,4 | 31,77 | 3,43 | 39,65 | 23,89 | 0,20 |
| | 2 | 57,1 | 29,08 | | | | | |
| | 3 | 63,7 | 32,45* | | | | | |
| | 4 | 60,3 | 30,7 | | | | | |
| | 5 | 56,6 | 28,82 | | | | | |
| | 6 | 75 | 38,18* | | | | | |

* valores espúrios

| RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO - CURA ÚMIDA | | | | | | |
|--|----|------------|-------------------------------|-------------|---------------------|----------------------------|
| AMOSTRA | CP | CARGA (KN) | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO(MPa) | MÉDIA (MPa) | DESVIO PADRÃO (MPa) | DESVIO RELATIVO MÁXIMO (%) |
| T1-3D | 1 | 33,5 | 17,04* | 12,59 | 0,29 | 2,0% |
| | 2 | 27,9 | 14,23* | | | |
| | 3 | 31,1 | 15,85* | | | |
| | 4 | 24,1 | 12,27 | | | |
| | 5 | 25,2 | 12,84 | | | |
| | 6 | 24,9 | 12,67 | | | |
| T2-3D | 1 | 30,1 | 15,32 | 17,13 | 3,02 | 20,3% |
| | 2 | 30,3 | 15,45 | | | |
| | 3 | 40,5 | 20,64* | | | |
| | 4 | 40,5 | 20,61 | | | |
| | 5 | 40,5 | 20,61 | | | |
| | 6 | 30,3 | 15,45 | | | |
| T3-3D | 1 | 37,6 | 19,16* | 17,45 | 0,54 | 2,8% |
| | 2 | 36,9 | 18,79* | | | |
| | 3 | 33,4 | 17,00 | | | |
| | 4 | 35 | 17,83 | | | |
| | 5 | 33,3 | 16,97 | | | |
| | 6 | 35,3 | 18,00 | | | |
| T1-7D | 1 | 81 | 41,25* | 36,13 | 0,46 | 1,6% |
| | 2 | 71,7 | 36,52 | | | |
| | 3 | 71,6 | 36,49 | | | |
| | 4 | 79,8 | 35,56 | | | |
| | 5 | 70,6 | 35,96 | | | |
| | 6 | 68,3 | 34,8* | | | |
| T2-7D | 1 | 34,3 | 17,47 | 17,61 | 0,32 | 0,8% |
| | 2 | 34,6 | 17,6 | | | |
| | 3 | 31,6 | 16,08 | | | |
| | 4 | 34,9 | 17,77 | | | |
| | 5 | 37,4 | 19,06* | | | |
| | 6 | 39,6 | 20,18* | | | |
| T3-7D | 1 | 42 | 21,37 | 21,95 | 1,60 | 7,9% |
| | 2 | 46,5 | 23,69 | | | |
| | 3 | 48 | 24,45 | | | |
| | 4 | 40,8 | 20,78* | | | |
| | 5 | 46,5 | 23,69 | | | |
| | 6 | 48 | 24,45 | | | |
| T1-28D | 1 | 78,6 | 40,03 | 40,22 | 3,59 | 2,2% |
| | 2 | 74,4 | 37,91* | | | |
| | 3 | 75,8 | 38,61* | | | |
| | 4 | 80,7 | 41,12 | | | |
| | 5 | 89,2 | 45,42* | | | |
| | 6 | 77,6 | 39,5 | | | |
| T2-28D | 1 | 49,2 | 25,08 | 24,78 | 0,30 | 1,2% |
| | 2 | 48,7 | 24,78 | | | |
| | 3 | 48,1 | 24,48 | | | |
| | 4 | 57,2 | 29,11* | | | |
| | 5 | 48,7 | 24,78 | | | |
| | 6 | 48,1 | 24,48 | | | |
| T3-28D | 1 | 49,4 | 25,18 | 24,85 | 0,46 | 1,3% |
| | 2 | 49,3 | 25,11 | | | |
| | 3 | 46,5 | 23,69* | | | |
| | 4 | 49 | 24,94 | | | |
| | 5 | 51,6 | 26,27* | | | |
| | 6 | 47,5 | 24,18 | | | |

| RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO - CURA TÉRMICA | | | | | | |
|--|----|------------|-------------------------------|-------------|---------------------|----------------------------|
| AMOSTRA | CP | CARGA (KN) | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO(MPa) | MÉDIA (MPa) | DESVIO PADRÃO (MPa) | DESVIO MÁXIMO RELATIVO (%) |
| T1-3D | 1 | 83,2 | 42,38* | 26,91 | 0,76 | 2,0% |
| | 2 | 53,5 | 27,23 | | | |
| | 3 | 66,2 | 33,71* | | | |
| | 4 | 53,9 | 27,46 | | | |
| | 5 | 51,1 | 26,04 | | | |
| | 6 | 81,7 | 41,59* | | | |
| T2-3D | 1 | 59,6 | 30,34 | 31,96 | 4,23 | 6,4% |
| | 2 | 50,2 | 25,57* | | | |
| | 3 | 61,9 | 31,53 | | | |
| | 4 | 66,8 | 34,01 | | | |
| | 5 | 59,6 | 30,34 | | | |
| | 6 | 61,9 | 31,53 | | | |
| T3-3D | 1 | 58,9 | 30,01 | 30,93 | 1,23 | 5,7% |
| | 2 | 54,4 | 27,72* | | | |
| | 3 | 64,2 | 32,69 | | | |
| | 4 | 59,2 | 30,17 | | | |
| | 5 | 60,5 | 30,83 | | | |
| | 6 | 56,2 | 28,62* | | | |
| T1-7D | 1 | 62 | 31,59 | 33,41 | 2,90 | 10,0% |
| | 2 | 51,3 | 26,1* | | | |
| | 3 | 72,2 | 36,76 | | | |
| | 4 | 42,7 | 21,77* | | | |
| | 5 | 62,6 | 31,89 | | | |
| | 6 | 73,5 | 37,42* | | | |
| T2-7D | 1 | 63,9 | 32,52 | 31,86 | 1,41 | 5,1% |
| | 2 | 59,4 | 30,24 | | | |
| | 3 | 55,3 | 28,15* | | | |
| | 4 | 57,3 | 29,18* | | | |
| | 5 | 64,4 | 32,82 | | | |
| | 6 | 67,2 | 34,2* | | | |
| T3-7D | 1 | 75 | 38,21 | 36,87 | 1,19 | 2,5% |
| | 2 | 55,5 | 28,25* | | | |
| | 3 | 71,6 | 36,46 | | | |
| | 4 | 70,5 | 35,93 | | | |
| | 5 | | | | | |
| | 6 | | | | | |
| T1-28D | 1 | 62,7 | 31,93 | 32,17 | 2,56 | 8,3% |
| | 2 | 81,8 | 41,69* | | | |
| | 3 | 58,4 | 29,74 | | | |
| | 4 | 71,8 | 36,56* | | | |
| | 5 | 37,8 | 19,25* | | | |
| | 6 | 68,4 | 34,84 | | | |
| T2-28D | 1 | 49,5 | 25,21 | 27,79 | 3,08 | 12,5% |
| | 2 | 61,4 | 31,26 | | | |
| | 3 | 73,3 | 37,35* | | | |
| | 4 | 52,8 | 26,9 | | | |
| | 5 | 49,5 | 25,21 | | | |
| | 6 | 61,4 | 31,26 | | | |
| T3-28D | 1 | 61,6 | 31,4 | 30,00 | 1,25 | 3,9% |
| | 2 | 57,1 | 29,08 | | | |
| | 3 | 63,7 | 32,45* | | | |
| | 4 | 60,3 | 30,7 | | | |
| | 5 | 56,6 | 28,82 | | | |
| | 6 | 75 | 38,18* | | | |