

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS PATO BRANCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL -
PPGEC

DOUGLAS ÉVERTON CADORE

**DURABILIDADE DE CONCRETOS À BASE DE CIMENTO ÁLCALI
ATIVADO: ASPECTOS RELACIONADOS À CARBONATAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PATO BRANCO

2018

DOUGLAS ÉVERTON CADORE

**DURABILIDADE DE CONCRETOS À BASE DE CIMENTO ÁLCALI
ATIVADO: ASPECTOS RELACIONADOS À CARBONATAÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Civil” – Área de Concentração: Materiais e Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr^a. Caroline Angulski da Luz

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

PATO BRANCO

2018

C125d Cadore, Douglas Éverton.
Durabilidade de concretos à base de cimento álcali ativado: aspectos relacionados à carbonatação / Douglas Éverton Cadore. -- 2018.
134 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Profa. Dra. Caroline Angulski da Luz
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pato Branco, PR, 2018.
Bibliografia: f. 108 - 117.

1. Cimento. 2. Cimento Portland. 3. Agregados (Materiais de construção). 4. Resistência dos materiais. I. Luz, Caroline Angulski da, orient. II. Medeiros, Marcelo Henrique Farias de, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 22. ed. 624

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



TERMO DE APROVAÇÃO Nº 22

Título da Dissertação

Durabilidade de concretos à base de cimento álcali ativado: aspectos relacionados à carbonatação

Autor

Douglas Éverton Cadore

Esta dissertação foi apresentada às 9 horas e 45 minutos do dia 14 de maio de 2018, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL– Linha de pesquisa em Materiais e componentes da construção, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. O autor foi arguido pela Banca Examinadora abaixo assinada, a qual, após deliberação, considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Caroline Angulski da Luz
UTFPR/PB
Presidente

Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior
UFPR
Examinador

Profa. Dra. Geocris Rodrigues dos Santos
UTFPR/PB
Examinadora

Visto da Coordenação

Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalipa
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil- PPGEC

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do PPGEC

AGRADECIMENTOS

Após árduos, mas gratificantes, dois anos de muito trabalho e dedicação, nada mais justo que agradecer aos atores que tornaram este momento possível e contribuíram de diversas formas à realização deste trabalho. Sendo assim, agradeço:

À minha orientadora, Professora Dra. Caroline Angulski da Luz, pela oportunidade de trabalho em conjunto, incentivo e orientação, que proporcionou a realização deste trabalho, além de contribuir ao crescimento profissional e pessoal. Agradeço sua compreensão, paciência e dedicação em todos os momentos.

Ao professor Dr. Marcelo Henrique Faria de Medeiros pela coorientação e auxílio no desenvolvimento de diversos ensaios junto ao laboratório DURACON da UFPR. Aproveitando, agradeço à UFPR pela disponibilização de sua infraestrutura possibilitando a elaboração de ensaios laboratoriais.

À UTFPR Pato Branco, especialmente ao PPGEC e todos seus integrantes pela colaboração durante o período em que cursei o mestrado.

A todos os professores do PPGEC que propiciaram a aquisição de conhecimento e com certeza contribuíram para a realização deste trabalho e crescimento profissional.

Aos Técnicos dos laboratórios da UTFPR Pato Branco, aos alunos de iniciação científica, colegas de linha de pesquisa, bolsistas de graduação e estagiários, com os quais dividi laboratório durante toda a pesquisa experimental e que em diversos momentos foram importantes no desenvolvimento daquela, auxiliando das mais diversas formas possíveis.

À Central de Análises DAQUI da UTFPR Pato Branco pelo auxílio nas análises térmicas.

À minha família, especialmente à minha esposa Janaína, pelo apoio ao longo desta jornada, pela paciência e compreensão nos momentos difíceis, por todo o auxílio e incentivo. E principalmente a Deus, por ter me proporcionado essa experiência única.

RESUMO

CADORE, Douglas Éverton. DURABILIDADE DE CONCRETOS À BASE DE CIMENTO ÁLCALI ATIVADO: ASPECTOS RELACIONADOS À CARBONATAÇÃO. Durabilidade de concretos à base de cimento álcali-ativado: Aspectos relacionados à carbonatação. 2018. 134 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

A fabricação do ferro gusa gera um subproduto, conhecido por escória de alto forno, e uma das principais características daquela é a relação CaO/SiO_2 . Comumente, encontra-se na literatura a seguinte relação: escórias ácidas ($\text{CaO/SiO}_2 < 1$) e escórias básicas ($\text{CaO/SiO}_2 > 1$). Estas escórias quando ativadas alcalinamente, produzem um aglomerante (cimento álcali ativado – CAT) de baixo impacto ambiental, cujo principal produto de hidratação é um gel C-A-S-H. Pesquisas têm apresentado resultados satisfatórios deste material em termos de resistência mecânica, no entanto, questões ligadas à durabilidade ainda carecem de investigações. Neste cenário, o objetivo deste estudo é analisar parâmetros de durabilidade, especificamente resistência a carbonatação, de concretos de CAT à base de escórias ácidas. Para tal, um programa experimental foi desenvolvido, onde ensaios acelerados de carbonatação foram realizados em amostras de concretos com CAT de escória ácida e em amostras de concreto de cimento Portland (CP). Os concretos elaborados foram inseridos em uma câmara de carbonatação com temperatura ($40 \pm 0,1^\circ\text{C}$), umidade ($60 \pm 0,5\%$) e taxa de CO_2 (5 ± 1) controlados, durante período de 4, 8, 12 e 16 semanas. Testes complementares de resistência à compressão axial, absorção da água e variação dimensional também foram realizados, no intuito de analisar seus resultados em conjunto ao resultado de profundidade de carbonatação. Com o objetivo de servir de base para a análise dos resultados de durabilidade, investigações microestruturais foram elaboradas. Concretos de CAT apresentaram profundidade de carbonatação superior ao concreto de CP, tendo como coeficientes de carbonatação 3,67 e 2,32 mm/semana^{0,5}, respectivamente – reta linearizada. Salienta-se que a evolução da frente de carbonatação foi mais significativa no primeiro período de ensaio (4 semanas), o que pode ser decorrente da precipitação de CaCO_3 nos poros do compósito. O resultado de carbonatação, pode ser justificado pela retração mais intensa em concretos de CAT, uma vez que os produtos de hidratação são menos cristalinos que em compósito de cimento Portland (CP), além disso, a estrutura do poro diferenciada daquele compósito, também pode ter influenciado no referido resultado. Foi constatada também perda de resistência mais intensa em compósitos de CAT, após o período de carbonatação e tal constatação baseia-se nos compostos atacados pela carbonatação, que no caso de compósitos de CAT é o próprio C-S-H, uma vez que não tem como produto de hidratação o Ca(OH)_2 . Desta forma, a durabilidade de compósitos de CAT frente a carbonatação deve ser ainda objeto de pesquisas, com o objetivo de condicionar este material a melhores resultados de resistência a este ataque.

Palavras-chave: cimento álcali ativado, durabilidade, carbonatação, cimento Portland.

ABSTRACT

CADORE, Douglas Éverton. Concretes based on alkali-activated cement durability: Aspects related to carbonation. 2018. 134 f. Dissertation – Postgraduate Program in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2018.

The iron manufacture generates a discard product, the blast furnace slag, and one of the main exposure characteristics is a $\text{CaO} / \text{SiO}_2$ ratio. The following relationship is commonly found in the literature: acid slags ($\text{CaO} / \text{SiO}_2 < 1$) and basic slags ($\text{CaO} / \text{SiO}_2 > 1$). These alkaline activated slags produce a binder (activated alkali cement - CAT) of low environmental impact, whose main product of hydration is a C-A-S-H gel. Researches have presented satisfactory results of this material in terms of mechanical resistance, however, durability still need investigations. So, the objective of this study is to analyze CAT durability parameters in concrete based on acid slag, specifically resistance to carbonation. For this, an experimental program was developed, where accelerated carbonation tests were performed on samples of CAT concrete and Portland cement (PC) concrete. The elaborated concretes were inserted in a carbonation chamber with controlled temperature, humidity and CO_2 , for a 4, 8, 12 and 16 weeks. Complementary tests of resistance, water absorption and shrinkage were also performed in order to analyze their results together with the carbonation depth result. In order to basis for the analysis of the durability results, microstructural investigations were elaborated. CAT concrete presented carbonation depth higher than CP concrete, having as carbonation coefficients 3.67 and 2.32 $\text{mm/week}^{0.5}$, respectively. It should be noted that the evolution of carbonation was more significant in the first test period (4 weeks), which may be due to the precipitation of CaCO_3 in the pores of the compound. The carbonation result can be justified by the more intense shrinkage in CAT concrete, since the hydration products are less crystalline than in the CP, and the differentiated pore structure of that compound may also have influenced the result. It was also found more severe loss of resistance in CAT after the carbonation period and this finding is based on the compounds attacked by carbonation, in the CAT this compounds is the CSH, since it does not have the hydration product $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Thus, the durability of CAT against carbonation should be further investigated, with the objective of conditioning this material to better resistance results to this attack.

Keywords: alkali-activated cement, durability, carbonation, Portland cement

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo aparente de cimento Portland no Brasil.	17
Figura 2 – Distribuição da produção de cimento Portland no ano de 2015.	18
Figura 3 – Emissão específica de CO ₂ por tonelada de cimento Portland.	18
Figura 4 – Produção e perspectiva de produção nacional de ferro-gusa (unidade: 1000t).	21
Figura 5 – Representação esquemática do mecanismo de carbonatação.	30
Figura 6 – Representação da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo.	31
Figura 7 – Curva da relação entre relação água/aglomerante e permeabilidade. .	35
Figura 8 – Esquema de capilaridade para diâmetro pequeno, médio e grande. ...	36
Figura 9 – Resumo dos principais mecanismos de transporte de gases.	37
Figura 10 – Profundidade de carbonatação dos concretos estudados.	39
Figura 11 – Influência do teor de CO ₂ no coeficiente de carbonatação.	43
Figura 12 – Umidade relativa do ambiente x Percentual de carbonatação.	44
Figura 13 – Imagens de MEV de pastas de escória ativadas com silicato antes (a) e depois (b) de 1000h de exposição a 1% de CO ₂ e dados EDX correspondentes (c).	49
Figura 14 – Profundidade de carbonatação natural de concretos de escórias ativadas com silicato, em função do tipo da mistura. As barras correspondem ao valor de um desvio padrão entre 16 medidas.	49
Figura 15 – Carbonatação de CP e CAT – 20%CO ₂ ; Umidade relativa 70%: (a) resistência mecânica; (b) profundidade de carbonatação.	50
Figura 16 – Resistência mecânica de argamassa de CP e CAT (AAS) antes e depois da carbonatação.	51
Figura 17 – Difractometria de raios-X de amostras de pastas de CAT.	53
Figura 18 – Difractometria de raios-X de amostras de pastas de CAT, (a) antes e (b) após a carbonatação.	53
Figura 19 – Análise termogravimétrica (DTG) pastas de CAT, (a) antes e (b) após a carbonatação.	54
Figura 20 – Fluxograma dos ensaios.	56

Figura 21 – (a) Escória ácida anteriormente a sua trituração (b) Escória ácida triturada.	58
Figura 22 – Difratoograma da escória de alto-forno.	58
Figura 23 – Distribuição granulométrica da escória de alto-forno.....	59
Figura 24 – Difração de raios-X do cimento CP-32 RS.	59
Figura 25 – Agregado fino - distribuição granulométrica.	60
Figura 26 – Resistência à compressão de argamassas à base de CP e de CAT (7 e 28 dias), cura úmida (amostras 4cm x 4cm x 16cm).	62
Figura 27 – Equipamento de medida de retração de argamassa no estado fresco desenvolvido no INSA de Toulouse (desenho esquemático).	63
Figura 28 – Adaptação de equipamento de medida de retração de argamassa no estado fresco (a) desenho esquemático e (b) equipamento de ensaio.	64
Figura 29 – Amostras para ensaio de variação dimensional (a) argamassa lançada a molde prismático 25x25x285mm; (b) argamassas em cura úmida antes de sua desmoldagem e (c) argamassas desmoldadas em cura úmida.....	65
Figura 30 – Variação dimensional plástica de argamassas à base de CP e de CAT.	67
Figura 31 – Retração e perda de massa de argamassas à base de CP e de CAT.	68
Figura 32 – Verificação do espalhamento de concretos. (a) Concreto à base de CP; (b) Concreto à base de CAT.....	69
Figura 33 – Absorção de água por imersão e índice de vazios de concretos à base de CP e de CAT (28 dias) cura úmida.....	71
Figura 34 – Fases de preparação amostras de concreto (a) cura úmida; (b) constância de massa e (c) redistribuição de umidade.....	73
Figura 35 – Método de extração de discos 100mm X 50mm de corpos de prova de 100mm X 200mm.	74
Figura 36 – Fatia (100mm de diâmetro X 50mm espessura) de corpo de prova de concreto.....	75
Figura 37 – Faixas de indicação de pH após aplicação de fenolftaleína.	75
Figura 38 – Forma de definição de regiões para a leitura da profundidade de carbonatação.....	76

Figura 39 – (a) Relação entre profundidade de carbonatação acelerada e tempo real; (b) Profundidade de carbonatação linearizada.	77
Figura 40 – Cronograma de procedimentos – ensaio de verificação da frente de carbonatação.....	77
Figura 41 – Amostras de pastas moldadas em moldes cilíndricos 25mm x 40mm.	78
Figura 42 – Carbonatação em concretos de CAT e CP (a) Evolução da frente de carbonatação; (b) Curva linearizada – coeficientes de carbonatação.	84
Figura 43 – Amostra de concreto carbonatado (16 semanas) após aplicação de fenolftaleína (a) Concreto à base CP; (b) Concreto à base de CAT.....	84
Figura 44 – Desenho esquemático da profundidade de carbonatação (a) amostra de concreto de CP; (b) amostra de concreto de CAT.....	85
Figura 45 – Resistência à compressão de concretos à base de CP e de CAT (3, 7 e 28 dias) cura, úmida. Amostras prismáticas 4cm x 4cm x 16cm (a); Amostras cilíndricas 10cm x 20cm (b).....	86
Figura 46 – Resistência à compressão de pastas carbonatadas de CP e de CAT (4, 8, 12 e 16 semanas).....	88
Figura 47 – Difractometria de Raios-X de amostras de pastas de CP carbonatadas (0, 4, 8, 12 e 16 semanas); CH – Ca(OH) ₂ ; C-S-H – Silicato de cálcio hidratado e Cc – CaCO ₃	90
Figura 48 – Difractometria de Raios-X de amostras de pastas de CAT carbonatadas (0 - Referência, 4, 8, 12 e 16 semanas); C-S-H – Silicato de cálcio hidratado; Cc – CaCO ₃ e μ Cc – Vaterita (CaCO ₃ mal cristalizado).....	90
Figura 49 – Comparação dos principais picos visualizados em DRX (a) em pastas de CP carbonatadas; (b) em pastas de CAT carbonatadas.	92
Figura 50 – Difractometria de raios-x de pastas de CAT carbonatadas (a) carbonatadas em ambiente natural, e carbonatadas por teste acelerado (b) ambiente 1% CO ₂ ; (c) 3% CO ₂ ; (d) 5% CO ₂	93
Figura 51 – Análise termogravimétrica (TG e DTG) de pastas de CP carbonatadas (0, 4, 8, 12 e 16 semanas na câmara de carbonatação).	94
Figura 52 – Análise termogravimétrica (TG e DTG) de pastas de CAT carbonatadas (0, 4, 8, 12 e 16 semanas na câmara de carbonatação).....	95

Figura 53 – MEV, C-S-H – Silicato de cálcio hidratado; CH – Ca(OH) ₂ ; E – Etringita; Cc – CaCO ₃ em amostras de pastas de CP (a) não carbonatadas; (b) carbonatadas (4 semanas); (c) carbonatadas (8 semanas); e (d) carbonatadas (16 semanas).....	99
Figura 54 – EDS da micrografia da pasta de CP não carbonatada.....	99
Figura 55 – EDS da micrografia da pasta de CP carbonatada (4 semanas carbonatação acelerada).....	100
Figura 56 – MEV, C-S-H – Silicato de cálcio hidratado e Cc – CaCO ₃ em amostras de pastas de CAT (a) não carbonatadas; (b) carbonatadas (4 semanas); (c) carbonatadas (8 semanas); e (d) carbonatadas (16 semanas).	102
Figura 57 – EDS da micrografia da pasta de CAT não carbonatada.....	102
Figura 58 – EDS da micrografia da pasta de CAT carbonatada (4 semanas carbonatação acelerada).....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exigências de algumas normas quanto a composição de escória a ser utilizada em cimento.....	20
Tabela 2 – Protocolos utilizados para a avaliação da resistência à carbonatação de materiais cimentícios.	29
Tabela 3 – Relação Ca/Si de pesquisas de carbonatação em CAT's.	52
Tabela 4 – Composição química e física CP e GBFS	57
Tabela 5 – Caracterização física agregado miúdo	60
Tabela 6 – Espalhamento argamassas de CP e de CAT.	61
Tabela 7 – Espalhamento concretos de CP e CAT.	69
Tabela 8 – Condições de ensaio de carbonatação acelerada.	74
Tabela 9 – Amostras de pastas.	79
Tabela 10 – EDS da micrografia da pasta de CP não carbonatada.	100
Tabela 11 – EDS da micrografia da pasta de CP carbonatada (4 semanas carbonatação acelerada).	100
Tabela 12 – EDS da micrografia da pasta de CAT não carbonatadas	103
Tabela 13 – EDS da micrografia da pasta de CAT carbonatada (4 semanas carbonatação acelerada).	103
Tabela 14 – Resistência compressão axial de corpos de prova - Argamassa à base de CP	119
Tabela 15 – Resistência compressão axial de corpos de prova - Argamassa à base de escória ácida ativadas com NaOH	119
Tabela 16 – Resistência a compressão axial de corpos de prova (4x4x16cm) - Concreto à base de CP	120
Tabela 17 – Resistência a compressão axial de corpos de prova (4x4x16cm) - Concreto à base de escória ácida ativadas com NaOH	120
Tabela 18 – Resistência a compressão axial de corpos de prova (10x20cm) - Concreto à base de CP	120
Tabela 19 – Resistência a compressão axial de corpos de prova (10x20cm) - Concreto à base de escória ácida ativadas com NaOH	121
Tabela 20 – Resistência a compressão axial de corpos de prova (25x40mm) submetidos à carbonatação acelerada - Pasta à base de CP	121

Tabela 21 – Resistência a compressão axial de corpos de prova (25x40mm) submetidos à carbonatação acelerada - Pasta à base de escória ácida ativadas com NaOH	121
Tabela 22 – Teste de significância argamassa de CP.....	122
Tabela 23 – Teste Tukey argamassa de CP.	122
Tabela 24 – Teste de significância argamassa de CAT.	122
Tabela 25 – Teste Tukey argamassa de CAT.	122
Tabela 26 – Teste T amostras argamassa de CP e CAT.	123
Tabela 27 – Teste de significância amostras 4x4x16cm concreto de CP.....	123
Tabela 28 – Teste Tukey amostras 4x4x16cm concreto de CP.	123
Tabela 29 – Teste de significância amostras 4x4x16cm concreto de CAT.	123
Tabela 30 – Teste Tukey amostras 4x4x16cm concreto de CAT.	124
Tabela 31 – Teste T amostras 4x4x16cm concreto de CP e CAT.....	124
Tabela 32 – Teste de significância amostras 10x20cm concreto de CP.	124
Tabela 33 – Teste Tukey amostras 10x20cm concreto de CP.	124
Tabela 34 – Teste de significância amostras 10x20cm concreto de CAT.	124
Tabela 35 – Teste Tukey amostras 10x20cm concreto de CAT.....	125
Tabela 36 – Teste T amostras 10x20cm concreto de CP e CAT.....	125
Tabela 37 – Absorção de água em amostras de concreto à base de CP e CAT .126	
Tabela 38 – Teste T ensaio absorção de água em concretos de CP e CAT.....	126
Tabela 39 – Índice de vazios em amostras de concreto à base de CP e CAT	126
Tabela 40 – Teste T índice de vazios de concretos de CP e CAT.	127
Tabela 41 – Teste de significância concretos de CP.....	128
Tabela 42 – Teste Tukey concretos de CP.	128
Tabela 43 – Teste de significância concretos de CAT.....	128
Tabela 44 – Teste Tukey concretos de CAT.	128
Tabela 45 – Medição de amostras de concretos de CP e CAT expostas a carbonatação acelerada – 4 semanas de exposição.....	129
Tabela 46 – Medição de amostras de concretos de CP e CAT expostas a carbonatação acelerada – 8 semanas de exposição.....	129
Tabela 47 – Medição de amostras de concretos de CP e CAT expostas a carbonatação acelerada – 12 semanas de exposição.....	130

Tabela 48 – Medição de amostras de concretos de CP e CAT expostas a carbonatação acelerada – 16 semanas de exposição.....	130
Tabela 49 – Coeficiente de carbonatação - concretos de CP e CAT (ajustado ao modelo de Tuuti).....	130
Tabela 50 – Leituras dimensional e de massa em amostras de argamassa de CP.	131
Tabela 51 – Variação dimensional em amostras de argamassa de CP.	132
Tabela 52 – Variação de massa em amostras de argamassa de CP.....	132
Tabela 53 – Leituras dimensional e de massa em amostras de argamassa de CAT.	133
Tabela 54 – Variação dimensional em amostras de argamassa de CAT.....	133
Tabela 55 – Variação de massa em amostras de argamassa de CP.....	134

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	23
1.2	JUSTIFICATIVA	24
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2	REVISÃO DE LITERATURA	26
2.1	CIMENTO ÁLCALI ATIVADO (CAT)	26
2.2	CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	27
2.2.1	MÉTODOS DE TESTE UTILIZADOS PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO	28
2.2.2	MECANISMOS DA CARBONATAÇÃO	30
2.2.3	MECANISMOS DE TRANSPORTE DE MASSA RELACIONADOS À CARBONATAÇÃO	33
2.2.3.1	Difusão	33
2.2.3.2	Permeabilidade	34
2.2.3.3	Absorção Capilar	35
2.2.4	FATORES QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO	37
2.2.4.1	Fatores relacionados ao concreto	37
2.2.4.2	Fatores relacionados ao meio ambiente.....	41
2.2.4.3	Fatores de controle da carbonatação em materiais cimentícios.....	44
2.2.5	CARBONATAÇÃO EM CAT	45
2.2.5.1	Condições de exposição	45
2.2.5.2	Composição do aglomerante.....	47
2.2.5.1	Desempenho de CAT frente à carbonatação	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1	AGLOMERANTES – CAT E CP	56
3.1.1	COMPOSIÇÃO FÍSICA E QUÍMICA.....	56
3.1.2	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS.....	60
3.1.2.1	Resistência à compressão dos aglomerantes CAT e CP.....	60
3.1.2.2	Variação dimensional dos aglomerantes CAT e CP	63
3.2	CONCRETOS DE CAT E CP	68

3.2.1	ELABORAÇÃO DE CONCRETOS PARA CARBONATAÇÃO	68
3.2.2	ÍNDICE DE VAZIOS	70
3.2.3	MEDIDA DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	71
3.3	PASTAS DE CAT E CP.....	78
3.3.1	ELABORAÇÃO DE PASTAS SUBMETIDOS À CARBONATAÇÃO	78
3.3.2	ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	79
3.3.3	INVESTIGAÇÃO DA MICROESTRUTURA DE PASTAS CARBONATADAS.....	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
4.1	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	83
4.2	MONITORAMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA	86
4.2.1	RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CONCRETOS NÃO CARBONATADOS	86
4.2.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PASTAS CARBONATADAS	87
4.3	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA	89
4.3.1	Difração de Raios-X (DRX).....	89
4.3.2	AnáliseS TÉRMICAS (tg/dtg).....	93
4.3.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	97
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
5.1	TRABALHOS FUTUROS	107
6	REFERÊNCIAS.....	108
	APÊNDICE A	118
	APÊNDICE B	119
	APÊNDICE C	122
	APÊNDICE D	126
	APÊNDICE E.....	128
	APÊNDICE F.....	129
	APÊNDICE G	131

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland (CP), patenteado pelo inglês Joseph Aspdin em 1824, é um importante material de construção utilizado em larga escala até os dias atuais. O crescimento de seu consumo e conseqüente produção se dá em paralelo ao desenvolvimento econômico. Índices mundiais e nacionais da produção de tal material comprovam este crescimento. Segundo Dias et al. (2017), a produção nacional de CP no ano de 2015 foi de 65,2 milhões de toneladas, 70,0% superior ao registrado no ano de 2000. Em termos mundiais, a produção de CP também apresenta crescimento significativo, chegando a 4,1 bilhões de toneladas em 2015, aproximadamente 23,8% superior ao total produzido no ano de 2010. A Figura 1 apresenta os dados nacionais de produção de cimento conjuntamente às fases de desenvolvimento econômico nacional e a Figura 2 traz a produção de CP mundial, dividida em continentes, alguns países e conglomerados.

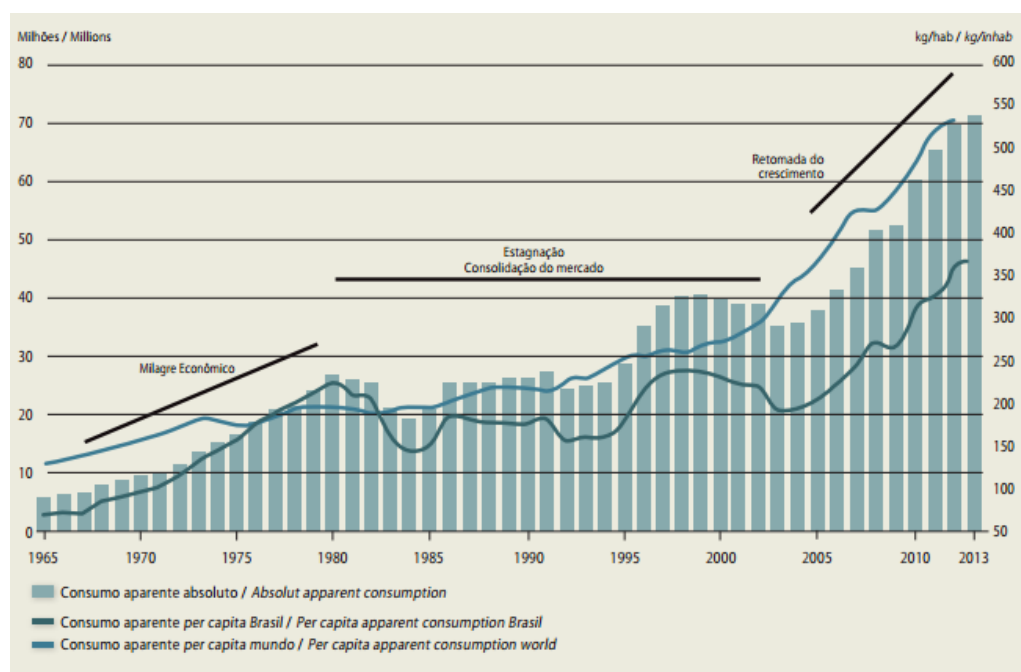


Figura 1 – Consumo aparente de cimento Portland no Brasil.

Fonte: DIAS, 2017.

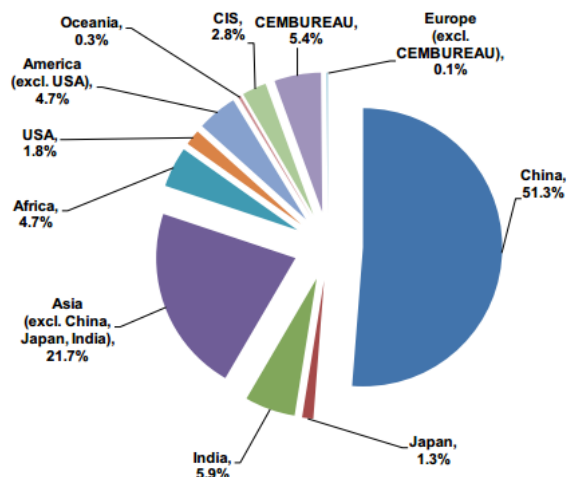


Figura 2 – Distribuição da produção de cimento Portland no ano de 2015.

Fonte: WBCSD, 2017.

Os números impressionam e demonstram o desenvolvimento da indústria cimenteira nacional e mundial. Entretanto, este crescimento da produção mundial de CP gera efeitos colaterais, como a crescente emissão de dióxido de carbono (CO₂) resultante deste processo, além da demanda de energia para tal. Segundo o Conselho Empresarial Mundial para Desenvolvimento Sustentável (WBCSD, 2017), para cada tonelada de CP produzido, em média é emitido 700kg de CO₂ na atmosfera. Este quantitativo é variável, pois cada região possui suas tecnologias de produção, assim como suas normas norteadoras. A indústria cimenteira brasileira figura entre as mais eficientes no controle das suas emissões de gases de efeito estufa, com média de emissão de 600kg por tonelada de CP produzido (Figura 3).

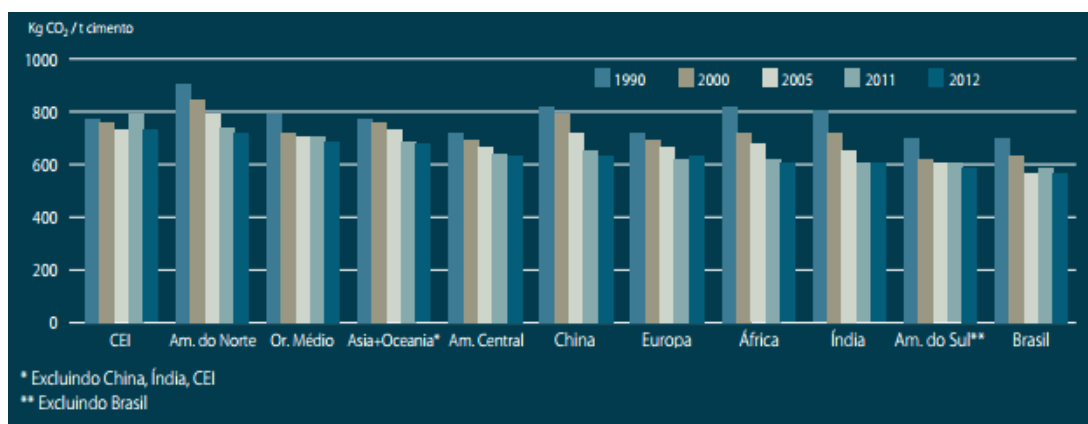


Figura 3 – Emissão específica de CO₂ por tonelada de cimento Portland.

Fonte: WBCSD, 2017.

A composição do CP varia de acordo com as propriedades físicas e mecânicas esperadas, como trabalhabilidade, tempo de pega e resistência, por exemplo. Entretanto, seu componente predominante é o clínquer¹, principal responsável pela emissão de CO₂. Estima-se que aproximadamente 90% das emissões de CO₂ oriundas da fabricação de cimento ocorrem durante a produção do clínquer, sendo maior parte (50%) emitida pela calcinação/descarbonatação da matéria-prima e 40% pela combustão no forno de clínquer. O restante resulta do transporte de matérias-primas (5%) e das emissões indiretas pelo consumo de energia elétrica (5%) (WBCSD, 2017).

Normas emitidas por diversas instituições ao redor do mundo trazem composições diferentes para o CP (de acordo com as características requeridas), que conseqüentemente, diferem também na quantidade de clínquer. Em CP's compostos observa-se a substituição de parte do clínquer por adições minerais, cujo objetivo é o de redução de energia necessária à produção do cimento e conseqüente redução da emissão de CO₂, assim como, melhoramento de características específicas do produto final. No Brasil as adições minerais normatizadas, para a utilização nos CP's em substituição ao clínquer, são a cinza volante (CPII – Z 6 a 14% de material pozolânico e CP IV 15 a 50% de material pozolânico); escória granulada de alto-forno (CPII – E 6 a 34% de escória e CPIII 35 a 70% de escória) e fíler calcário (CPII – E e Z com máximo de 10% de material carbonático, CPII – F com 6 a 10% de material carbonático, CPIII, CP e CPV com máximo de 5% de material carbonático).

A adição mineral com maior possibilidade de substituição do clínquer, em quantidade, é a escória granulada de alto-forno (EGAF), um subproduto da indústria de fabricação do ferro-gusa (NEVILLE e BROOKS, 2013). Ela é formada a partir de reações químicas da fusão do minério de ferro, impurezas e fundentes

¹Produto da queima (em forno rotativo de temperatura próxima de 1500°C) da mistura íntima de material cálcico, sílica e alumina finamente moídos. No forno ocorre a sinterização do material e sua fusão parcial na forma de clínquer, que após ser resfriado recebe uma determinada quantidade de gipsita (sulfato de cálcio), sendo então novamente moído até resultar em um pó fino. O produto resultante é o cimento Portland comercial, utilizado em todo o mundo. (NEVILLE e BROOKS 2013).

em altos-fornos. Estas impurezas são adicionadas ao alto-forno como combustíveis, podendo ser carvão vegetal e carvão mineral (coque).

Diferentes normas indicam a composição exigida deste subproduto para ser utilizado em CP's. A Tabela 1 demonstra tais exigências.

Tabela 1 – Exigências de algumas normas quanto a composição de escória a ser utilizada em cimento.

Escória	BS 6699:1992	ASTM C 989:1999	NBR 5735:1991	EN 197-2000
Finura/superfície específica	Não inferior a 275 m ² /kg	495 m ² /kg (para o cimento com escória)
Conteúdo de vidro	Não inferior a 67%	Não inferior a 67%
Relação entre os componentes	(CaO+MgO)/(SiO ₂) >1,0; e (CaO)/(SiO ₂)<1,4	(CaO+MgO+AL ₂ O ₃)/(SiO ₂)> 1	(CaO+MgO)/(SiO ₂)>1
Quantidade	Até 95% da massa total de aglomerante	Até 50% da massa total de aglomerante	Até 70% da massa total de aglomerante	De 6 a 95% da massa total de aglomerante

FONTE: LANGARO (2016) - adaptado.

Na Tabela 1 observa-se que uma das características exigidas por algumas normas, trata-se da relação existente entre os óxidos ácidos e básicos, componentes da escória. Escórias de relação Ca/SiO₂ > 1 são classificadas como básicas, enquanto que relação Ca/SiO₂ < 1 caracterizam escórias ácidas.

Fornos que utilizam carvão mineral como combustível, apresentam como subproduto escórias consideradas básicas, decorrente da necessidade do CaO para retirada do enxofre originário deste tipo de combustível (ZIVICA e KRIZMA, 2013). Já fornos de carvão vegetal têm como subproduto escória considerada ácida.

A fabricação nacional de ferro-gusa, no ano de 2013 atingiu aproximadamente 32,5 milhões de toneladas, dos quais 7,8 milhões provenientes de fornos de carvão vegetal (WBCSD, 2017), ou seja, possuem como subproduto a escória ácida. A Figura 4 demonstra a perspectiva de crescimento da produção do ferro-gusa até ano de 2020.

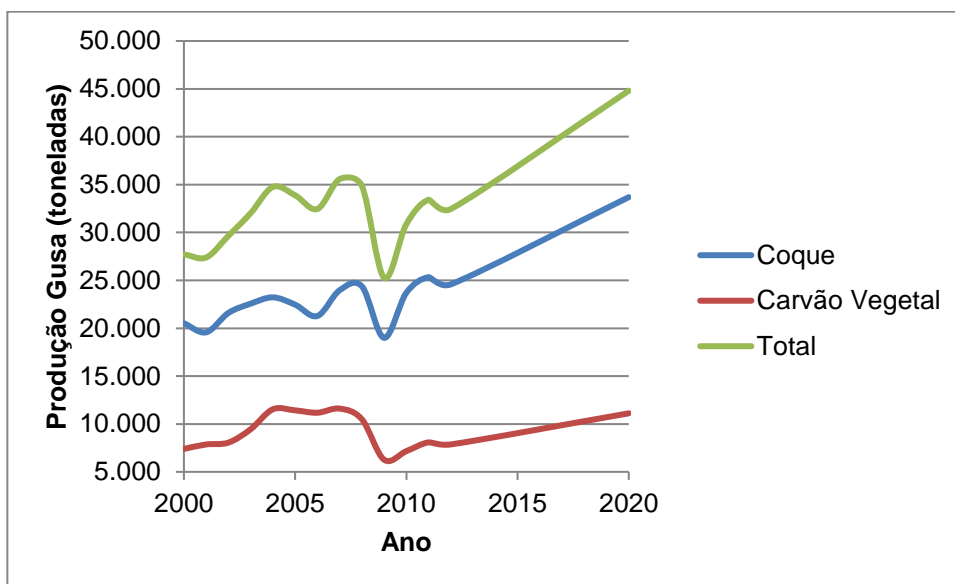


Figura 4 – Produção e perspectiva de produção nacional de ferro-gusa (unidade: 1000t).

Fonte: Fonte: WBCSD, 2017 - adaptado.

O maior produtor mundial de ferro-gusa utilizando carvão vegetal nos altos-fornos é o Brasil, com produções de 7 a 12 milhões de t/ano de gusa. O potencial brasileiro de produzir ferro-gusa a carvão vegetal, com energia renovável, é imenso. Atualmente, o ferro-gusa brasileiro a carvão vegetal já é base para usinas siderúrgicas integradas, e os produtores independentes abastecem toda a demanda nacional, além de abastecer o mercado internacional. O ferro-gusa brasileiro a carvão vegetal é o grande diferencial do Brasil em relação à siderurgia mundial, pois produz ferro-gusa com energia renovável, corrigindo assim o passivo ambiental e com ganhos econômicos (UHLIG et al., 2013).

A utilização do subproduto da fabricação do ferro-gusa (escória de alto-forno), não é restrita apenas a substituição parcial do clínquer, em CP's, para a composição de cimentos compostos. Escórias de alto-forno quando ativadas por soluções alcalinas apresentam propriedades mecânicas aplicáveis à construção civil, produzindo um tipo de aglomerante (cimento álcali ativado – CAT) de baixo impacto ambiental, uma vez que não necessita de processo de calcinação, como é o caso do clínquer (base do CP) e faz uso de um subproduto industrial.

A composição química das escórias é muito próxima a do CP, o que a torna interessante para a ativação alcalina. Seus principais compostos são o óxido de sílica (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de cálcio (CaO), em proporções

diferentes às do CP. O SiO_2 e o Al_2O_3 são provenientes do minério, enquanto o CaO provém do calcário utilizado como fundente (SHI et al., 2011).

De acordo com Shi et al. (2011), estudos sobre a ativação alcalina de uma matéria prima iniciaram em 1930, quando Kuhl estudou a ativação de uma escória com o KOH , entretanto, um marco inicial foi alcançado em 1940 quando Purdon realizou o primeiro grande estudo em laboratório sobre a álcali ativação de escórias, ativando escória com hidróxido de sódio (NaOH). Deste marco em diante pesquisas vem sendo desenvolvidas com o intuito de melhor compreensão deste tipo de material.

Com relação à durabilidade, mais especificamente à carbonatação, pode-se afirmar que esta ocorre quando o CO_2 atmosférico se difunde nos poros da matriz cimentícia reagindo com a água presente nos mesmos para a formação do ácido carbônico (H_2CO_3), que por sua vez reage com os compostos de hidratação do cimento, culminando no carbonato de cálcio (CaCO_3). Em cimento Portland (CP), o CO_2 reage com hidróxido de cálcio (CH), promovendo a formação daquele, ou ainda, reage com silicato de cálcio hidratado (CSH), também dando origem ao CaCO_3 , cujo processo é caracterizado por sua descalcificação (JOHANNESSON e UTGENANNT, 2001).

Portanto, a carbonatação em CAT é mais preocupante, já que o produto da hidratação consiste essencialmente em CSH, gel de menor razão Ca - Si (em comparação com o CP) (JOHANNESSON e UTGENANNT, 2001). Aperador et al. (2011) identificaram que devido à ausência de CH em CAT's, o CSH é a principal fonte de íons de cálcio na solução de poros para controlar o pH. Devido ao fato da relação Ca-Si no CSH presente nos CAT's ser menor, quando comparada ao CSH do CP, o CAT possui menor capacidade de manter um pH elevado da solução. Devido à desestabilização do CSH em um ambiente de baixo pH, os íons de cálcio de CSH em CAT's são transformados em CH e, finalmente, em CaCO_3 quando expostos a CO_2 (ADAM, 2009).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a análise da carbonatação em concretos produzidos por meio da utilização de cimento álcali ativado (CAT) à base de escória ácida.

Além do objetivo principal, este trabalho tem como objetivos específicos:

- 1) Comparar a resistência à carbonatação do CAT com o cimento Portland;
- 2) Comparar o comportamento à carbonatação do CAT à base de escória a carvão vegetal com a literatura (CAT à base de escória a carvão mineral);
- 3) Contribuir para o entendimento dos mecanismos de carbonatação de CAT's formulados com escórias à base de escória a carvão vegetal;

1.2 JUSTIFICATIVA

Os cimentos álcali ativados (CAT) são polímeros inorgânicos que são gerados a partir da ativação de material aluminossilicato sólido para formar uma nova classe de rede tridimensional de alumino-silicatos alcalinos (DUXSON, et al., 2007; SLATY et al., 2013; LEMOUGNA et al., 2014). Esses materiais são uma alternativa atraente ao cimento Portland (CP), pois possuem uma resistência à compressão, dureza e estabilidade química comparáveis, com menor necessidade de energia consumida e menos gases de efeito estufa emitidos durante a produção (SLATY et al., 2013).

A deterioração precoce das estruturas de concreto armado com base em CP é um fenômeno atual com consequências significativas tanto em termos de custo para a reabilitação dessas estruturas, quanto em termos de impactos ambientais associados a essas operações (TORRALBA et al., 2012).

Estudos (BERNAL et al., 2011; SONG et al., 2014) demonstraram que compósitos de CAT apresentam altas propriedades mecânicas, podendo ser até maiores do que o CP em idades precoces e tardias. Bernal et al. (2011) verificou que concretos de CAT, de 28 dias de idade, apresentam resistências 40% superiores a concretos de CP de mesma idade, já aos 90 dias de idade a diferença aumenta para 44%.

Quanto à durabilidade, mais especificamente a carbonatação, pode-se afirmar que em materiais álcali ativados, o mecanismo de carbonatação ainda não está totalmente entendido, entretanto, foi demonstrado que estes materiais geralmente funcionam mal quando testados em condições de carbonatação acelerada em comparação com produtos à base de CP (BERNAL, 2015).

CAT's podem ser obtidos tendo como matéria-prima base a escória de características básicas ($Ca/Si > 1$) ou ainda a partir de escória ácida ($Ca/Si < 1$). Normatizações existentes, que tratam das exigências de composição das escórias em CP, orientam para a utilização de escórias básica na composição daqueles (BS 6699, 1992; ASTM C989/C989M, 1999; ABNT NBR 5735, 1991; EN 197-1, 2000). Este cenário estimula o desenvolvimento de pesquisas de CAT tendo como percussor a escória básica, tratando de seu desempenho mecânico (SAN NICOLAS et al., 2012; ALTEF et al., 2012; ARELLANO et al., 2014), assim como

de aspectos relacionados a durabilidade (LI et al., 2017; YE et al., 2017; NEDELIJKOVIC et al., 2018). Neste sentido, estudos dedicados a CAT caracterizada como ácida ficam em detrimento, sendo que os mesmos tratam basicamente de aspectos de resistência (BEN HABA et al., 2011b; BEN HABA et al., 2012), deixando uma lacuna acadêmica em aspectos de durabilidade, necessitando assim de estudos que venham a gerar conhecimento neste aspecto.

Neste cenário, o objetivo deste trabalho reside na investigação da durabilidade de compósitos de cimentos álcali ativados (CAT) à base de escória caracterizada como ácida, em aspectos relacionados, especificamente, à resistência à carbonatação, por meio de ensaio específico de carbonatação e análises microestruturais, contribuindo ao desenvolvimento de estudos relativos a materiais álcali ativados.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2, faz-se uma revisão da literatura no qual são apresentados os principais conceitos e conhecimentos desenvolvidos sobre compósito de CAT, além de estudos referentes à resistência a carbonatação dos mesmos. O capítulo 3 descreve em detalhes os materiais e métodos para o desenvolvimento da pesquisa elaborada, destacando os procedimentos e normas utilizadas para tal. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios e verificações elaborados, além das discussões referentes a estes dados. E por fim, o capítulo 5 é destinado à apresentação das conclusões obtidas ao final da pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo é destinado à apresentação de conhecimentos e conceitos difundidos na academia, decorrentes de pesquisas existentes referentes à durabilidade de compósitos cimentícios, objeto de pesquisa do presente estudo.

Serão apresentadas neste capítulo as principais características da constituição e definição de cimentos álcali ativados (CAT's); os aspectos relacionados a durabilidade de estruturas de concreto, focando na carbonatação dos compósitos cimentícios e em concretos produzidos a partir da utilização de CAT à base de escória de características ácidas.

2.1 CIMENTO ÁLCALI ATIVADO (CAT)

CAT's são materiais cimentícios formados por meio de um ataque alcalino aos aluminossilicatos amorfos ou vítreos de uma matéria prima. Quando misturados com ativadores alcalinos, estes materiais se estabelecem e enrijecem, produzindo um material com boas propriedades cimentantes (BERNAL, 2016).

Uma das características mais proeminentes da tecnologia de ativação alcalina é que tanto materiais naturais (como argila ou feldspatos) e subprodutos industriais (como escórias e cinzas volantes) podem ser utilizados como materiais primários. Uma grande variedade de CAT's foi desenvolvida nas últimas décadas. Com base na natureza dos seus componentes cimentícios (sistema CaO-SiO₂-Al₂O₃), os CAT's podem ser agrupados em duas categorias principais: (1) cimentos de alto teor de cálcio e (2) cimentos com baixo teor de cálcio, sendo que o padrão de ativação difere em cada um (GARCÍA-LODEIRO et al., 2013a, 2013b).

- Modelo 1: Sistema (Na,K)₂O-CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. Neste modelo, materiais ricos em cálcio e silício, tais como escória de alto-forno (SiO₂ + CaO > 70%) são ativados em condições alcalinas relativamente moderadas. Neste caso, o principal produto da reação é um gel C-A-S-H (silicato de cálcio hidratado), semelhante ao gel obtido durante a hidratação do cimento Portland (CP), diferenciando-se pela absorção de alumínio (Al) na sua estrutura (BAKHAREV et al., 2001).

- Modelo 2: Sistema $(\text{Na,K})_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. Neste modelo, os materiais ativados compreendem principalmente alumínio e silício. Os materiais utilizados neste segundo modelo, como o metacaulin ou as cinzas volantes, possuem baixos teores de CaO. Neste caso, são necessárias condições de trabalho mais agressivas para iniciar as reações (meios altamente alcalinos e temperaturas de cura de 60-200°C). O principal produto de reação formado neste caso é um polímero alcalino inorgânico tridimensional, um gel de hidrato de N-A-S-H (aluminossilicato alcalino hidratado) (PROVIS E VAN DEVENTER, 2009). Este gel também é conhecido por geopolímero.

Atualmente, um terceiro modelo de ativação alcalina, uma combinação dos dois anteriores, também é descrito. Neste, o produto é um novo tipo de aglomerante conhecido como cimento alcalino híbrido, formado por meio da ativação alcalina de materiais com conteúdo de CaO, SiO₂ e Al₂O₃ > 20% (GARCÍA-LODEIRO et al., 2013a, 2013b). Esses materiais podem ser divididos em dois grupos. O Grupo A inclui materiais com um baixo conteúdo de clínquer de CP e uma alta proporção (mais de 70%) de adições minerais. Exemplos: cimento + escória, cimento + cinzas volantes, cimento + escória + cinzas volantes. O Grupo B compreende misturas que não contêm cimento Portland, exemplo: escória de alto-forno + cinzas volantes (PALOMO et al., 2013).

Os produtos de reação que precipitam neste terceiro grupo (cimentos híbridos) são muito complexos, compreendendo uma mistura de géis de cimento, incluindo C-A-S-H e gel (N,C)-A-S-H (géis N-A-S-H de alto teor de cálcio) (GARCIA-LODEIRO et al., 2013a, 2013b).

2.2 CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A reação química entre um material à base de cimento e dióxido de carbono (CO₂) é chamado de carbonatação, e é um dos processos de degradação mais nocivos que podem afetar drasticamente a durabilidade a longo prazo da infra-estrutura civil (NEDELIJKOVIC et al., 2018). Um material verdadeiramente sustentável deve ser durável e, portanto, os esforços foram focados na última década para entender as mudanças induzidas pela carbonatação na microestrutura de CAT's e seus consequentes efeitos sobre a permeabilidade e a

resistência mecânica, para prever a vida útil e desempenho (BERNAL e PROVIS, 2013).

A carbonatação de CP ocorre quando o CO_2 da atmosfera difunde através da rede de poros do material e se dissolve na solução de poro que forma HCO_3^- . Este ânion é um ácido fraco e reage com produtos de hidratação presentes na matriz, principalmente com portlandita (Ca(OH)_2), silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e etringita (BERNAL e PROVIS, 2013), promovendo a formação de carbonato de cálcio através de um processo de descalcificação. Este processo leva à decomposição das fases resistentes e uma queda no pH interno do sistema, que facilita o desenvolvimento da corrosão de componentes de aço em materiais de concreto armado (NEDELIJKOVIC et al., 2018).

Em CAT's, o mecanismo de carbonatação ainda não está totalmente entendido, mas foi demonstrado que é fundamentalmente um mecanismo químico que ocorre em duas etapas: (1) carbonatação da solução no poro levando a uma redução do pH e a eventual precipitação de carbonatos ricos em Na, seguido de (2) descalcificação de fases ricas em Ca (principalmente C-S-H, uma vez que a portlandita geralmente não se forma nesses sistemas) e carbonatação de produtos de reação secundária do sistema (BERNAL et al., 2013). Esses materiais geralmente apresentam baixo desempenho quando testado em condições de carbonatação acelerada em comparação com produtos à base de CP. No entanto, taxas de carbonatação naturais tão baixas, como 1 mm / ano foram identificadas em estruturas envelhecidas à base de CAT's (SHI et al., 2006).

2.2.1 MÉTODOS DE TESTE UTILIZADOS PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

A concentração relativamente baixa de CO_2 na atmosfera (0,03-0,04%) faz da carbonatação um processo lento em materiais cimentícios densos e quimicamente estáveis. Isso levou ao desenvolvimento de métodos de teste acelerados expondo o material a altas concentrações de CO_2 com o objetivo de induzir a carbonatação. Isso geralmente é alcançado através do uso de câmaras climatizadas onde as condições de exposição tais como temperatura, umidade

relativa (UR) e concentração de CO₂ podem ser completamente controlados. A Tabela 2 mostra um resumo dos métodos de teste e protocolos utilizados para a avaliação da resistência à carbonatação de materiais cimentícios. É importante citar que a resistência à carbonatação de CAT's é geralmente testada usando os mesmos métodos aplicados em testes de CP, entretanto a aplicabilidade àqueles materiais ainda precisa ser validada.

Tabela 2 – Protocolos utilizados para a avaliação da resistência à carbonatação de materiais cimentícios.

Teste	Pré condicionamento de amostras	Indicador	Condições de Exposição
BS EN 13295:2004	Amostras cobertas com plástico filme durante 24 h, desmoldado e selado novamente com uma película de plástico por 48 h, seguido de cura das amostras sob água aos 21 ± 2 ° C durante 27 dias. Depois, as amostras devem ser levadas a um mesmo teor de umidade, que é alcançado armazenando as amostras a 21 ± 2 ° C e 60 ± 10 UR até peso constante, para um mínimo de 14 dias.	1 g de fenolftaleína dissolvido em 70 mL de etanol diluído para 100 mL com destilado ou Água deionizada	[CO ₂]: 1%, T: 21 ± 2°C RH: 60 ± 10%
RILEM CPC-18	Não especificado	Solução de 1% fenolftaleína em 70% de etanol	[CO ₂]: Não especificado T: 20°C RH: 65%
Nordtest Method: NT Build 357	As amostras são removidas 1 dia. Após, são curadas em água 20 ± 2°C por 14 dias. Depois curadas a ar 50 ± 5% de UR, 20 ± 2°C até atingir um total de 28 dias de cura	1 g de fenolftaleína dissolvido em 500 mL de água destilada e 500 mL de etanol	[CO ₂]: 3%, T: Não especificado RH: 55–65%
Portuguese Standard LNEC E391	Amostras curadas submersas em água durante 14 dias a 20 ± 2°C, e armazenado em ambiente fechado a 50 ± 5% de UR e 20 ± 2°C até 28 dias	0,1% de fenolftaleína em solução alcoólica	[CO ₂]: 5 ± 0.1% T: 23 ± 3°C RH: 55–65%
French test method Afpc-Afrem (1997)	Amostras curadas por 28 dias são saturado com água antes do CO ₂ exposição, e depois seca na estufa 40 ° C por 2 dias.	0,1% de fenolftaleína em solução alcoólica	[CO ₂]: 50%, T: 20°C RH: 65%

Fonte: BERNAL (2015) – Adaptado.

Segundo Sanjuán et al. (2003), a reprodução e repetição dos resultados obtidos, seguindo diferentes protocolos de ensaios acelerados de carbonatação, têm sido fortemente questionados, e, portanto, a comparação entre os resultados da carbonatação relatados em estudos diferentes devem ser abordados com cautela.

Segundo Sanjuán et al. (2003), o método da fenolftaleína é amplamente utilizado para determinar a profundidade da frente de carbonatação.

2.2.2 MECANISMOS DA CARBONATAÇÃO

O avanço da carbonatação se dá pela “frente de carbonatação”, uma vez que as reações, referentes à carbonatação, se iniciam na face externa, por meio da difusão de CO_2 , direcionando-se ao interior da peça em função do tempo. A frente de carbonatação é considerada como a zona de interface entre a camada carbonatada e a não carbonatada (HOPPE FILHO, 2008).

Hoppe Filho (2008) e Possan (2010) apresentaram individualmente esquemas do progresso da frente de carbonatação, indicados neste estudo pelas Figura 5 e Figura 6, respectivamente.

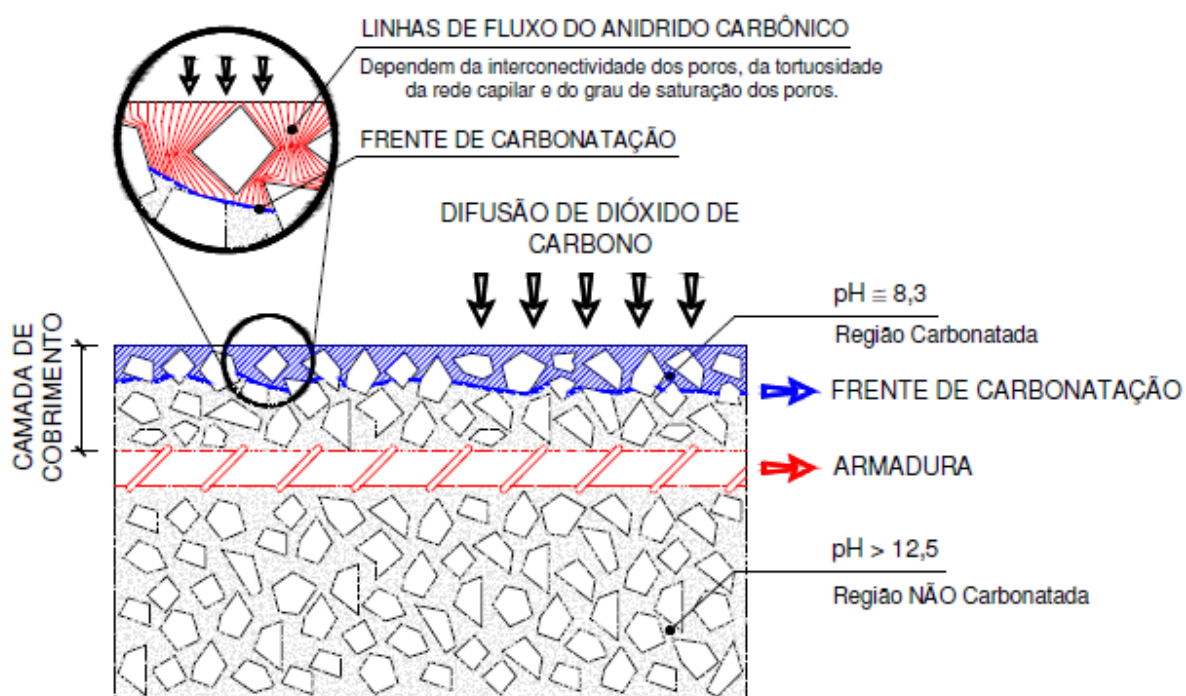


Figura 5 – Representação esquemática do mecanismo de carbonatação.

Fonte: HOPPE FILHO, 2008.

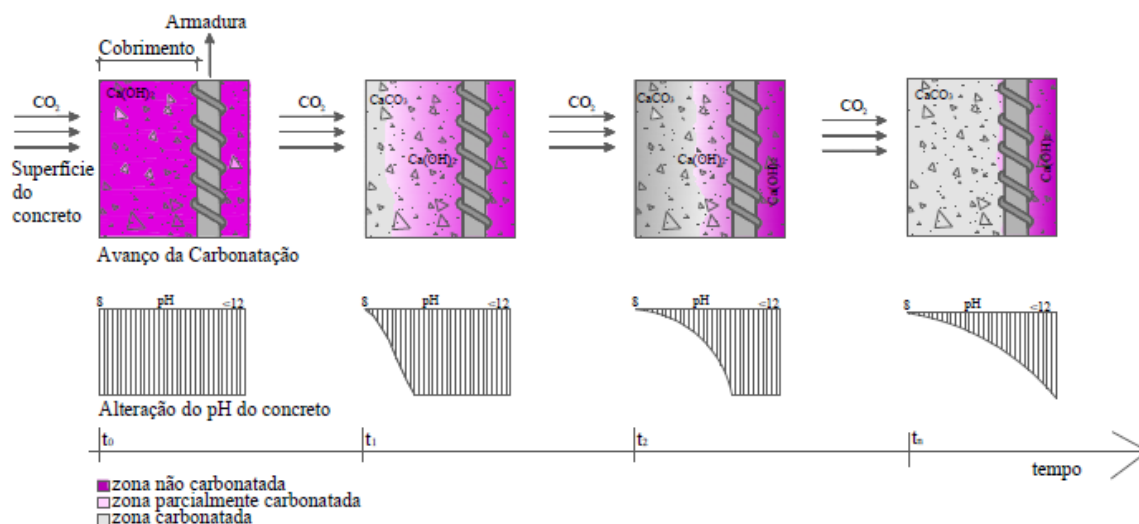
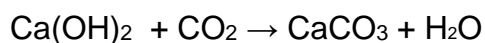


Figura 6 – Representação da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo.
Fonte: POSSAN, 2010.

A carbonatação é definida como um processo físico-químico, o qual, segundo Cascudo & Carasek (2011), altera a composição de compósitos de natureza alcalina, provenientes das reações de hidratação de cimentos, transformando-os em sais (natureza ácida), através da ação CO_2 . Salienta-se que tal reação somente é observada quando além da presença do CO_2 também se verifique a presença de água nos poros na matriz hidratada e presença de hidróxidos alcalinos, para reagir com o H_2CO_3 formando assim o produto da carbonatação – CaCO_3 . Com a presença dos elementos citados, as reações de carbonatação se iniciam.

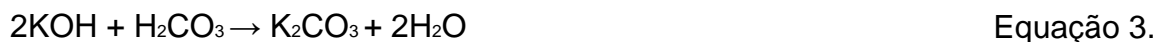
As reações de carbonatação de compósitos de CP podem ser descritas de forma simplificada. Pauletti (2004) apresenta a principal reação da carbonatação – Equação 1, uma vez que a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é mais elevada que dos outros hidróxidos na composição de pasta hidratada.



Equação 1.

Entretanto, as reações ocorrem em etapas, sendo a primeira referente à formação do carbonato de cálcio, quando o ácido carbônico – H_2CO_3 , produto da dissolução do CO_2 em água presente nos poros da matriz, reage com o hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Nesta etapa também ocorre a reação do H_2CO_3 com

hidróxido de potássio (KOH) e de sódio (NaOH) formando, respectivamente carbonato de sódio - K_2CO_3 e Na_2CO_3 respectivamente (JANG e LEE, 2016) - Equações 2, 3, 4 e 5.



Bakharev et al. (2001), em seu trabalho apresentam também a possibilidade de o CO_2 atmosférico exercer seu ataque a outros compostos de hidratação de materiais cimentícios. Decorrente do exaurimento da portlandita, ou de sua não formação, o C-S-H da matriz pode sofrer este ataque, culminando em perda de resistência, além da esperada queda do pH da mistura - Equação 6:



Silva (2011) indica que a carbonatação além de ser o processo responsável pelo início da corrosão do aço, também provoca fenômeno de retração, nomeado de retração por carbonatação, gerando tensões de tração, internas ao material e culminando em aumento da tendência de fissuração. Papadakis et al. (1992) explica tal processo pela transformação de $Ca(OH)_2$ em carbonato de cálcio que precipita nos poros causando redução de seu volume.

Tuutti (1982) apresenta a equação matemática base para calcular o processo de carbonatação – Equação 7, onde e_c corresponde a espessura carbonatada em mm; t o tempo e K um coeficiente que depende da difusividade de CO_2 através do concreto e é nomeado por coeficiente de carbonatação, sendo sua unidade de medida $mm/ano^{0,5}$. Este último elemento comprova a possível variação de carbonatação entre concretos, uma vez que a difusividade de CO_2 depende de diversas variáveis, exemplificando pode-se citar: tipo de cimento, consumo de cimento, porosidade, relação a/c, grau de hidratação, entre outras.

$$e_c = K\sqrt{t} \quad \text{Equação 7.}$$

Para Neville e Brooks (2013) o coeficiente K, com muita frequência ultrapassará a ordem de 3 ou 4 mm/ano^{0,5}.

2.2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE MASSA RELACIONADOS À CARBONATAÇÃO

Os processos que governam a entrada dos agressores ao concreto, através da estrutura de poros da matriz da pasta, são denominados de mecanismos de transporte de massa, dos quais cabe destacar a permeabilidade, a absorção capilar e a difusão. No caso específico de transporte de cloretos, há outro fenômeno conhecido por migração iônica, o qual transporta íons através de um campo gerado por uma corrente elétrica. Um fator que se deve atentar é a possibilidade destes mecanismos agirem de forma conjunta, dificultando a definição de modelo de transporte de massa e conseqüentemente dificultando a definição de mecanismos de previsão (SILVA 2011; POSSAN, 2010).

Um dos tipos de transporte, pode se sobressair aos demais, e isso depende do tipo de fluido ou gás a ser transportado. No caso específico da carbonatação, é consenso entre os pesquisadores que o transporte de massa preponderante é a difusão.

2.2.3.1 Difusão

Medeiros (2008) define difusão como o transporte de íons na solução de poros de concreto causado por uma diferença de concentração do íon em questão em regiões distintas. O resultado é a ocorrência de um fluxo de íons partindo de regiões de alta concentração para regiões de baixa concentração.

A difusão não depende do fluxo de fluidos, sendo necessária apenas um gradiente de concentração para que ocorra. Mas é necessário um teor de umidade mínimo no concreto para haver o transporte do íon, podendo ocorrer também se os poros estiverem saturados.

Para Nepomuceno (2005) as condições atmosféricas e as propriedades do concreto influenciam fortemente no coeficiente de difusão.

A difusão é quantitativamente expressa através do coeficiente de difusão que pode ser determinado através das soluções da 2ª Lei de Fick.

A Equação 8 apresentada a primeira Lei de Fick da difusão, para fluxo unidirecional, onde o coeficiente de difusão D é dependente das características microestruturais do material e das substâncias presentes no fluido que preenche os poros. A concentração C é constante e independe do tempo, x representa a profundidade onde está sendo medida a concentração e q_m é o fluxo de massa (NEPOMUCENO, 2005).

$$q_m = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

Equação 8.

Já a 2ª Lei de Fick - Equação 9, estabelece que a concentração é dependente do tempo e varia de acordo com a posição x (NEPOMUCENO, 2005).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Equação 9.

2.2.3.2 Permeabilidade

A permeabilidade corresponde ao transporte de um fluido através de um material, por meio de sua estrutura de poros, o qual somente é verificado quando de um diferencial de pressão.

Para Zang et al. (2018) a permeabilidade dos materiais está intimamente ligada a porosidade, assim como às características físicas destes poros. Poros capilares de maiores dimensões, atuam como ponte de interligação entre os poros, facilitando o transporte de massa no material.

A permeabilidade é diretamente proporcional à relação água/aglomerante, pois quanto maior for a quantidade de água maior será a quantidade e tamanho dos poros e, por consequência, terá maior permeabilidade (NEVILLE e BROOKS, 2013), conforme Figura 7.

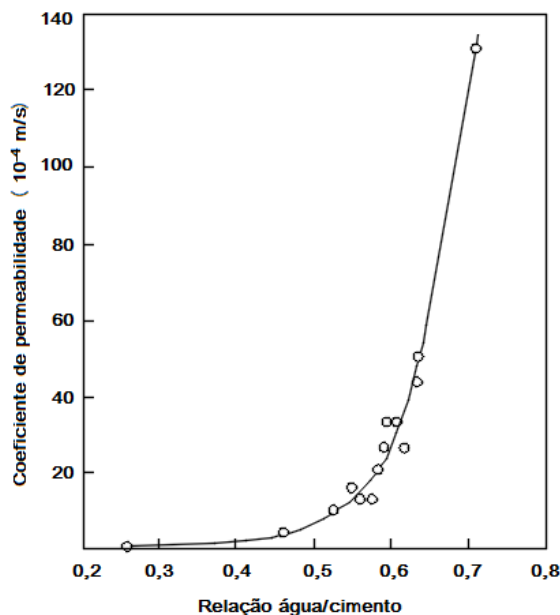


Figura 7 – Curva da relação entre relação água/aglomerante e permeabilidade.

Fonte: NEVILLE e BROOKS, 2013.

Neville e Brooks (2013) afirmam que a permeabilidade não se trata apenas de aspectos de porosidade, mas sim das características destes poros (forma, tortuosidade e continuidade). Concretos de alta porosidade nem sempre apresentarão alta permeabilidades também, isso depende da continuidade dos poros.

2.2.3.3 Absorção Capilar

A absorção pode ser descrita como a capacidade de absorver água por meio de sucção capilar. É fortemente influenciada pelo volume de poros, bem como pela conectividade da rede de poros e tem sido utilizada como um fator importante para quantificar a durabilidade dos sistemas cimentícios (BENTZ, 2001).

Para Neville e Brooks (2013), a penetração de água por absorção capilar depende da viscosidade do fluido e diâmetro interno dos poros. Se a absorção depende das dimensões dos poros, é possível correlacionar a absorção à relação água/cimento do compósito e ao processo de cura utilizado, uma vez que estes influenciam o transporte de massa no concreto.

A absorção de água pelo concreto é um fator de difícil controle, pois não se pode analisar apenas o diâmetro dos poros, mas também a interconexão entre

capilares que pode deixar o concreto vulnerável a agentes agressores, pois forma um caminho para aqueles, podendo culminar na deterioração da armadura.

Segundo Raisdorfer (2015) quanto menor for o diâmetro do capilar, maior será a ascensão do líquido no seu interior (Figura 8).

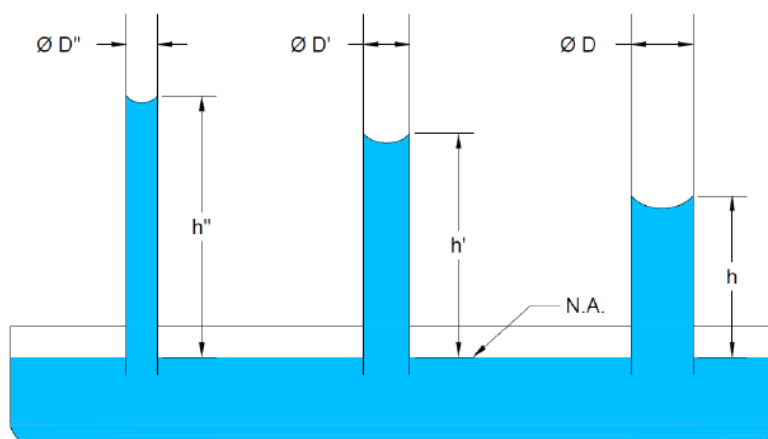


Figura 8 – Esquema de capilaridade para diâmetro pequeno, médio e grande.

Fonte: RAISDORFER, 2015.

A Figura 9 apresenta de forma resumida quadro contendo as principais características de cada mecanismo de transporte discutido. Observa-se que todos os mecanismos citados têm relação direta com os poros do compósito, seja com relação a sua quantidade, estrutura ou conectividade, exceto o mecanismo de migração iônica que está intimamente ligada à tensão aplicada. Ainda, verifica-se que o único mecanismo ocorrente em gases é a difusão, sendo este o responsável pelo início do processo de carbonatação do concreto, no qual o dióxido de carbono adentra ao compósito por conta de diferença de concentrações.

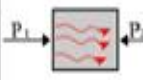

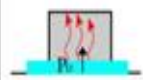
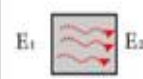
Mecanismo	Parâmetro (indicador de durabilidade)	Definição	Esquema	Fatores de influência	Relevância
Permeabilidade	Coefficiente de Permeabilidade a água - k (mm/s)	Fluxo de um fluido através do concreto devido a um gradiente de pressão ($P_1 > P_2$)		Depende do tamanho e continuidade dos poros, podendo ser descrita pela lei de Darcy.	Relacionada à conectividade dos poros do concreto.
Difusão	Coefficiente de Difusão - D (cm ² /s)	Ingresso Cl^- ou CO_2 através do concreto devido a um gradiente de concentração dos agentes agressivos ($C_1 > C_2$).		Depende da composição e estrutura dos poros do concreto, da temperatura e do teor de umidade, sendo representado pela 1ª e 2ª leis de Fick.	Importante para estudos e modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado.
Sucção capilar	Coefficiente de Absorção de água - A (g/cm ² .h ^{0,5})	Ingresso de agentes agressivos e água através do concreto devido à pressão capilar (P_0).		Depende do diâmetro dos poros, da tensão superficial do líquido e da sua viscosidade.	Determinação da velocidade de penetração de água através do concreto, o que está diretamente relacionado à durabilidade.
Migração iônica	Resistividade elétrica - ρ (ohm.cm)	Movimento de íons através dos poros do concreto devido a um potencial elétrico (E_1 e E_2).		Depende do teor de umidade, da temperatura e da tensão aplicada.	Monitoramento do desenvolvimento da corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado (no período da propagação).

Figura 9 – Resumo dos principais mecanismos de transporte de gases.

Fonte: POSSAN, 2010.

2.2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO

Segundo pesquisas desenvolvidas – Silva (2002); Kashef-Haghighi et al. (2015); Wu et al. (2017) e Stefanoni et al. (2018), a carbonatação de compósitos cimentícios é influenciada por fatores internos (fatores relacionados ao concreto) e externos (meio ambiente), sendo que inseridos nestes dois grandes grupos, vários subgrupos se apresentam, os quais possuem influência sobre a taxa de carbonatação do concreto.

2.2.4.1 Fatores relacionados ao concreto

Aglomerantes

As características que governam as propriedades dos cimentos dizem respeito a sua composição química e sua finura. Tais características também terão influências significativas na taxa de carbonatação de concretos. Neville e Brooks (2013) afirmam que cimentos compostos (com inserção de adições minerais) apresentam menores concentrações de Ca(OH)_2 , sendo necessária menor quantidade de CO_2 para que a frente de carbonatação avance em direção ao

centro do elemento, uma vez que terá que combinar-se com o Ca(OH)_2 produzindo o CaCO_3 . Entretanto, outro efeito é verificado, o refinamento da estrutura do poro, reduzindo assim, a taxa de difusão do CO_2 ao concreto, tornando a carbonatação mais lenta.

A intensidade da frente de carbonatação pode também ser reduzida em compósitos cimentícios de maior pureza (maior quantidade de clínquer em sua composição), uma vez que intensifica a reserva alcalina, decorrentes das características dos produtos de hidratação daqueles, necessitando maior massa de CO_2 para seu consumo e posterior novo avanço da frente de carbonatação.

Em cimentos, quanto maior a taxa de clínquer na composição e menor granulometria (maior finura), maior será a produção de álcalis (KOH , NaOH e principalmente Ca(OH)_2) durante sua hidratação, propiciando condições ideais para o ataque de CO_2 , entretanto, esta condição também reduz a velocidade de penetração da frente de carbonatação, uma vez que aumenta a reserva alcalina existente, necessitando de maiores taxas de CO_2 para consumo daquela. Ainda, as reações de carbonatação, descritas no subitem 2.2.2, têm como produto final o carbonato de cálcio, que colmatam os poros superficiais, aumentando a compacidade da matriz e conseqüentemente reduzindo a taxa de difusão de CO_2 entre os mesmos (BERTOS et al., 2004).

A mesma dubiedade ocorre quando a análise é feita em compósitos de cimentos com adições, os quais apresentam menor teor de clínquer e conseqüentemente menores teores dos produtos de hidratação do mesmo, reduzindo a quantidade de álcalis presente na matriz, propiciando maior facilidade para a entrada de CO_2 já que a reserva alcalina é inferior aos cimentos comuns. Contudo, a finura da adição reduz a porosidade do concreto dificultando a entrada do CO_2 .

Outros teóricos também relatam tal situação, afirmando que concretos produzidos através de cimentos que contém adições, apesar de resultarem em uma estrutura com poros de maior refinamento (o que aumenta a sinuosidade dos capilares e reduz sua permeabilidade), apresentam profundidades de carbonatação superiores, aos CP's comum. Esta situação é verificada devido à preponderância do efeito de redução do teor de produtos carbonatáveis

(JOHANNESSON e UTGENANNT, 2001; KULAKOWSKI, 2002; MORANDEAU et al., 2014).

Raisdorfer (2015) estudou a substituição de CP por diversos tipos de adição (sílica ativa, cinza volante, metacaulim, cinza de casca de arroz e fíler de quartzo) em dois teores de substituição (10 e 30%), além da inserção de adições minerais ao CP, e concluiu que CP's com menores teores de adições minerais, apresentam profundidades de carbonatação inferiores aos demais. A Figura 10 demonstra os resultados obtidos.

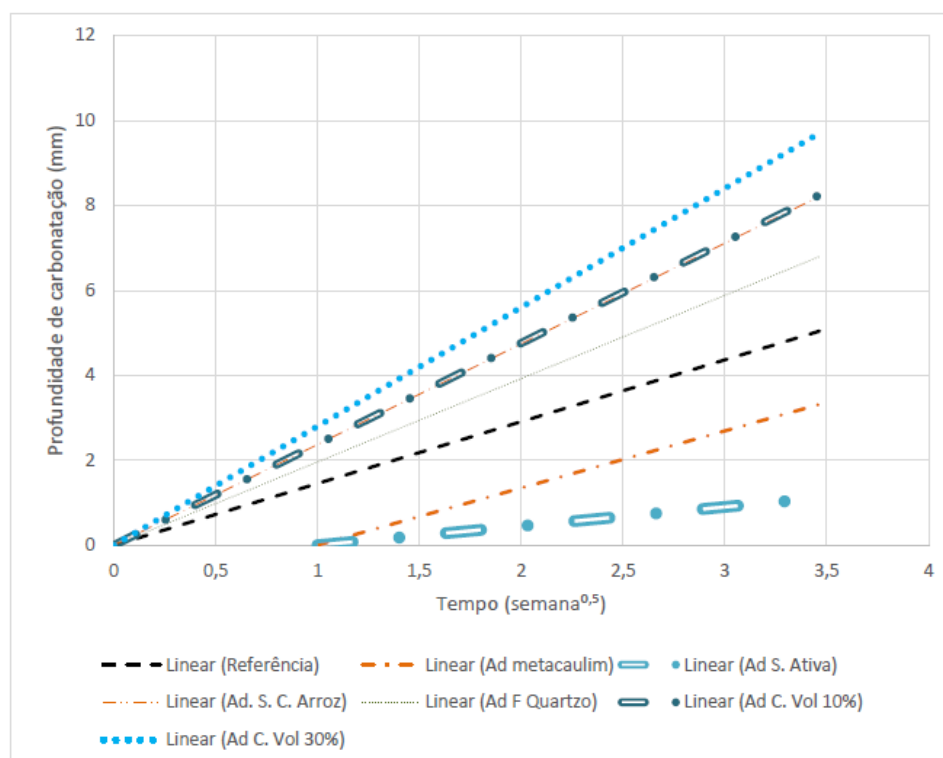


Figura 10 – Profundidade de carbonatação dos concretos estudados.

Fonte: RAISDORFER, 2015.

Com base nos citados estudos é possível concluir que cimentos que possuem adição tendem a apresentar maiores profundidades de carbonatação, pois não oferecem grandes dificuldades ao acesso do dióxido de carbono devido a menor reserva alcalina. Uma propriedade que ameniza a situação é a menor porosidade destes tipos de cimento, proporcionada por sua característica física de maior finura, decorrente da finura da adição (Li et al., 2017). Todavia, não é o suficiente para equilibrar seu desempenho ao desempenho de CP comum (sem

adições). Algumas adições além do efeito físico reagem com o Ca(OH)_2 , é o caso da sílica ativa e cinza volante, consumindo aquele álcali, reduzindo ainda mais a reserva alcalina. A partir destas definições, é possível concluir que CP's comuns (sem adições) tem maior tendência à carbonatação, uma vez que possuem maior teor de produtos carbonatáveis, entretanto ao analisar a profundidade de carbonatação, são cimentos com adições que apresentam maiores profundidades, uma vez que têm baixa reserva alcalina, não criando grandes empecilhos para o avanço da frente de carbonatação, exceto a menor porosidade. Para Abreu (2004) que pesquisou a corrosão do reforço de aço em decorrência da carbonatação em concretos de cinza volante, a profundidade de carbonatação é um aspecto de grande significância, correlacionada a durabilidade de estruturas de concreto armado, uma vez que alcançando a armadura, dá-se início ao processo de corrosão da mesma.

Relação água/ cimento

É de notório conhecimento a correlação entre a relação água/aglomerante e as propriedades mecânicas e de durabilidade de um concreto, uma vez que relação a/c é o principal fator condicionante da porosidade de um concreto. Sendo assim, o aumento da relação a/c propicia aumento da porosidade e conseqüente aumento da difusão de CO_2 entre estes poros, que por fim ocasiona maiores profundidades de carbonatação em concretos.

A correlação entre porosidade e qualidade do concreto é abordada por Andrade (2012) que indica que concretos com porosidade inferior a 10% são considerados de boa qualidade, compactos, concretos de porosidade 10 a 15% também são considerados de boa qualidade, entretanto seu uso não é recomendado a ambientes agressivos, e por fim, concretos de porosidade superior a 15% são considerados inadequados e incapazes de proteger a armadura de aço.

Outra autora que corrobora ao aumento da carbonatação com o aumento da relação a/c é Kulakowski (2002) que indica a forte influência da relação a/c na profundidade de carbonatação de concretos, indicando que em baixas relações (0,45) a carbonatação foi irrisória em ensaio acelerado, apresentando resultados de aumento da profundidade de carbonatação em concretos com relação a/c de

0,70, informando também que concretos de baixa resistência mecânica 15 MPa e com relação a/c alta (0,80) são extremamente suscetíveis a carbonatação.

Neste ponto, é importante salientar o descrito por Neville e Brooks (2013) que indicam a diferenciação entre porosidade e permeabilidade. Segundo os autores, apenas alguns poros contribuem para a permeabilidade, a porosidade pode ser determinada pela proporção do volume total do concreto que é ocupada por poros. Se os poros forem interligados, contribuem para o deslocamento dos fluídos, caso contrário, uma alta porosidade não significa alta permeabilidade.

Shida e Maekawa (2017) verificaram em sua pesquisa o refinamento da estrutura do poro após processo de carbonatação e relacionaram este fenômeno a formação de CaCO_3 e colmatação na estrutura do poro, desta forma, o poro se apresenta mais preenchido, uma vez que o cristal de CaCO_3 é aproximadamente 11,7% maior que o de Ca(OH)_2 que anteriormente se depositava na estrutura do poro.

Em suma, compósitos de maior porosidade propiciam maior velocidade de carbonatação, principalmente quando estes poros estão interligados. A porosidade de um compósito está diretamente relacionada à relação a/c, sendo que relações baixas desfavorecem a carbonatação, podendo a mesma chegar a estágios insignificantes, e altas relações potencializam tal fenômeno. Deve-se considerar a facilidade com que o CO_2 adentra à matriz, decorrente de baixa reserva alcalina, que por sua vez é decorrente da utilização de adições. Através do processo de carbonatação verifica-se aumento da compacidade do compósito uma vez da colmatação de CaCO_3 na estrutura do poro.

2.2.4.2 Fatores relacionados ao meio ambiente

Concentração de CO_2

Conforme descrito no título 2.2.3, que se destina a apresentação dos mecanismos de transporte de massa nos concretos, a difusão é o mais contundente, e para que este mecanismo se estabeleça a diferença de concentração de CO_2 entre o ambiente externo (atmosfera) e interno (matriz do compósito) deve existir.

A concentração de CO_2 na atmosfera é decorrente de processos industriais e de emissões decorrentes de veículos automotores. Por esta definição

fica intrínseca a informação de que o teor deste gás na atmosfera é variável, com maior ocorrência em regiões de grandes centros urbanos e menor ocorrência em meios rurais. Saetta e Vitalini (2004) comentam que o teor de CO₂ em meio rural é de aproximadamente 0,015%, em zonas urbanas de 0,036% e em zonas industriais de 0,045%.

Possan (2010), em levantamento de diversas bibliografias, concluiu que a concentração média de CO₂ na atmosfera, indicados por aqueles ficam em uma faixa de 0,03 a 1%.

A diferença de concentração de CO₂ entre o ambiente, ao qual o concreto está inserido, e a própria matriz do concreto é que dá o início ao processo de difusão do CO₂ na estrutura do concreto. Desta forma, quanto maior for a diferença entre concentração de gás, maior será a carbonatação do compósito.

Devido ao prolongado tempo necessário para verificação da carbonatação em compósitos cimentícios, quando expostos a condições atmosféricas naturais, a metodologia difundida no meio acadêmico para verificação da carbonatação naqueles é a de execução de ensaios acelerados. Para tanto, teores de CO₂ bem superiores ao encontrado em ambientes naturais são utilizados. No mesmo sentido, Possan (2010), comenta em até 20 anos de verificações necessárias, trabalhando com compósitos de relação a/c de 0,50, para a observação da carbonatação em compósitos cimentícios submetidos a ambientes naturais. A autora ainda aborda a falta de normatização para ensaios acelerados, verificando diversas metodologias, inclusive com grandes variações do teor de CO₂.

Sanjuán et al. (2003) recomendam testes com percentuais de CO₂ inferiores a 20%, pois acreditam que, em elevadas concentrações desse gás (próximas da saturação), ocorram mudanças microestruturais, não desenvolvidas em concentrações menores. Entretanto, cabe salientar que o teor ideal é desconhecido, variando de acordo com cada pesquisa. Hyvert (2009) verificou um crescimento da profundidade de carbonatação, em função do acréscimo do teor de CO₂ até a faixa de 20%. Após isso os resultados são inconclusivos.

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos no estudo de Rougeau (1997) e Hyvert (2009), que demonstram a influência do teor de CO₂ no coeficiente de carbonatação de concreto.

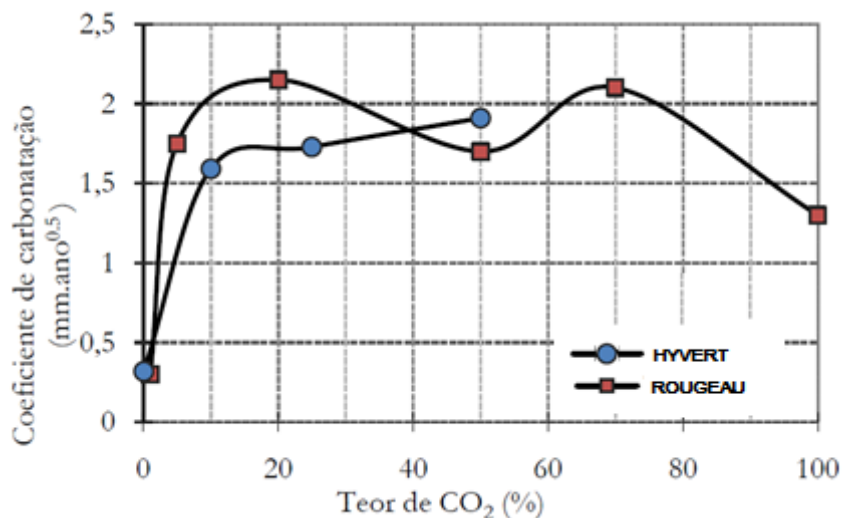


Figura 11 – Influência do teor de CO₂ no coeficiente de carbonatação.

Fonte: HYVERT, 2009 apud POSSAN, 2010.

Umidade

A presença de água nos poros do concreto exerce função de agente duplo, quando trata-se do processo de carbonatação. Se por um lado, ao preencher os poros do compósito impede a entrada de CO₂, por outro, em compósitos em condições de não saturação – em poros não totalmente preenchidos por água, atua como elemento necessário à reação do CO₂ com o Ca(OH)₂, colaborando para a dissolução deste e formação do carbonato de cálcio (NEVILLE e BROOKS, 2013). Sendo assim, em condições de baixa umidade (abaixo de 50%) a carbonatação é reduzida, devido à falta de água para as reações de carbonatação, assim como em condição de alta umidade (acima dos 90%), devido a impossibilidade de o CO₂ adentrar ao concreto.

A carbonatação de materiais de cimento geralmente é mais rápida em umidade relativa intermediária (50-70%) e diminui em umidade relativa mais alta e mais baixa (GALAN et al., 2013). A alta umidade aumenta a fração de poros repletos de água, dificultando a difusão do CO₂ gasoso, enquanto que em baixas umidades a rede de poros não será suficientemente úmida para promover o ácido carbônico (BERNAL et al., 2014a). Sob condições intermediárias de umidade, tanto a cinética da reação quanto a difusão de CO₂ são favoráveis e, portanto, a aceleração do processo de carbonatação é observada (GALAN et al., 2013). Neste cenário é possível afirmar que não há definição precisa quanto à umidade

ideal ao processo de carbonatação. As pesquisas existentes apresentam uma faixa ideal entre 50 e 85% - Figura 12.

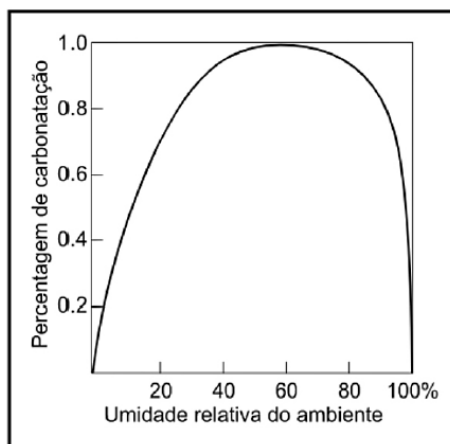


Figura 12 – Umidade relativa do ambiente x Percentual de carbonatação.

Fonte: ROSEMBERG et al. (1989) apud RAISDORFER, 2015.

Temperatura

Sabe-se que a temperatura é um fator de influência na velocidade das reações químicas, uma vez que está ligada à agitação das moléculas. Aumentando-se a temperatura, aumenta-se também a energia cinética das moléculas, se chocando mais, culminando em aumento da velocidade da reação. Entretanto, quando se trata do fenômeno de carbonatação de compósitos à base de cimento, a variação de temperatura não possui grande influência na carbonatação.

Neville e Brooks (2013) concordam que pequenas variações de temperatura exercem pouca influência no processo de carbonatação. Assim como concordam, que a temperatura não tem influência na carbonatação, quando na faixa de 20 a 40°C, uma vez que o processo ainda é governado pela difusão iônica, a qual está condicionada principalmente a diferença de concentração.

2.2.4.3 Fatores de controle da carbonatação em materiais cimentícios

A carbonatação de cimentos é controlada pela difusividade e reatividade do CO₂ dentro da matriz, que é fortemente dependente das propriedades de transporte do material, bem como da química de ligação de fases. A difusividade do CO₂ gasoso é afetada pela interconectividade dos poros e as condições de

exposição à carbonatação, incluindo a concentração de CO₂, umidade relativa e temperatura. Já a reatividade do CO₂ dependerá de sua concentração, bem como do tipo de aglomerante, da maturação do gel CSH e da solução química dos poros, pois controlam a natureza e a química dos produtos de reação que estarão presentes ao longo do tempo de serviço e, conseqüentemente, sua suscetibilidade a reagir com CO₂ (Li et al., 2017).

Em CAT's, pode-se esperar que a difusividade do CO₂ seja controlada pelas mesmas variáveis identificadas em CP, uma vez que é um mecanismo física e quimicamente controlado, impulsionado principalmente pela permeabilidade do material. No entanto, a reatividade do CO₂ neste tipo de aglomerante, difere fortemente do observado em CP, já que a química e a natureza da formação de produtos de reação são bastante diferentes.

2.2.5 CARBONATAÇÃO EM CAT

2.2.5.1 Condições de exposição

Em CAT's, o mecanismo de carbonatação ainda não está totalmente entendido, mas foi demonstrado que é fundamentalmente um mecanismo controlado física e quimicamente que ocorre em duas etapas: (1) carbonatação da solução porosa levando a uma redução do pH e a eventual precipitação de carbonatos ricos em Na, seguidos por (2) a descalcificação de fases ricas em Ca (principalmente C-S-H, já que geralmente não se forma portlandita) (BERNAL et al., 2012; 2013). Estes materiais geralmente funcionam mal quando testados em condições de carbonatação acelerada em comparação com produtos à base de CP (BERNAL, 2015).

Byfors et al. (1989) publicaram um dos primeiros estudos de carbonatação de materiais álcali ativados e identificaram que umidades relativas mais elevadas (80%) promoveram taxas de carbonatação mais baixas do que identificadas em amostras carbonatadas com 50% de umidade relativa, além de que concretos à base daqueles apresentam carbonatação mais intensa quando comparada com amostras de CP formuladas para obter resistência à compressão similar. Resultados semelhantes foram obtidos por Bakharev et al. (2001), que observaram uma maior tendência à carbonatação (associada a profundidades de

carbonatação mais altas medidas através do método da fenolftaleína) em concretos à base de CAT que nos concretos de CP expostos a água carbonatada (solução de NaHCO_3 a 0,35 mol).

Em estudo posterior, Deja (2002) identificou profundidades de carbonatação comparáveis em argamassas e concretos de CAT, e em amostras de referência à base de CP, com maiores resistências à compressão. Esses resultados foram atribuídos ao refinamento da estrutura dos poros, tanto no CAT quanto no CP, associada à precipitação de carbonatos que se formam à medida que a reação de carbonatação avança. É importante notar que a carbonatação foi acelerada com uma umidade relativa de 90%, e em uma atmosfera de 100% de CO_2 , e, portanto, os resultados deste estudo particular precisam ser interpretados com cuidado quando comparado com condições de exposição natural. Com uma umidade relativa muito alta, espera-se que os poros estejam totalmente saturados de umidade e, portanto, mesmo usando altas concentrações de CO_2 , a difusividade deste gás através da rede de poros será dificultada, tanto em amostras de CAT como de CP. Isso reduzirá a probabilidade de desenvolver um processo de carbonatação suficientemente representativo para dar uma boa indicação de como esses materiais funcionarão sob condições naturais.

Bernal et al. (2014a) avaliaram o efeito das condições de exposição (umidade relativa e concentração de CO_2) no progresso da carbonatação acelerada de concretos à base de CAT, mostrando que o progresso da carbonatação é ligeiramente maior quando o teste foi conduzido com 65% de umidade relativa, em comparação com amostras carbonatadas em umidades relativas de 50% ou 80%. No entanto, após períodos mais longos de testes de carbonatação, o efeito da umidade relativa tornou-se menor.

Compósitos de CAT's podem ser mais suscetíveis a processos de retração do que compósitos de CP (PALACIOS E PUERTAS, 2007), especialmente nos primeiros tempos de cura (CHI et al., 2012), sendo que a intensidade da retração é fortemente influenciada pela natureza e concentração do ativador alcalino. A cura em condições secas promove a dessecação dos produtos da reação, especialmente em CAT's, levando a mudanças estruturais e resultando em microfissuração superficial do material, o que facilita a entrada de CO_2 . Conseqüentemente, durante o pré-condicionamento das amostras antes dos

testes de carbonatação acelerada, conforme exigido pelos padrões e protocolos disponíveis, é provável que mudanças severas na permeabilidade superficial do material ocorram como resultado da retração por secagem (ISMAIL et al., 2013).

Bernal et al. (2013) afirmam que tanto no CP quanto nos CAT a concentração de CO₂ durante o ensaio de carbonatação acelerada desempenha um papel fundamental na indução de mudanças estruturais nos produtos vinculados e, portanto, no mecanismo de carbonatação acelerada. Mudanças na solução de poros das amostras carbonatadas de CP carbonados sob diferentes concentrações de CO₂ e umidade relativa também foram identificados. Em CAT's, observaram-se diferenças significativas na porosidade total e na estrutura capilar desses materiais, com o aumento de 1% para 3% na concentração de CO₂ (BERNAL et al., 2014a). Em outro estudo, Bernal et al. (2012) demonstraram que a concentração de CO₂ também afeta a carbonatação da solução porosa, uma vez que pequenas mudanças de temperatura, umidade relativa e concentração de CO₂ levam à modificação do equilíbrio de fases do sistema Na₂CO₃-NaHCO₃-CO₂-H₂O, que pode descrever a solução de poros carbonatados de CAT's.

2.2.5.2 Composição do aglomerante

O mecanismo de carbonatação em CAT's é fortemente dependente do tipo de precursor utilizado (escória ou cinzas volantes) e da natureza e concentração do ativador utilizado, pois esses parâmetros controlam o tipo de produtos de reação formados (PALACIOS e PUERTAS, 2007). Puertas et al. (2006) observaram maiores profundidades de carbonatação acelerada em argamassas à base de escória ativadas com silicato de sódio do que nas amostras ativadas por hidróxido de sódio. Este resultado foi atribuído principalmente às diferenças na composição e estrutura do produto C-S-H em cada sistema. No caso das escórias ativadas com silicato, o C-S-H apresentou menor razão Ca / Si (~ 0,8) do que os formados quando o NaOH foi utilizado (razão Ca / Si ~ 1,2). O maior índice de Ca/Si, juntamente com o comprimento de cadeia de silicato observado em escórias ativadas com NaOH, pode favorecer a formação e precipitação de uma quantidade aumentada de produtos de carbonato para preencher os espaços de poros, quando comparados aos produtos de escória ativados com silicato, e isso poderia influenciar a difusividade do CO₂ no material.

Mais recentemente, Bernal et al. (2014b) observaram que o teor de MgO da escória influencia a extensão e no mecanismo de carbonatação de CAT's, de modo que um aumento do conteúdo de MgO na escória promoveu uma redução significativa na extensão da carbonatação. Isto está associado à formação de hidróxidos duplos em camadas com uma estrutura de hidrotalcita como produto de reação secundária em sistemas com conteúdo suficiente de MgO (> 5% em peso) (BERNAL et al., 2014b). Os hidróxidos duplos em camadas são materiais que têm a capacidade de absorver o CO₂, e, portanto, pode-se esperar que uma formação maior dessa fase contribua significativamente para melhorar o desempenho de pastas de CAT's quando expostas a altas concentrações de CO₂ (LEÓN et al., 2010).

Antes da carbonatação acelerada, as pastas de CAT com silicato apresentaram uma estrutura muito homogênea e coesa, como mostrado na Figura 13 (a). Em contrapartida, pastas carbonatadas (Figura 13 (b)) exibem uma estrutura altamente heterogênea e porosa. A superfície das pastas carbonatadas geralmente mostra partículas cristalinas com dimensões de alguns micrometros, acompanhadas de partículas de forma mais irregular, identificadas como calcita. A análise química destas pastas (Figura 13 (c)) mostra que a carbonatação da pasta conduz à descalcificação do gel do tipo C-A-S-H, juntamente com a formação de um produto de tipo aluminossilicato rico em sódio. Essas mudanças estruturais levam ao aumento da porosidade e à redução da resistência mecânica geralmente identificada em escórias ativadas após processo de carbonatação acelerada.

Bernal et al. (2013) observaram que o aumento do teor de pasta desses concretos reduz a profundidade da carbonatação, de modo que as profundidades de carbonatação são comparáveis às obtidas em concretos de CP produzidos com misturas semelhantes. Uma tendência semelhante foi identificada em concretos de CAT's com silicato naturalmente carbonatados, como mostrado na Figura 14, a qual foi justificada também pela redução da porosidade do compósito, decorrente de sua menor relação água/aglomerante. Esse efeito parece ser mais significativo quando os concretos são formulados com menores proporções de água / aglomerante. A profundidade da carbonatação também é fortemente dependente das condições de ativação, especificamente a concentração do ativador, uma vez que uma maior concentração de álcalis na solução de poros provavelmente atrairá

uma maior concentração de CO_2 , favorecendo a formação de ácido carbônico e carbonatos e, portanto, acelerando a reação de carbonatação (BERNAL et al., 2014b).

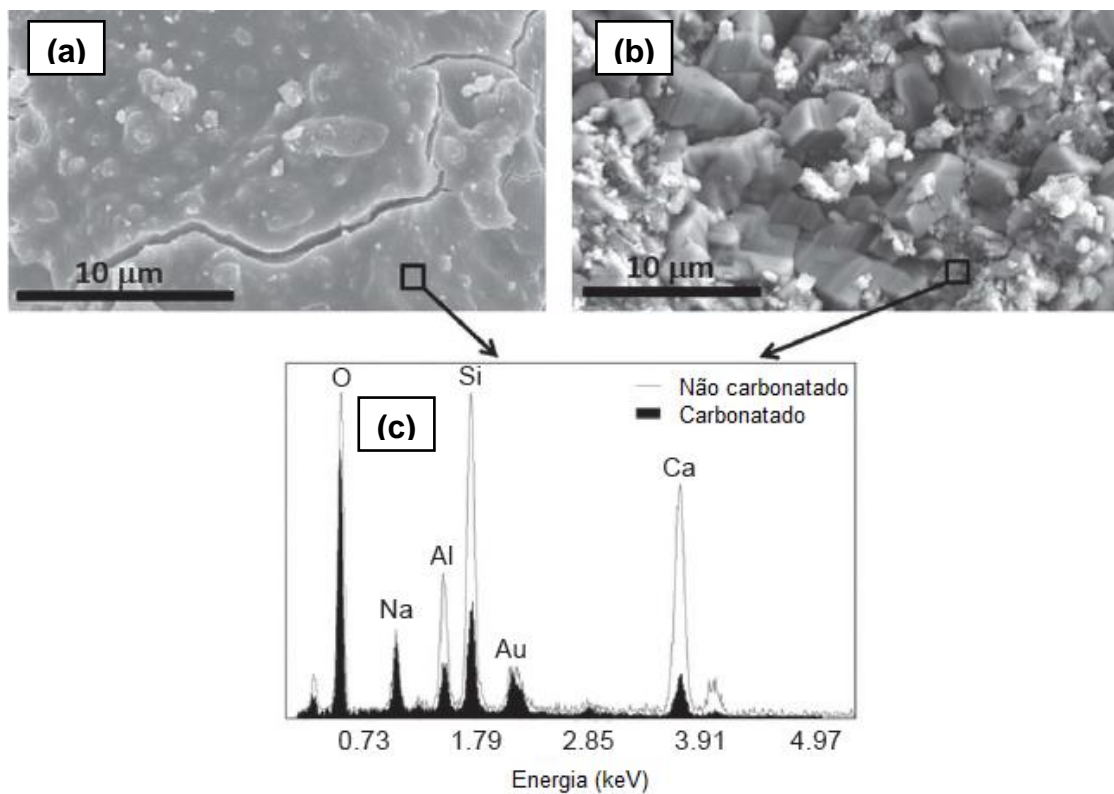


Figura 13 – Imagens de MEV de pastas de escória ativadas com silicato antes (a) e depois (b) de 1000h de exposição a 1% de CO_2 e dados EDX correspondentes (c).

Fonte: BERNAL (2015).

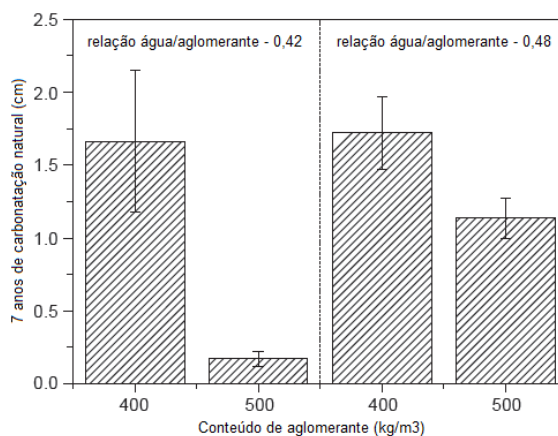


Figura 14 – Profundidade de carbonatação natural de concretos de escórias ativadas com silicato, em função do tipo da mistura. As barras correspondem ao valor de um desvio padrão entre 16 medidas.

Fonte: Bernal et al. (2014b).

2.2.5.1 Desempenho de CAT frente à carbonatação

Castellote et al. (2008) investigaram a carbonatação de CAT e compararam os resultados com compósitos de CP. A taxa de carbonatação de concretos de CAT, com relação água/cimento de 0,35 foi similar a taxa de carbonatação de concretos de CP de relação água/cimento de 0,60, sendo assim, suas conclusões foram de que concretos de CAT são carbonatados mais rapidamente que concretos de CP. Os autores atribuíram os resultados a baixa alcalinidade e fissuração de concretos de CAT, observadas através da técnica de microscopia eletrônica de varredura. Ainda consideraram que pastas de CAT carbonatadas apresentam maior porção de poros capilares do que pastas não carbonatadas.

Bakharev et al. (2001) investigaram a carbonatação em argamassas de CAT, em atmosfera contendo 20% de CO₂ e umidade relativa de 70%. Para comparação, argamassa de mesma relação água/cimento foi utilizada. Os resultados apontaram para queda de resistência em argamassas carbonatadas, tanto de CAT, quanto de CP, entretanto, a queda de resistência foi mais acentuada em argamassas de CAT (aproximadamente 13%), que em argamassas de CP (aproximadamente 0,03%) - Figura 15 (a), além de profundidades de carbonatação mais acentuadas em CAT (aproximadamente 10mm), enquanto que CP apresentou profundidade de carbonatação de aproximadamente 3mm (Figura 15 (b)). A diferença observada entre as argamassas de CAT e CP, foi também atribuída a fissuração de compósitos de CAT.

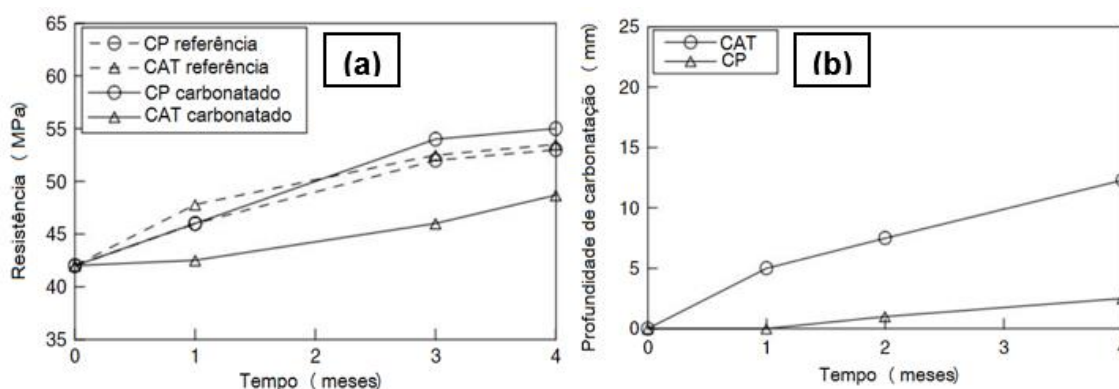


Figura 15 – Carbonatação de CP e CAT – 20%CO₂; Umidade relativa 70%: (a) resistência mecânica; (b) profundidade de carbonatação.

Fonte: Bakharev et al. (2001) - adaptado

A queda da resistência à compressão de compósitos de CAT, foi objeto de diversos estudos entre eles, de Li et al. (2017) que verificaram perda de 13,6% de resistência mecânica em argamassas de CAT carbonatadas, em relação à não carbonatadas, enquanto que argamassas de CP, apresentaram ganho de resistência (13,9%) - Figura 16. O ganho de resistência em CP é por conta da formação de CaCO_3 , que segundo os autores são micropartículas cristalizadas que se depositam nos poros da matriz, reduzindo a porosidade e promovendo o ganho de resistência. Já a perda de resistência de compósito de CAT é justificada através da baixa taxa de CaCO_3 cristalino e pela formação de CaCO_3 em decorrência da descalcificação do C-S-H.

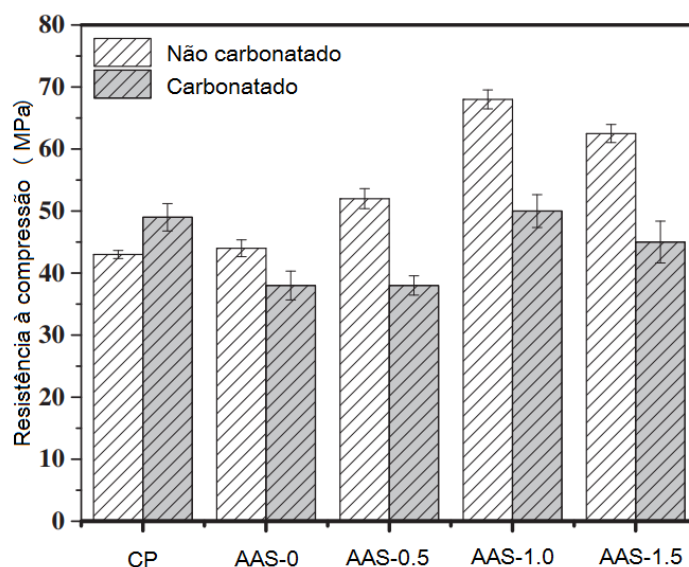


Figura 16 – Resistência mecânica de argamassa de CP e CAT (AAS) antes e depois da carbonatação.

Fonte: Li et al. (2017) - adaptado

Ye et al. (2017), em estudo que abordou a alteração de volume de argamassas de CAT, verificou significativo potencial de retração em amostras de CAT, relacionando este resultado a fissuração.

Salienta-se que os estudos apresentados, assim como os demais estudos de carbonatação de CAT's, abordaram escórias consideradas básicas ($\text{Ca}/\text{Si} > 1$). A Tabela 3 apresenta um resumo dos estudos de carbonatação de CAT's correlacionando com o índice de basicidade (Ca/Si).

Tabela 3 – Relação Ca/Si de pesquisas de carbonatação em CAT's.

Autores	Ano de publicação	Título	Ca/Si das escórias utilizadas
Bakharev et al.	2001	Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation	1,15
Bakharev, T. et al.	2001	Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation	1,16
Puertas, F. et al.	2006	Carbonation process of alkali-activated slag mortars	1,2
Bernal, A. et al.	2010	Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags	1,31
Bernal, A. et al.	2012	Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimates service life: The role of pore solution chemistry	1,41 e 1,26
Bernal, A. et al.	2013	Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation	1,26
Bernal, A. et al.	2014	MgO content of slag controls phase evolution and structural changes induced by accelerated carbonation in alkali-activated binders	1,35; 1,31 e 1,18
Song, K.I. et al.	2014	Carbonation characteristics of alkali-activated blast-furnace slag mortar	1,24
Bernal, A.	2015	Effect of the activator dose on the compressive strength and accelerated carbonation resistance of alkali silicate-activated slag/metakaolin blended materials	1,31
Behfarnia, K.; Rostami, M.	2017	An assessment on parameters affecting the carbonation of alkali-activated slag concrete	1,16
Ye, H.; Radlińska, A.	2017	Carbonation-induced volume change in alkali-activated slag	1,46
Li, N. et al.	2017	Microstructural changes in alkali-activated slag mortars induced by accelerated carbonation	1,15
Lee, N.K. et al.	2017	Physicochemical changes caused by reactive MgO in alkali-activated fly ash/slag blends under accelerated carbonation	1,3
Nedeljković, M. et al.	2018	Effect of natural carbonation on the pore structure and elastic modulus of the alkali-activated fly ash and slag pastes	1,14

Alguns dos estudos, acima mencionados – Johannesson et al. (2001); Li et al. (2017); Ye et al. (2017) visualizaram em análises microestruturais de CAT's carbonatados a presença do composto vaterita.

A Figura 17 e Figura 18 apresenta os difratogramas obtidos por Li et al. (2017) e Ye et al. (2017), demonstrando a presença de calcita e vaterita como produto da carbonatação de CAT. A Figura 19 apresenta análise térmica de CAT's antes e após a carbonatação, demonstrando a presença de pico significativo de vaterita a aproximadamente 600°C, após a processo de carbonatação.

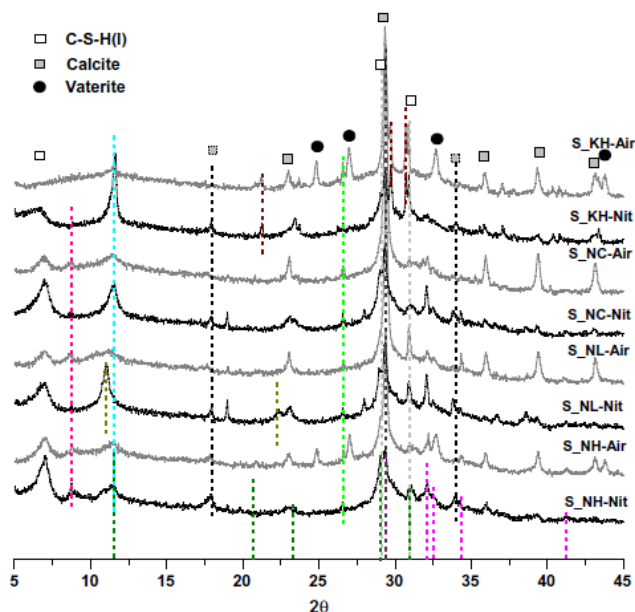


Figura 17 – Difratometria de raios-X de amostras de pastas de CAT.

Fonte: Ye et al. (2017).

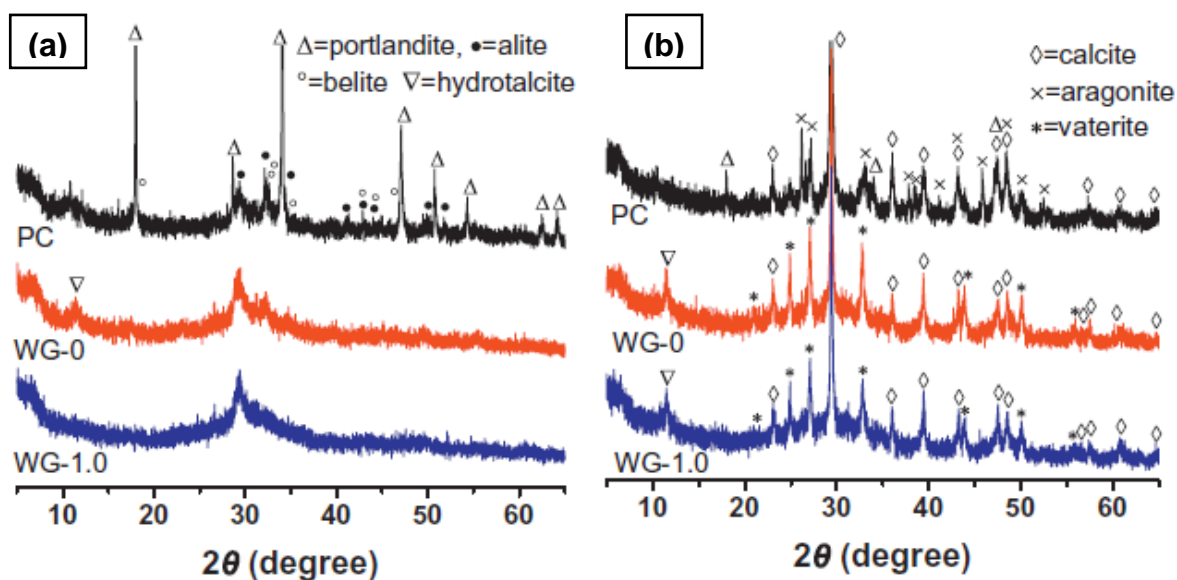


Figura 18 – Difratometria de raios-X de amostras de pastas de CAT, (a) antes e (b) após a carbonatação.

Fonte: Li et al. (2017).

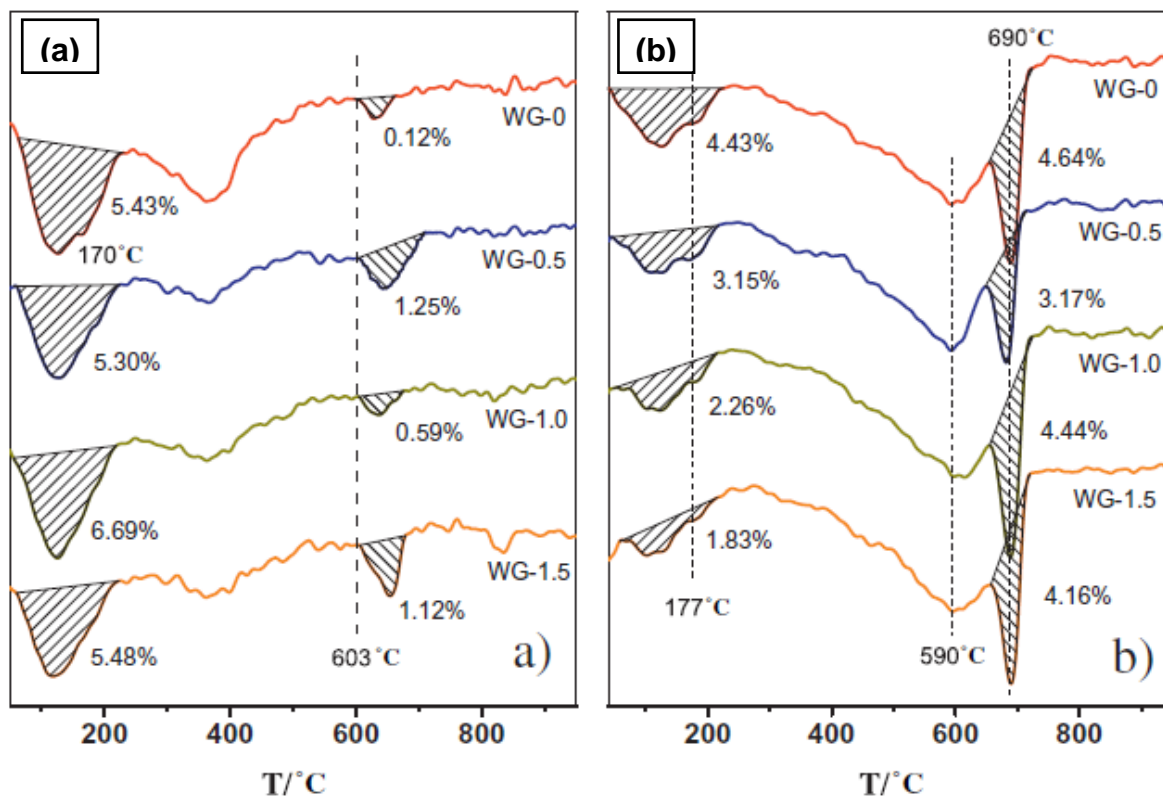


Figura 19 – Análise termogravimétrica (DTG) pastas de CAT, (a) antes e (b) após a carbonatação. Fonte: Li et al. (2017).

Segundo He (2011), a vaterita trata-se de polimorfo do CaCO_3 , uma fase metaestável. Como é menos estável do que a calcita, a vaterita tem uma maior solubilidade do que aquela, trata-se do CaCO_3 mal cristalizado. Existem três formas cristalinas comuns de carbonato de cálcio: calcita, aragonita e vaterite. Cristais de calcita são relativamente completos com boa estabilidade, enquanto vaterite é de baixa cristalinidade e baixa estabilidade, já a aragonita tem estabilidade intermediária entre calcita e vaterita (HE, 2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido com o escopo primordial de analisar a resistência à carbonatação de concretos que se utilizam de aglomerante tipo CAT, composto por escórias ditas ácidas, proveniente de alto-fornos a carvão vegetal. Sendo assim, o estudo consistiu na comparação de compósitos produzidos à base de CAT com compósitos produzidos com CP composto pozolânico de classe 32 resistente a sulfatos (CPIV-32 RS). Justifica-se a não utilização do CPIII – cimento de escória, em decorrência de indisponibilidade deste produto no mercado.

Este capítulo destina-se à apresentação dos procedimentos desenvolvidos, assim como a apresentação da caracterização dos materiais utilizados, com o intuito de verificar os níveis de carbonatação de compósitos de CAT, além de analisar a matriz daqueles, quando submetidos à presença do agente agressivo CO_2 . A Figura 20 apresenta o fluxograma dos ensaios elaborados

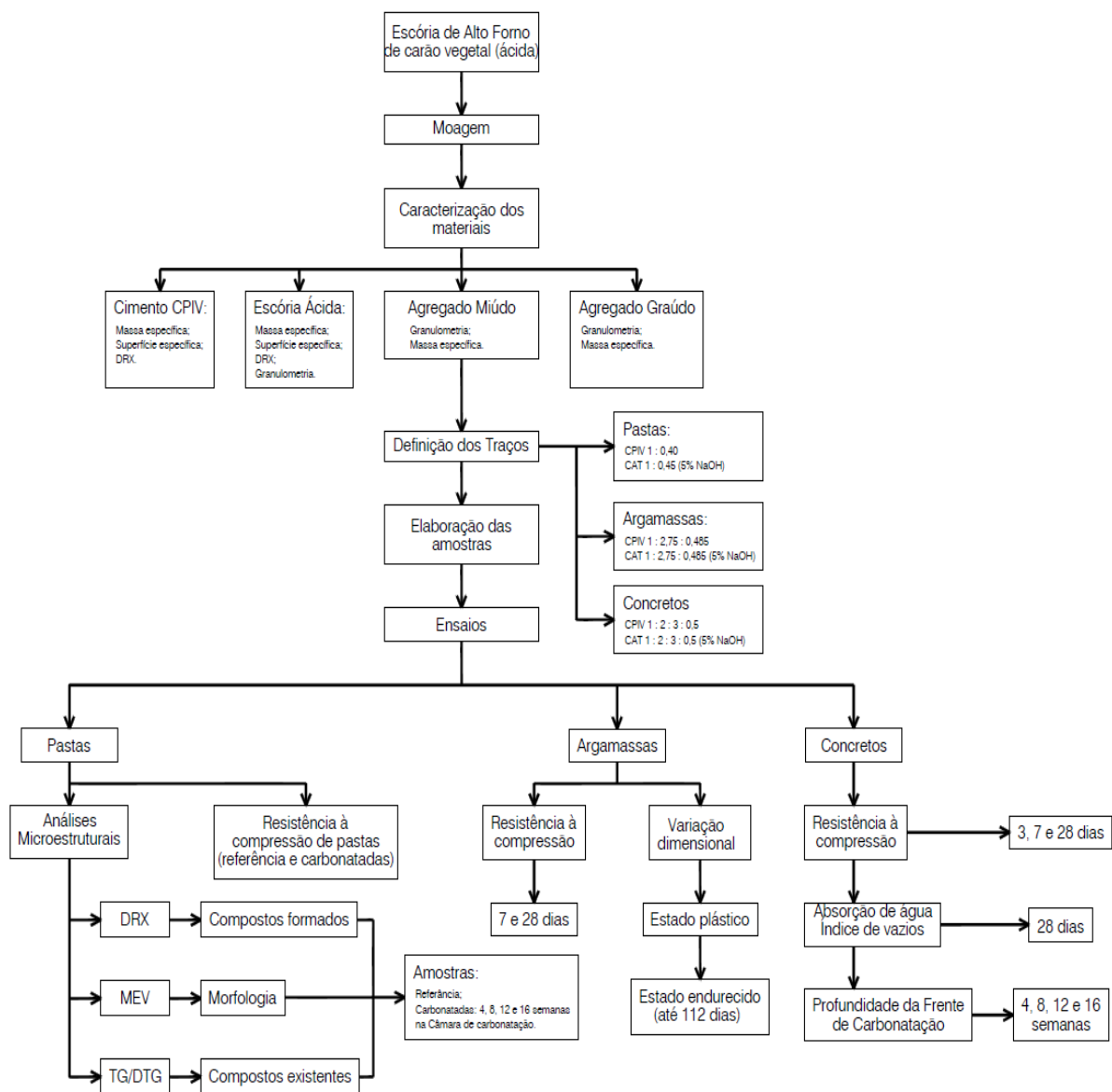


Figura 20 – Fluxograma dos ensaios.

3.1 AGLOMERANTES – CAT E CP

3.1.1 COMPOSIÇÃO FÍSICA E QUÍMICA

O CAT foi elaborado com escória de alto-forno de característica ácida ($Ca/Si = 0,97$), triturada finamente e ativada através de 5% de NaOH, em massa. A definição do ativador alcalino, assim como seu teor, se deu em função de estudo recente, o qual fez uso do mesmo precursor (escória) – Langaro (2016) que observou melhor desempenho em argamassas ativadas por meio de 5% de NaOH perante outros teores. Um CP brasileiro resistente a sulfatos (CP tipo IV-RS - 15-

50% de material pozolânico) também foi usado, para viabilizar análise comparativa. A composição química e as características físicas são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição química e física CP e GBFS

	CP	Escória
Peso específico, g/cm ³	2,83	2,76
Blaine, cm ² /g	*4158	5119
Perda ao Fogo, %	*3.43	0.2
SiO ₂ , %	*29.3	38.1
Al ₂ O ₃ , %	*9.88	13.9
CaO, %	*45.16	37.0
MgO, %	*2.81	6.2
SO ₃ , %	*2.23	0.1
Na ₂ O, %	-	0.2
K ₂ O, %	-	0.9
TiO ₂ , %	-	0.8
MnO, %	-	1.1
Fe ₂ O ₃ , %	-	1.3
Ca/Si	1.54	0,97

* Dados fornecidos pelo fabricante

Salienta-se que para a produção do CAT, empregado durante o decorrer de toda a pesquisa, o procedimento adotado foi o de utilizar escória ácida do mesmo lote, garantindo, desta forma, a padronização física e química desta matéria-prima. Ainda, para garantir a padronização do aglomerante final, além de padronizar a escória ácida, tomou-se o cuidado de fazer uso de ativador alcalino (NaOH) sempre do mesmo lote, possibilitando assim, a padronização do produto final (CAT).

Na Figura 21 tem-se a imagem da escória ácida, anteriormente à sua trituração e da escória ácida após o processo de trituração, no intuito de alcançar a granulometria requerida.

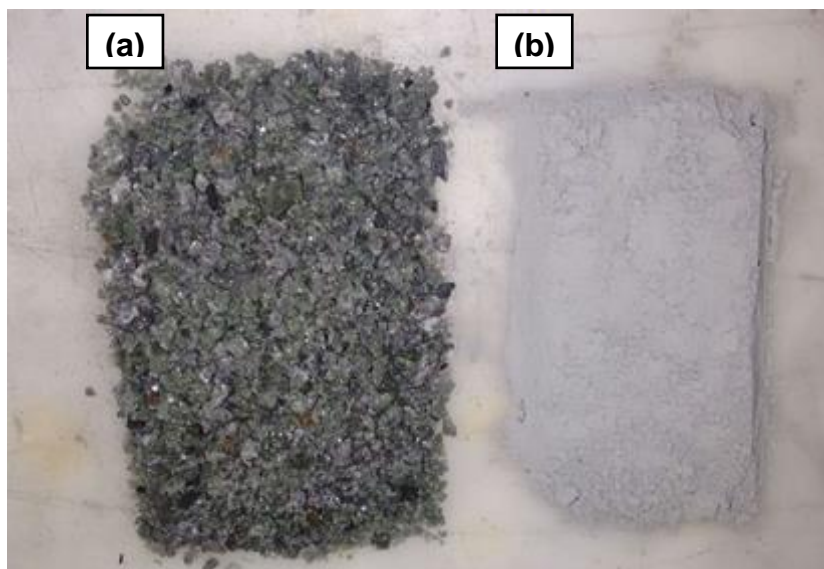


Figura 21 – (a) Escória ácida anteriormente a sua trituração (b) Escória ácida triturada.

Para a produção do CAT, a escória ácida passou por uma etapa de preparação, na qual foi seca em estufa, com temperatura controlada de 105°C por período de 24 horas, sendo, posteriormente triturada em moinho de bolas por 2 horas. Ao final deste processo, obteve-se a escória de alto-forno ácida moída finamente, propiciando a ativação da mesma por uma solução alcalina.

A Figura 23 apresenta por meio de difratograma a estrutura parcialmente amorfa da escória (BEN HAHA et al., 2011b) e a Figura 23 sua granulometria.

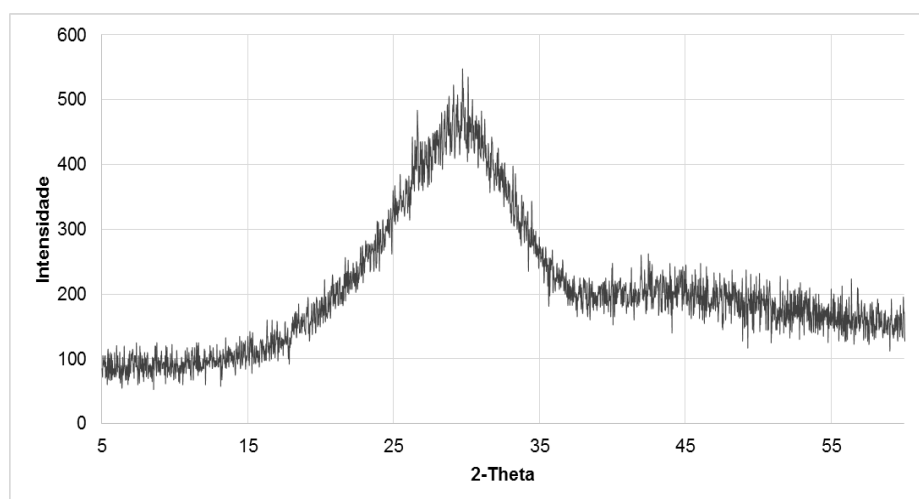


Figura 22 – Difratograma da escória de alto-forno.

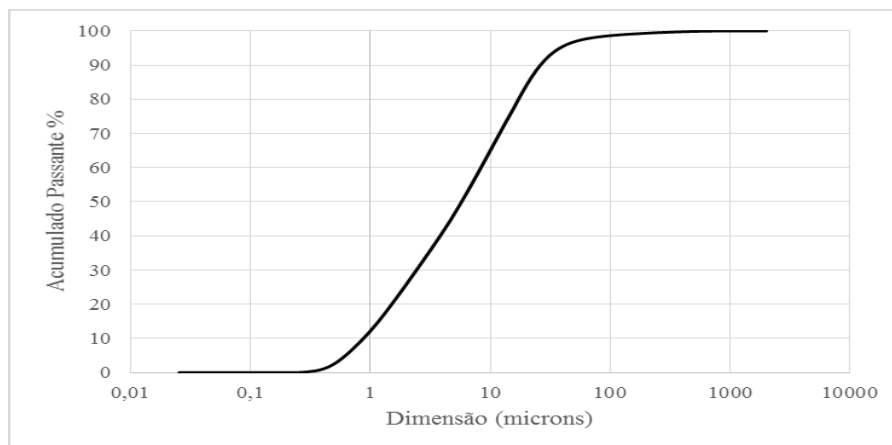


Figura 23 – Distribuição granulométrica da escória de alto-forno.

Para o CP foi realizado ensaio de difração de raios-X (DRX), com o objetivo de verificação das fases anidras do mesmo. Na Figura 24 tem-se o difratograma obtido, no qual se observa a predominância das fases anidras C_3S e C_2S (*DB card number* 01-086-0402 e *DB card number* 01-086-0399 respectivamente) na composição do cimento em questão. As fases anidras C_3A e C_4AF , não foram identificadas através da análise em questão.

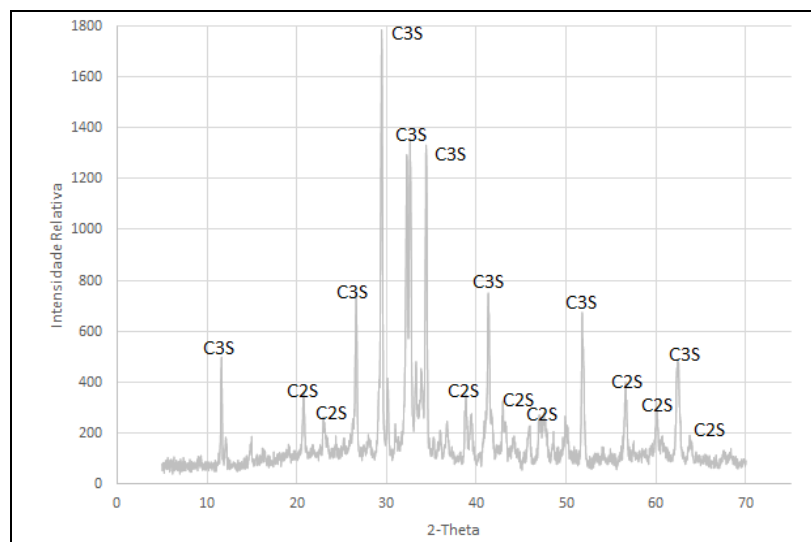


Figura 24 – Difração de raios-X do cimento CP-32 RS.

3.1.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

3.1.2.1 Resistência à compressão dos aglomerantes CAT e CP

Para a análise da resistência à compressão dos aglomerantes em estudo (CP e CAT) foram utilizadas argamassas à base daqueles.

O agregado fino utilizado, para a produção das referidas argamassas e concretos, foi do tipo areia natural com distribuição de tamanho de partículas apresentada na Figura 25. A Tabela 5 apresenta outros detalhes da caracterização física do agregado miúdo utilizado.



Figura 25 – Agregado fino - distribuição granulométrica.

Tabela 5 – Caracterização física agregado miúdo

Agregado miúdo	
Massa específica (g/cm ³)	2,65
D máx (mm)	1,18
Módulo de Finura (mm)	4,00

As argamassas produzidas para a realização dos ensaios descritos foram preparadas segundo as proporções estabelecidas pela ASTM C 348-02, ou seja, o traço utilizado foi o 1:2,75:0,485 (aglomerante : agregado miúdo : relação água/aglomerante em massa).

As argamassas foram elaboradas em misturador mecânico tipo argamassadeira e os procedimentos adotados para a preparação das mesmas foram os definidos pela ASTM C 348-02 (APÊNDICE A).

Anteriormente a verificação da resistência à compressão axial das argamassas à base de CP e CAT, foi verificado o índice de consistência das citadas por meio da análise de seu espalhamento. Observou-se que argamassas produzidas a partir de CAT apresentaram maior índice de consistência (espalhamento), quando comparada à argamassas estabelecidas através da utilização do CP (Tabela 6), resultados estes corroborados pelas pesquisas de Palacios (2006) e Puertas (2014).

Tabela 6 – Espalhamento argamassas de CP e de CAT.

Argamassa	Espalhamento (mm)
Argamassa CP	235
Argamassa CAT	294

A partir do espalhamento medido, foram confeccionadas as argamassas destinadas ao ensaio de resistência à compressão, as quais foram lançadas, através de procedimentos estabelecidos pela NBR 13279:2005, em moldes prismáticos de dimensões 4x4x16cm, estabelecendo 3 amostras de argamassa à base da CP e 3 à base da CAT. As amostras foram mantidas em cura úmida – processo que se resume a manter os corpos de prova suspensos, sem contato direto com a água, sendo a umidade mantida constante (superior a 95%), até as datas de ensaios, definidas em 3, 7 e 28 dias. A temperatura durante o processo de cura foi mantida em $23 \pm 1^\circ\text{C}$.

É importante citar que em decorrência do prolongado tempo de fim de pega de compósitos de CAT, todas as amostras de argamassa, tanto de CP quanto de CAT, elaboradas para o ensaio de compressão axial, somente foram desmoldadas após 96 horas, ou 4 dias. Entretanto, salienta-se que desde o lançamento nos moldes, as argamassas foram submetidas ao processo de cura citado, mesmo ainda estando inseridas nos moldes, aos quais permaneceram até o enrijecimento completo da argamassa de CAT.

Em cada idade de ensaio (7 e 28 dias) três amostras de cada tipo de argamassa foram testadas, conforme estabelece a NBR 13279:2005. Seguindo os

procedimentos estabelecidos por tal norma, os corpos de prova prismáticos foram primeiramente rompidos por esforço de flexão, transformando-se em 2 corpos de prova, os quais foram submetidos ao ensaio de compressão axial.

Os ensaios de resistência mecânica foram desenvolvidos fazendo-se uso de equipamento da marca EMIC, modelo DL-30, com capacidade de 30 toneladas-força e com velocidade de carregamento de 1,0 mm/min.

Na Figura 26 observar-se as médias de resistência dos corpos de prova. Os valores estão exibidos no APÊNDICE B.

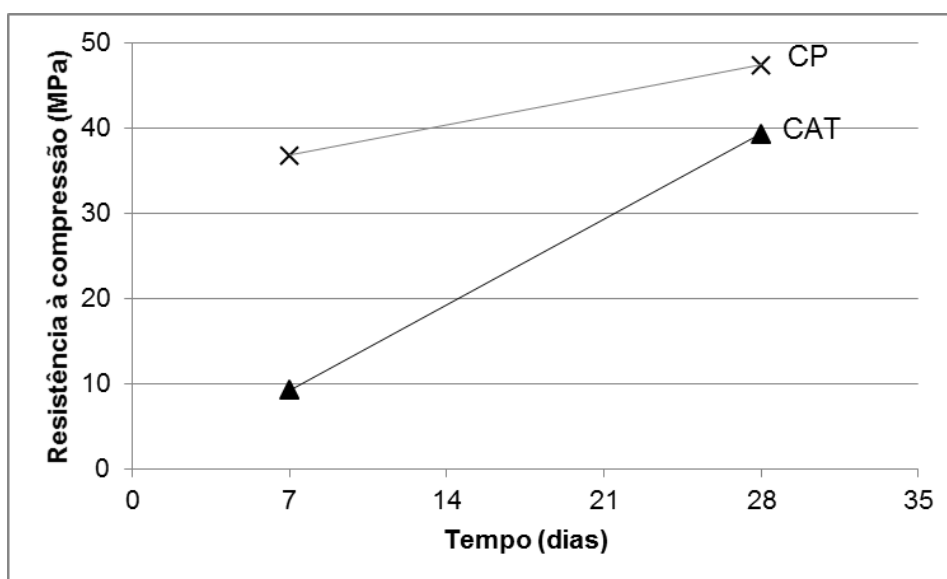


Figura 26 – Resistência à compressão de argamassas à base de CP e de CAT (7 e 28 dias), cura úmida (amostras 4cm x 4cm x 16cm).

Nota-se maior disparidade entre as resistências obtidas em menores idades (7 dias), quando comparadas às resistências verificadas em idades mais avançadas (28 dias). A resistência à compressão de argamassas de CAT obteve um incremento de 30,5 MPa (76,32%) da idade de 7 para 28 dias, enquanto que argamassas de CP apresentaram um ganho de 10,65 MPa (22,43%). Tal constatação decorre da menor velocidade de hidratação de escórias ativadas, a qual advém de seu baixo calor de hidratação, culminando em menores resistências iniciais para compósitos produzidos a partir daquelas. Salienta-se que as resistências finais atingidas superaram os limites estabelecidos em norma. Sua desvantagem quanto ao lento ganho de resistência está ligada ao baixo calor de hidratação (PAL et al., 2003). No Apêndice C observam-se o tratamento estatístico

dos dados (por meio de Teste Tukey), demonstrando a diferença entre as médias obtidas em argamassas de CAT e CP, tanto no ensaio aos 7, quanto aos 28 dias.

3.1.2.2 Variação dimensional dos aglomerantes CAT e CP

Variação dimensional em estado plástico

A variação dimensional em estado plástico de argamassas de CP e CAT foi verificada através de ensaio adaptado ao desenvolvido pelo *Institut National de Science Appliquées*– INSA/Toulouse. Na Figura 27 observa-se, esquematicamente, o equipamento desenvolvido pelo INSA para a leitura de variação dimensional de argamassas ainda em estado fresco, e a Figura 28 apresenta a adaptação utilizada no presente estudo.

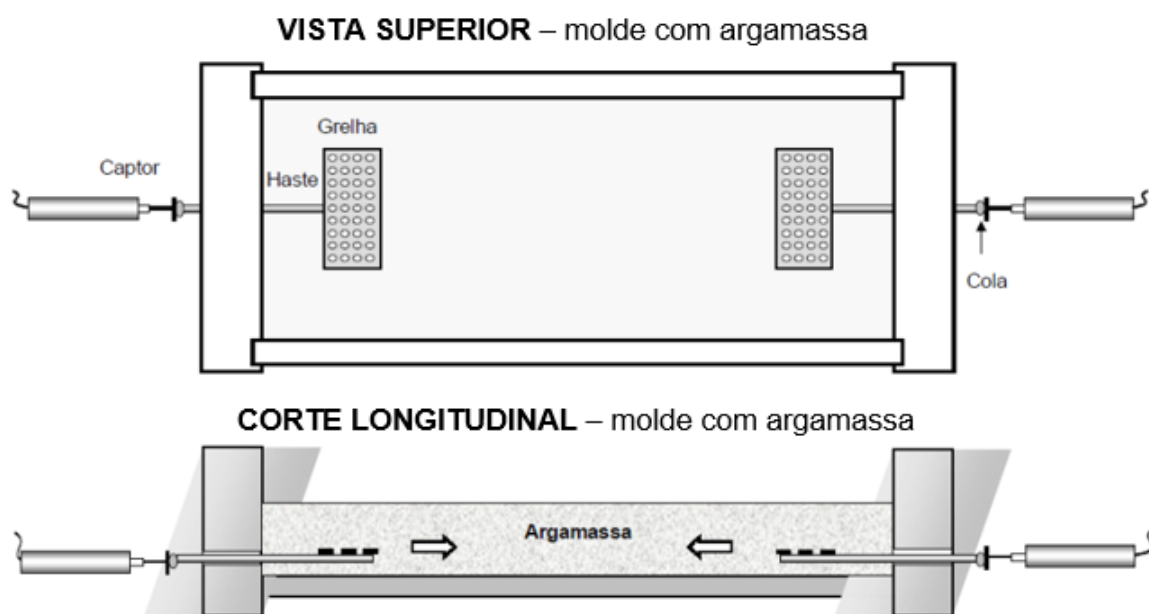


Figura 27 – Equipamento de medida de retração de argamassa no estado fresco desenvolvido no INSA de Toulouse (desenho esquemático).

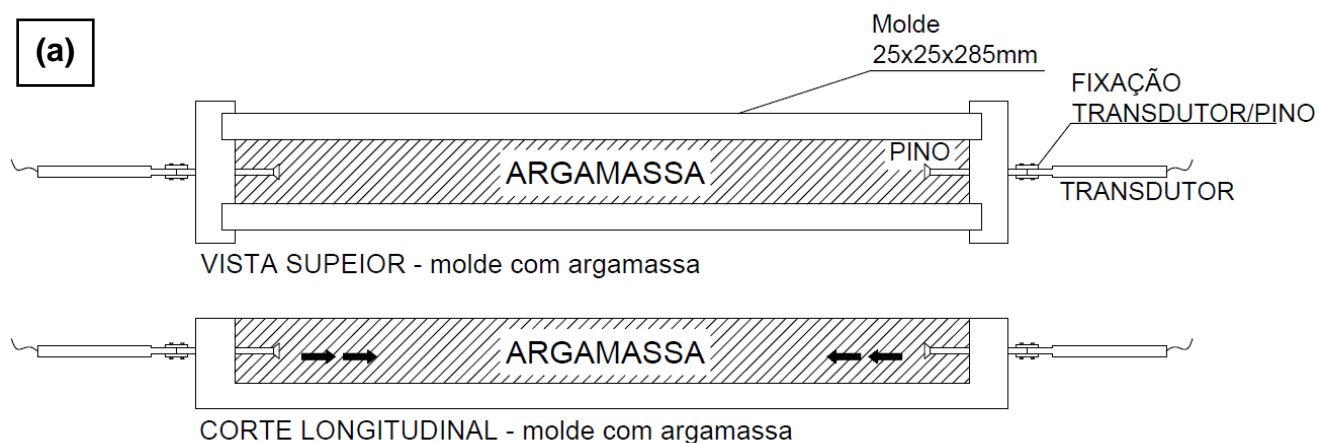


Figura 28 – Adaptação de equipamento de medida de retração de argamassa no estado fresco (a) desenho esquemático e (b) equipamento de ensaio.

As argamassas submetidas a este ensaio foram preparadas através dos mesmos procedimentos estabelecidos para as argamassas usadas no ensaio de resistência à compressão.

Para o desenvolvimento do ensaio em questão, as argamassas foram lançadas em molde prismático 25x25x285mm. Logo após o lançamento, com o auxílio de transdutores de movimento e sistema de aquisição de dados, deu-se início a aferição de variações dimensionais, a qual perdurou durante o período de quatro dias. Este período decorre do tempo de pega necessário às argamassas de CAT, que se apresenta mais prolongado, sendo possível sua desmoldagem apenas quatro dias após o lançamento.

Salienta-se que para propiciar a análise comparativa, entre os resultados levantados de variação dimensional das argamassas de CAT e do composto de referência (argamassas de CP), foram observadas as leituras do composto de

referência por igual período às leituras da argamassa de CAT, ou seja, 4 dias, mesmo aquele possuindo período de pega reduzido em relação a este.

Para a aquisição de dados da variação dimensional, cada transdutor de deslocamento foi conectado a um sistema de aquisição de dados, o qual toma as medidas da deformação automaticamente a cada 50 segundos, com precisão de 0,001mm. Os ensaios foram realizados em ambiente de laboratório, com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e 60% de umidade relativa do ar.

Variação dimensional em estado endurecido (Retração hidráulica)

Os procedimentos de mistura e preparação das argamassas para o referido teste foram os mesmos estabelecidos em amostras destinadas ao ensaio de resistência à compressão.

A moldagem de corpos de prova para a verificação da variação dimensional das amostras de argamassa de CP e CAT, quando em estado endurecido, se deu em acordo com o exigido pela NBR 15261:2005. Para o referido ensaio, três amostras prismáticas 25x25x285mm de cada argamassa foram elaboradas, as quais permaneceram em processo de cura úmida (umidade constante superior a 95%), durante todo o período de leitura das variações dimensionais. Novamente, nesta situação, as amostras foram submetidas ao citado processo de cura, logo após suas moldagens, permanecendo dentro de seus moldes durante quatro dias, sendo, posteriormente retiradas de seus moldes, mantendo-as em cura durante todo o período de verificação dimensional. A Figura 29 ilustra as amostras desenvolvidas para o ensaio em questão.

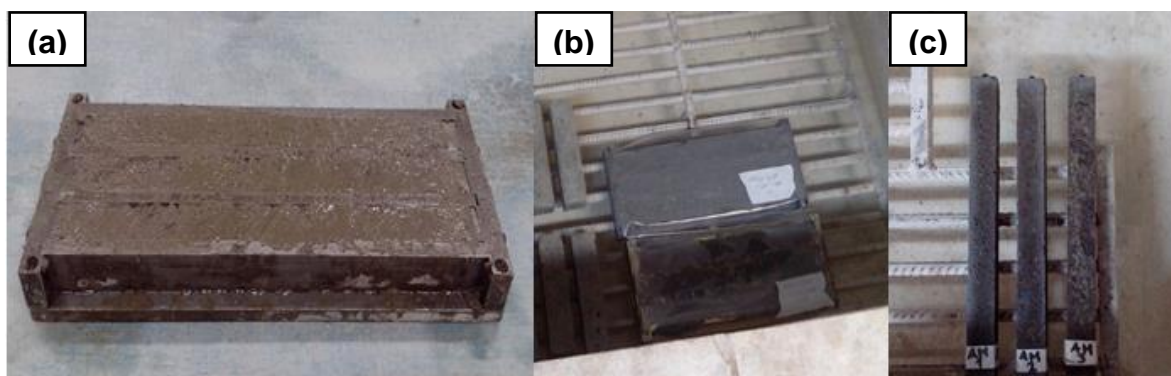


Figura 29 – Amostras para ensaio de variação dimensional (a) argamassa lançada a molde prismático 25x25x285mm; (b) argamassas em cura úmida antes de sua desmoldagem e (c) argamassas desmoldadas em cura úmida.

Foram executadas verificações dimensionais das amostras até 112 dias após a leitura inicial (4 dias após sua moldagem), com intervalo de leituras de 7 dias. As verificações se deram através de equipamento normatizado pela NBR 15261:2005.

Através da metodologia indicada pela NBR 15261:2005, os dados de variação dimensional no referido período foram adquiridos e analisados.

A Figura 30 apresenta os dados referentes ao ensaio de variação dimensional em estado plástico e a Figura 31 os dados levantados no ensaio de variação dimensional das argamassas em estado endurecido. O somatório destas variações estabelece a variação dimensional dos compósitos, excetuando-se a variação dimensional por conta da carbonatação, a qual não é objeto de pesquisa deste estudo.

A variação dimensional - no caso deste estudo retração, apresentada pelas argamassas em estado plástico (Figura 30) é, na sua essência, o resultado da retração autógena combinada à retração plástica. Observa-se que as amostras de CAT apresentaram retração significativa, principalmente durante as primeiras 24 horas, perdendo intensidade deste primeiro período até a leitura final – 72h. A retração de argamassas de CAT, nas primeiras 24h apresentou redução volumétrica linear de aproximadamente $7,37 \text{ mm/mm} \times 10^{-6}$. Enquanto que, em mesmo período de medição (aproximadamente 24h) argamassas de CP apresentaram retração na ordem de $1,52 \text{ mm/mm} \times 10^{-6}$.

É nítida a retração mais intensa em pastas de CAT, tal verificação baseia-se na diferença da estrutura do poro deste compósito, que promove maior fluxo de fluidos entre eles, decorrente de seu menor diâmetro em relação a compósitos de CP, uma vez que a hidratação de escórias ativadas alcalinamente apresenta maior quantidade de material fluido em sua estrutura, perante compósitos de CP que apresentam estrutura mais cristalina, sendo assim, a tensão de contração é também superior.

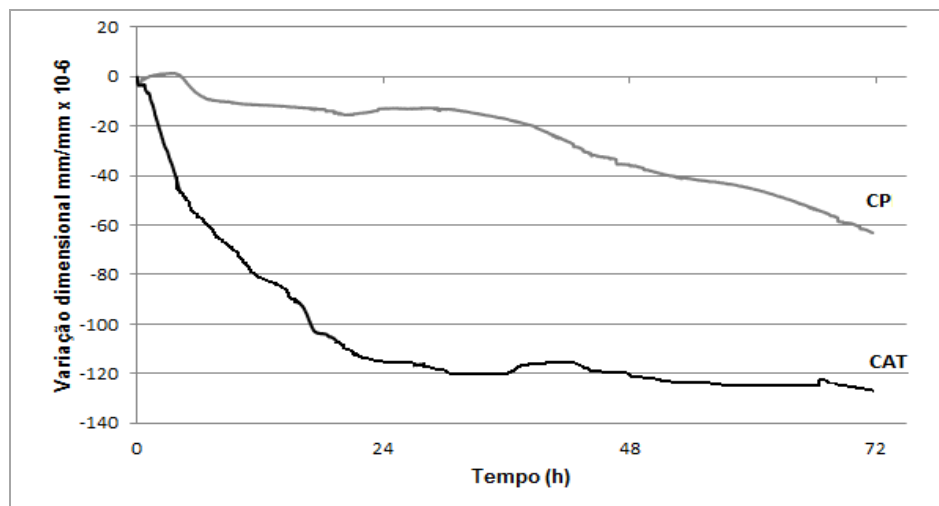


Figura 30 – Variação dimensional plástica de argamassas à base de CP e de CAT.

A Figura 31 mostra os resultados obtidos da variação dimensional (retração hidráulica) e sua respectiva perda de massa, em amostras de argamassa de CP e de CAT. Observa-se que todas as amostras apresentaram redução volumétrica, tanto as amostras de CP quanto as amostras de CAT, durante o período de análise (112 dias). Para argamassas de CAT a taxa de encolhimento durante a primeira semana foi de $1064 \text{ mm/mm} \times 10^{-6}$. Durante os próximos 14 dias a taxa de retração se apresentou inferior, em relação aos 7 primeiros dias, na ordem de $398 \text{ mm/mm} \times 10^{-6}$. Após 28 dias a taxa de retração reduziu, aproximando-se da constância volumétrica.

Comparativamente, as amostras de argamassas de CP apresentaram retração a níveis bem inferiores às de CAT, a retração total daquelas argamassas não superou $349 \text{ mm/mm} \times 10^{-6}$ após os 112 dias de observação, salienta-se que a retração mais significativa para argamassas de CP também se deu nos primeiros 7 dias, aproximando-se da constância após 28 dias.

Pesquisas semelhantes obtiveram resultados em consonância aos apresentados (Cincotto et al., 2003; Palacios e Puertas 2007; Ye et al., 2017). No caso deste estudo, a retração das amostras de CAT se apresentou aproximadamente quatro vezes maior que em amostras de CP. Cincotto et al. (2003) verificou retração na ordem de 4,6 vezes maior em CAT à base de escória básica, em relação ao um CP sem adições. Já Palacios e Puertas 2007 em sua pesquisa apresentaram retração de CAT aproximadamente 5 vezes superior à CP,

e por fim Ye et al. (2017), apresentou grande retração de compósitos de CAT, entretanto, não apresentou comparação à CP.

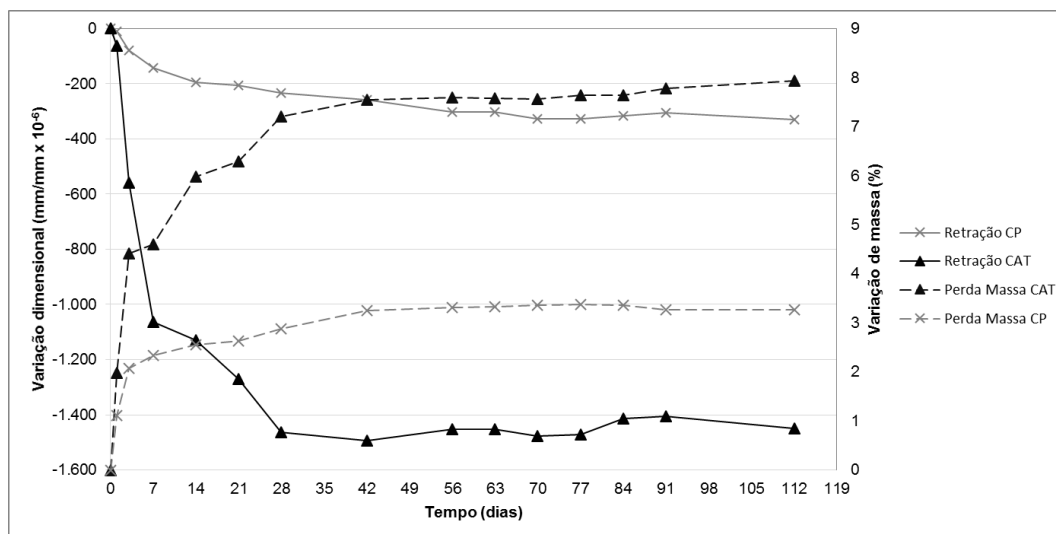


Figura 31 – Retração e perda de massa de argamassas à base de CP e de CAT.

A retração mais intensa em argamassas de CAT, perante argamassas de CP, observadas nos ensaios de variação dimensional, resulta por fim em tensões internas ao compósito, que quando superiores às suas resistências provocam o surgimento de fissuras, as quais diminui a resistência mecânica dos materiais e torna mais fácil a entrada de substâncias nocivas ao material.

3.2 CONCRETOS DE CAT E CP

3.2.1 ELABORAÇÃO DE CONCRETOS PARA CARBONATAÇÃO

Definição do traço

Para as análises em concreto a proporção da mistura de materiais foi de 1:2:3:0,5 (aglomerante: agregado miúdo: agregado graúdo: relação água/aglomerante em massa). O citado traço foi estabelecido devido a apresentar adequadas características de trabalhabilidade em estado plástico, apresentando a consistência adequada para sua utilização em estruturas corrente sem a visualização de exsudação e segregação.

Preparação do Concreto

Devido ao reduzido volume de concreto necessário para a elaboração das amostras e a granulometria do agregado graúdo utilizado, o mesmo foi confeccionado em misturador mecânico do tipo argamassadeira. A ordem de inserção dos materiais na argamassadeira está descrita no APÊNDICE A.

O agregado graúdo empregado é proveniente da britagem de rocha basáltica, o qual apresentou massa específica de $2,88\text{g/cm}^3$ (NBR NM 53/2009), diâmetro máximo característico de $9,5\text{mm}$ (ABNT NBR 248/2003) e módulo de finura de $3,26$ (ABNT NBR 248/2003). O referido agregado foi caracterizado, de acordo com a ABNT NBR 7211/2009, de zona granulométrica $4,75/12,5$, conhecido comercialmente como “brita 0”.

Durante o processo de estabelecimento das amostras de concreto, foram verificados os índices de consistências dos mesmos (Figura 32) por meio de ensaio análogo ao estabelecido às argamassas de CAT e CP. Os dados são visualizados na Tabela 7 e apresentam maior índice de consistência em concreto à base de CAT, uma vez que apresenta maior espalhamento, dados que validam os resultados de espalhamento das argamassas, anteriormente citadas e também estão corroborando com os estudos de Palacios (2006) e Puertas et al. (2014).

Tabela 7 – Espalhamento concretos de CP e CAT.

Compósito	Espalhamento (mm)
Concreto CP	175
Concreto CAT	230

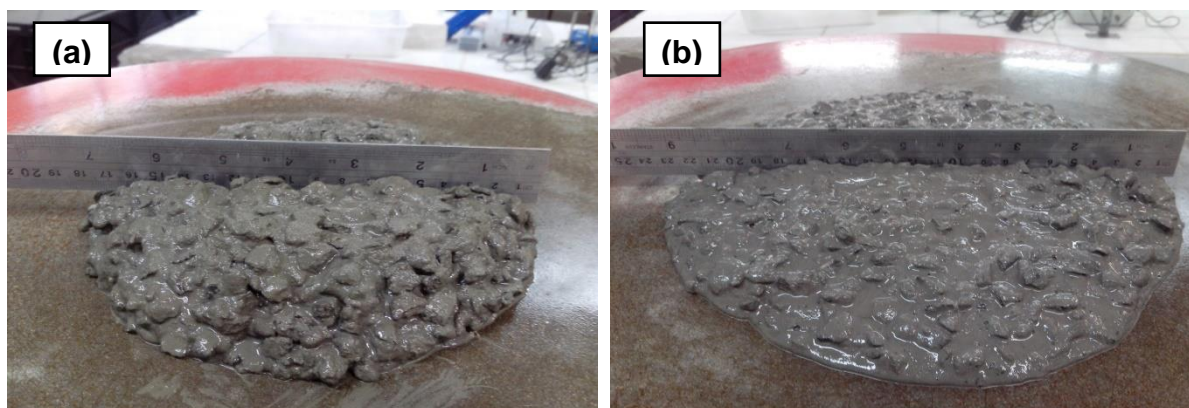


Figura 32 – Verificação do espalhamento de concretos. (a) Concreto à base de CP; (b) Concreto à base de CAT.

Método de Cura

O sistema de cura adota foi o de cura úmida, onde as amostras de concreto foram inseridas em uma câmara fechada, com temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$, contendo volume de água em seu fundo, mantendo desta forma, a umidade constante (superior a 95%). As amostras foram dispostas nesta câmara sobre estrutura metálica, de forma a impedir seu contato direto com a água, durante período de 28 dias.

3.2.2 ÍNDICE DE VAZIOS

A determinação da absorção de água e o índice de vazios de amostras de concreto de aglomerante CP e de aglomerante CAT foram através do procedimento experimental estabelecido pela NBR 9778:2005. A referida normativa não fixa o formato dos corpos de prova a serem ensaiados, estabelecendo apenas seus volumes mínimos. Desta forma, o ensaio se deu em amostras cilíndricas de 100mm de diâmetro de 200mm de comprimento, os quais foram moldados de acordo com a NBR 5738/2015 e submetidos a processo de cura úmida – umidade superior a 95% e temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$, por 28 dias, antes de serem ensaiados. Ainda, conforme prescreve a NBR 9778:2005, foram ensaiadas duas amostras de cada tipo de concreto produzido.

A absorção de água dos concretos estudados foi apresentada em função da absorção de água por imersão e índice de vazios. Em geral, foi observado que concretos à base de CAT apresentaram teores de absorção de água e índice de vazios estatisticamente iguais aos compósitos à base de cimento Portland, conforme o ilustrado pela Figura 33. O tratamento estatístico dos dados é apresentado no Apêndice D.

Os resultados obtidos nesta pesquisa decorrem da estrutura do poro de compósitos à base da ativação de escórias. A hidratação de tais compósitos produz uma porosidade total menor em relação à hidratação de compósitos de cimento Portland, além de produzir poros de diâmetros inferiores (SHI, et al., 2006), obtendo, desta forma, um compósito de maior densidade, que conseqüentemente apresenta menor absorção de água e índice de vazios.

Mesmo a estrutura de poros de compósitos de CAT ser considerada diferenciada em relação a compósitos de CP – porosidade total inferior e poros menores, os dados obtidos demonstram pouca variação, de absorção de água e índice de vazios, entre concretos de CAT e de CP. Tal constatação pode estar relacionada à fissuração superior em compósitos de CAT, abordada no subtítulo 3.1.2, que pode ser um contraponto a estrutura de poros mais refinada deste material.

Vale salientar que, conforme descrito nos capítulos anteriores, as características dos compósitos de CAT são fortemente influenciadas pelo tipo de ativador utilizado, pelo tipo do material cimentício e também pela relação água/aglomerante. A estrutura do poro formado quando da hidratação dos produtos cimentícios também apresenta variação em função do citado, sendo assim, pesquisas com o mesmo objetivo podem apresentar resultados diversos.

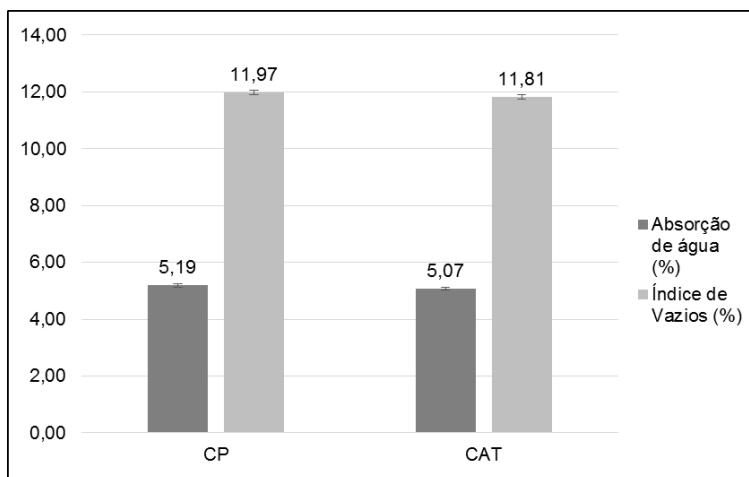


Figura 33 – Absorção de água por imersão e índice de vazios de concretos à base de CP e de CAT (28 dias) cura úmida.

3.2.3 MEDIDA DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Com o objetivo de análise comparativa entre a profundidade de carbonatação, após teste acelerado, foram moldados através dos procedimentos estabelecidos pela NBR 5738/2015, amostras cilíndricas de concreto de 100mm de diâmetro de 200mm de comprimento de concreto produzido com CP e CAT. Para cada tipo de aglomerante foram produzidas 3 amostras nas dimensões mencionadas. Após a desmoldagem, as amostras foram submetidas à cura úmida

(ambiente com umidade superior a 95% e temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$) por 28 dias, com o intuito de manter as mesmas condições estabelecidas para os testes em argamassas e concretos descritos anteriormente.

Após o processo de cura úmida, as amostras foram levadas ao pré-condicionamento, também descrito como sazonalamento, necessário ao ensaio de carbonatação acelerada.

Pré-condicionamento/Sazonamento

Para o pré-condicionamento ou sazonalamento das amostras de concreto para o ensaio de carbonatação acelerada, foi feito uso de metodologia desenvolvida pelo NORIE (Núcleo Orientado para a Inovação de Edificações) da UFRGS. Pauletti (2004), na tentativa de desenvolvimento de tal método, verificou que a umidade dentro da câmara de sazonalamento (câmara fechada, na qual o CO_2 contido no ambiente é retirado por meio da circulação do ar, passando-o por uma solução de hidróxido de potássio – KOH) é de difícil controle, principalmente quando o método de cura do compósito a ser condicionado, propicia seu alto índice de umidade, situação está verificada na presente pesquisa, uma vez que as amostras ficaram em cura úmida - umidade superior a 95% e temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$. Sendo assim, neste estudo, o procedimento adotado foi de eliminação da utilização de câmara de sazonalamento, desenvolvendo a secagem das amostras direto em câmara climatizada com controle de temperatura e umidade, mas não de CO_2 .

Os procedimentos estabelecidos para o pré-condicionamento foram os seguintes:

1. Após processo de cura, as amostras foram inseridas em câmara climatizada (temperatura $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa de 60%) até a constância de massa TC 116-PCD - RILEM (1999). Tempo de procedimento: 15 dias;
2. Sequencialmente, as amostras, ainda em câmara climatizada, foram embaladas em filme plástico de PVC, com o intuito de redistribuição de umidade interna. Tempo de procedimento: 14 dias.

O tempo total do pré-condicionamento foi de 29 dias, depois disso, as amostras foram submetidas ao teste de carbonatação acelerada. A Figura 34

demonstra corpos de prova de concreto em diversas fases da preparação para a entrada na câmara de carbonatação.



Figura 34 – Fases de preparação amostras de concreto (a) cura úmida; (b) constância de massa e (c) redistribuição de umidade.

Ensaio de carbonatação acelerada

Com o objetivo de acelerar o processo de carbonatação das amostras, este estudo fez uso de equipamento específico para tal finalidade – câmara de carbonatação marca Bass equipamentos, modelo UUC-RH-STD-CO₂-400/2015, a qual possui controle automatizado do teor de dióxido de carbono, umidade relativa e temperatura do ambiente interno.

Para ensaios acelerados e carbonatação de compósitos cimentícios não se verifica normatização e nem padronização quanto aos teores de CO₂ utilizado. Neste sentido, o presente estudo optou pela utilização de um ambiente com teor constante de $5 \pm 1\%$ de CO₂, teor este superior ao encontrado em ambientes naturais, nos quais a concentração de CO₂ se mantém entre 0,03 e 1%. Quanto à umidade relativa do ambiente interno à câmara de carbonatação, foi utilizado teor de $60 \pm 0,5\%$. Este estudo baseou-se em pesquisas que adotaram parâmetros semelhantes (Puertas et al., 2006; Bernal et al., 2012, 2013; Song et al., 2014), as quais estabeleceram as seguintes faixas. Temperatura: 20 a 23°C; umidade relativa: 60 a 65%; CO₂: 5 a 20%.

A intenção do presente estudo foi de desenvolver o ensaio com temperatura, interna à câmara de carbonatação, na faixa de $23 \pm 0,1^\circ\text{C}$ – temperatura difundida nos estudos de carbonatação acelerada, entretanto, por indisponibilidade técnica momentânea do equipamento, a temperatura de ensaio foi estabilizada em $40 \pm 0,1^\circ\text{C}$, decorrente de falha no sistema de refrigeração do

equipamento, impedindo que o mesmo operasse em temperaturas inferiores àquela.

A Tabela 8 apresenta as condições de ensaio para o presente estudo.

Tabela 8 – Condições de ensaio de carbonatação acelerada.

Dióxido de carbono (%)	Temperatura ambiente (°C)	Umidade relativa (%)
5 ± 1	40 ± 0,1	60 ± 0,5

Leitura da profundidade de carbonatação

A profundidade de carbonatação foi verificada em amostras com 4, 8, 12 e 16 semanas de carbonatação acelerada. A definição destas idades de verificação decorre trabalho anterior (Raisdorfer, 2015), o qual verificou que após estas idades o incremento da carbonatação é muito pequeno.

Para cada idade de leitura (4, 8, 12 e 16 semanas), as 3 amostras cilíndricas de cada tipo de concreto – concreto de CP e de CAT - foram retiradas da câmara de carbonatação e rompidas por cisalhamento em equipamento descrito no 3.1.2.1, possibilitando assim a extração de fatia de concreto de 100mm de diâmetro e 50mm de espessura. Fatias estas, nas quais as medições de profundidade de carbonatação foram executadas. O restante da amostra cilíndrica retornava à câmara de carbonatação onde permanecia até a nova data de leitura e consequente extração de fatia de concreto. A Figura 35 demonstra a metodologia utilizada para a extração da fatia de concreto da amostra cilíndrica 100mm x 200mm.



Figura 35 – Método de extração de discos 100mm X 50mm de corpos de prova de 100mm X 200mm.

Conforme o descrito, foram inseridas na câmara de carbonatação 6 amostras de concreto – 3 à base de CAT e 3 de CP, cada amostra possibilita a extração de quatro fatias de concreto, uma vez que as fatias possuem 50mm e a amostra 200mm de comprimento (Figura 36). Sendo assim, em cada idade de medição de profundidade de carbonatação (4, 8, 12 e 16 semanas), 3 fatias de cada tipo de concreto foram submetidas ao indicador químico de pH.



Figura 36 – Fatia (100mm de diâmetro X 50mm espessura) de corpo de prova de concreto.

A aquisição dos dados referentes à profundidade de carbonatação nos corpos de prova de concretos à base de aglomerante CP e CAT se deu pelo processo estabelecido pela RILEM 1988 CPC 18, por meio de indicador químico do pH, no caso deste estudo o indicador utilizado foi a fenolftaleína, a qual foi aspergida sobre a superfície do concreto, possibilitando desta forma, a diferenciação entre zonas carbonatadas e não carbonatadas. As zonas não carbonatadas, através da ação fenolftaleína em meio alcalino (acima de 9) se apresentam com coloração vermelho carmim e as zonas carbonatadas, que não reagem com a fenolftaleína se mantem na coloração do compósito, conforme demonstrado na Figura 37.

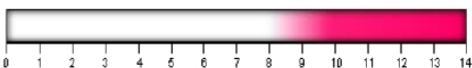
Indicador de pH	Intervalo de mudança de cor	Preparo de Solução
Fenolftaleína	 <p>Incolor/vermelho carmim Faixa de pH 8,3 – 10,0</p>	Dissolver 10g de reagente em 700ml de etanol e depois diluir em 300 ml de água destilada

Figura 37 – Faixas de indicação de pH após aplicação de fenolftaleína.

Fonte: Castro, 2003, apud Raisdorfer, 2016.

A composição da solução aspergida sobre o concreto foi estabelecida de acordo com a RILEM 1988 CPC 18 que determina a dissolução de dez gramas de reagente (fenolftaleína) em 700ml de etanol e posterior adição de 300ml de água destilada.

O método de medição utilizado na presente pesquisa foi o apresentado por Raisdorfer (2015), o qual se resume em leituras, com auxílio de paquímetro, a partir da face externa de corpos de prova cilíndricos, em direção ao centro da circunferência. Para cada corpo de prova rompido realizam-se seis leituras, as quais se distanciam 60° uma da outra. Em caso de falhas de concretagem, ou a região de leitura coincidir com agregado, a mesma é realizada imediatamente ao lado da região problemática. A Figura 38 demonstra o procedimento descrito.

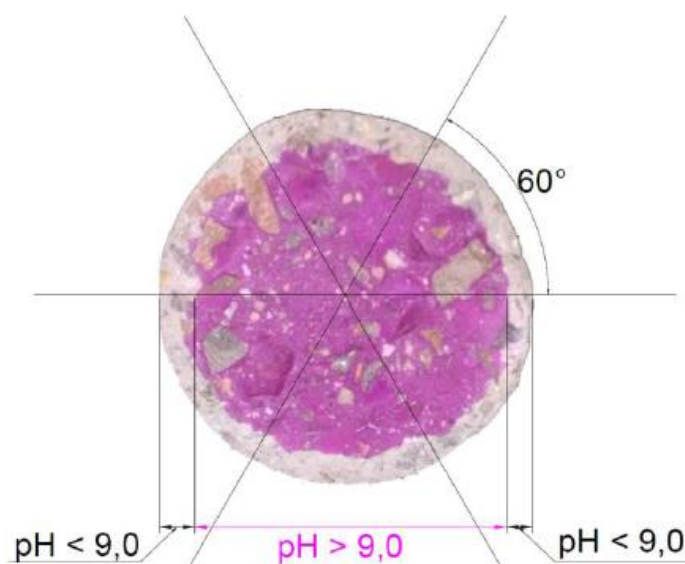


Figura 38 – Forma de definição de regiões para a leitura da profundidade de carbonatação.

Fonte: Raisdorfer, 2015.

Por meio dos dados levantados nas leituras de profundidade de carbonatação nas idades 4, 8, 12 e 16 semanas, foram obtidos os coeficientes de carbonatação, ajustados ao modelo de Tuutti (1982) mostrado na Equação 10, onde e_c é a espessura carbonatada (mm), K_{CO_2} (mm.semana^{-0,5}) é coeficiente de carbonatação a ser calculado e t é o tempo, em semanas.

$$e_c = K_{CO_2} \sqrt{t} \quad \text{Equação 10.}$$

Após o procedimento mencionado, essa equação foi linearizada através da modificação do eixo X (tempo). Colocando o eixo da abscissa em função de sua raiz quadrada é possível representar o avanço da carbonatação por uma reta, e o coeficiente angular dessa reta será o k_{CO_2} da equação da difusão de Tuutti (Figura 39).

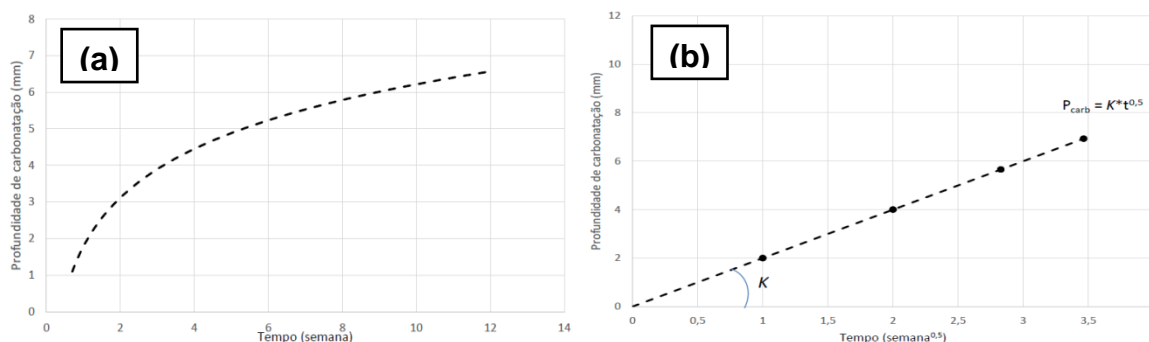


Figura 39 – (a) Relação entre profundidade de carbonatação acelerada e tempo real; (b) Profundidade de carbonatação linearizada.

A Figura 40 apresenta de forma esquemática o cronograma dos processos estabelecidos para desenvolvimento do ensaio de profundidade de frente de carbonatação, em seu método de ensaio acelerado.

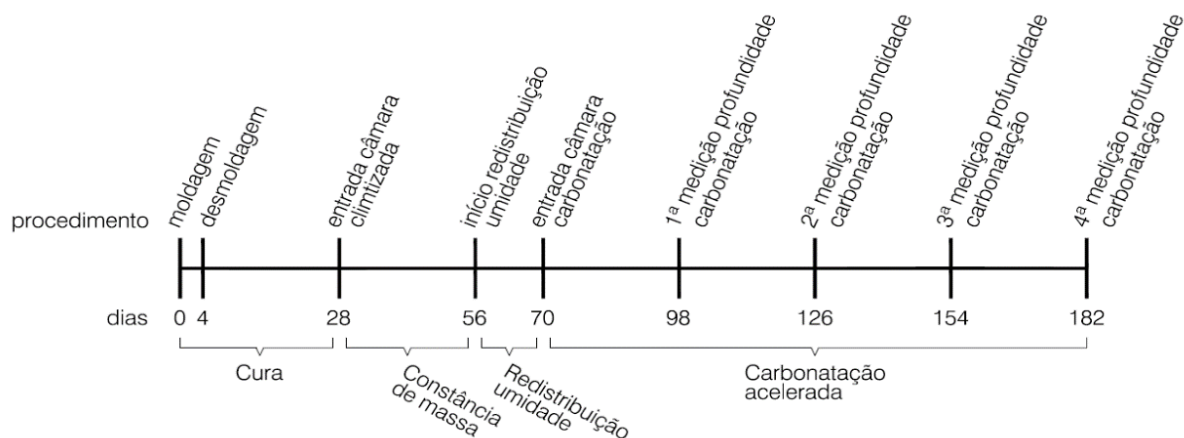


Figura 40 – Cronograma de procedimentos – ensaio de verificação da frente de carbonatação.

3.3 PASTAS DE CAT E CP

3.3.1 ELABORAÇÃO DE PASTAS SUBMETIDOS À CARBONATAÇÃO

Amostras cilíndricas de pastas de CP e de CAT de 20mm de diâmetro e 40mm de comprimento foram moldadas e posteriormente submetidas ao mesmo processo das amostras de concretos, quando preparadas ao ensaio de carbonatação acelerada, ou seja, foram moldadas e, após 4 dias desmoldadas. Posteriormente inseridas em processo de cura úmida (ambiente com umidade relativa superior a 95% e temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$) onde permaneceram por 28 dias, e após encaminhadas ao pré-condicionamento: secagem em câmara climatizada - temperatura $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade 60%, até atingir a constância de massa; redistribuição de umidade por 14 dias sem perda de umidade para o ambiente. E finalmente inseridas em câmara de carbonatação. O traço utilizado para a elaboração das amostras de pastas foi de 1:0,40 (aglomerante:relação água/aglomerante).

Para cada tipo de aglomerante (CP e CAT) foram elaboradas amostras conforme Tabela 9. As amostras destinadas à carbonatação acelerada, após tal processo, foram submetidas ao ensaio mecânico de resistência à compressão e posteriormente seus fragmentos foram encaminhados às análises microestruturais. Já as amostras referências – não encaminhadas à carbonatação acelerada, foram encaminhadas aos ensaios citados, logo após finalização do processo de cura.

A Figura 41 apresenta as amostras de pastas ainda em seus moldes.



Figura 41 – Amostras de pastas moldadas em moldes cilíndricos 25mm x 40mm.

Tabela 9 – Amostras de pastas.

AMOSTRAS	DESTINAÇÃO	TEMPO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA
amostra 1 - referência	Ensaio de resistência mecânica; Análises microestruturais.	0 semanas
amostra 2 - referência		
amostra 3 - referência		
amostra 4	Carbonatação acelerada (câmara de carbonatação)	4 semanas
amostra 5		
amostra 6		
amostra 7		8 semanas
amostra 8		
amostra 9		
amostra 10		12 semanas
amostra 11		
amostra 12		
amostra 13		16 semanas
amostra 14		
amostra 15		

3.3.2 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

O ensaio mecânico de resistência à compressão de pastas carbonatadas teve por objetivo a aferição de variações de resistência nos compósitos após a carbonatação por meio da aplicação de CO₂ em alto teor (carbonatação acelerada).

Para o desenvolvimento de tal ensaio as amostras cilíndricas de pastas foram submetidas à compressão axial em equipamento descrito em 3.1.2.1. Anteriormente ao início do ensaio, as amostras de pasta passaram por processo de regularização de sua face inferior e superior, garantindo distribuição regular das tensões durante a aplicação de carga. A regularização se deu por meio de lixamento das faces.

3.3.3 INVESTIGAÇÃO DA MICROESTRUTURA DE PASTAS CARBONATADAS

Com o objetivo de subsidiar as análises de durabilidade dos compósitos estudados, foram elaboradas avaliações microestruturais: Difração de Raios X (DRX), MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Termogravimetria

(TG)/Termogravimetria Derivada (DTG) em amostras de pastas carbonatadas produzidas com CP e CAT.

As amostras de pastas que passaram por análises microestruturais se originaram de fragmentos resultantes do ensaio de compressão de pastas carbonatadas.

Processo de interrupção da hidratação

Após cada retirada de amostras de pastas da câmara de carbonatação, estas passaram por processo de fragmentação, com o objetivo de viabilizar a interrupção da hidratação do aglomerante, base do compósito. A interrupção da hidratação das pastas se deu com 30 dias após a retirada das mesmas da câmara de carbonatação, excetuando-se a amostra referência, a qual não foi submetida ao ensaio de carbonatação, sendo fragmentada e passando pela interrupção da hidratação 30 dias após sair do processo de redistribuição de umidade. Desta forma, observa-se que todas as amostras de pastas passaram pelo processo em questão 30 dias após o procedimento precedente, no caso das amostras submetidas ao ensaio de carbonatação, 30 dias após sua retirada da câmara de carbonatação, e no caso das amostras referencias (que não passaram pelo ensaio de carbonatação), 30 dias após findar-se o processo de redistribuição de umidade.

O processo utilizado para a interrupção da hidratação foi através da troca de fluídos – água por acetona (C_3H_6O), no qual os fragmentos de pastas foram imersos à acetona, mantendo-os nesta condição por período de duas horas. A acetona, presente em camadas mais internas dos fragmentos, foi retirado através da utilização de um sistema formado pelo conjunto filtro de buchner acoplado a bomba a vácuo. Após este processo as amostras foram inseridas em ambiente de temperatura controlada (aproximadamente $40^{\circ}C$) por período de 24h, a fim de completar o processo. Os procedimentos estabelecidos para a interrupção da hidratação baseou-se na pesquisa de Langaro (2016).

Salienta-se que todas as amostras de pastas passaram pelo procedimento supracitado, incluindo a amostra referência – amostra que não foi submetida à carbonatação acelerada. Sequencialmente à obtenção de fragmentos de pastas livres de hidratação, amostras ainda no formato de fragmentos, foram encaminhadas à análise de MEV. Já para as verificações de DRX e TG/DTG os

fragmentos foram triturados em granulometria específica para as referidas análises.

O processo de trituração das amostras de pastas a serem encaminhadas às análises de DRX e TG/DTG foi através de moagem manual, com o auxílio de cadinho e pistilo, triturando a amostra até granulometria passante na peneira 150 μ m.

Difração de Raios-X (DRX)

A análise de DRX foi elaborada utilizando equipamento modelo Rigaku Mini Flex 600, o qual utiliza um tubo de radiação Cu – K α , (40 kV, 15 mA). Os parâmetros de ensaio foram os seguintes:

- Comprimento de onda de 1,54 Å;
- Ângulos de varredura de 5° – 70° (2 θ);
- Passo de 0,02°, sendo as intensidades registradas por 0,4s em cada passo;

Análise Morfológica (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura fornece informações a respeito da morfologia e identificação de elementos químicos da amostra sólida. A utilização da espectroscopia de energia dispersiva (EDS) juntamente com o MEV permite a imediata identificação mineral, apresentando informações cristalográficas e composicionais, que podem ser obtidas rapidamente e simultaneamente da mesma área (KLEIN e DUTROW, 2012).

As micrografias foram obtidas através do Microscópio eletrônico de varredura Carl Zeiss / EVO MA 15 equipado com: detectores de elétrons secundários (SE) de alto vácuo (HV) e de pressão variável (VP) e de elétrons retroespalhados (BSE); detector EDS Oxford X-Max de 20 mm²; detector WDS Oxford IncaWave 500 com cristal adicional para análise de nitrogênio.

A preparação das amostras consiste em secagem a vácuo e metalização com carbono utilizando o equipamento Metalizador Quorun Q150RES.

Análises Térmicas (Termogravimetria (TG)/Termogravimetria Derivada (DTG))

Para o desenvolvimento das análises térmicas (Termogravimetria – TG e Termogravimetria Derivada – DTG) foi utilizado equipamento marca TA Instruments, modelo SDT Q600, e as condições estipuladas de ensaio foram:

- Faixa de aquecimento de 30 °C a 900 °C;
- Fluxo de aquecimento de 10°C min⁻¹;
- Atmosfera inerte: ar sintético;
- Fluxo de 100mL min⁻¹;
- Porta amostra de α –alumina;

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

A Figura 42 (a) apresenta progressão durante as idades de leitura da profundidade de carbonatação, e a Figura 42 (b) representa a linearização da curva, desenvolvida com objetivo único de identificar o coeficiente de carbonatação dos materiais ensaiados, que se resume ao coeficiente angular da reta resultante da linearização da curva. Já a Figura 43 apresenta as amostras de concreto de CAT e CP após a aplicação de indicador de pH – fenolftaleína.

Os dados levantados demonstram, primeiramente, maiores profundidades de carbonatação em compósitos de CAT perante compósitos de CP. A diferença média entre a profundidade de carbonatação de compósitos de CAT e CP, entre 4 e 16 semanas de carbonatação, foi de 4,42mm. Esta constatação pode ser justificada, também, através da análise da retração em aglomerantes do tipo CAT, demonstrada por meio das Figura 30 e Figura 31. Devido a maior retração em compósitos de CAT, é fato a verificação de maior fissuração decorrente das tensões originárias. Tal fissuração propicia veios de acesso ao CO₂ ambiental à matriz do concreto. Compósitos à base CAT oferecem menor dificuldade ao avanço da frente de carbonatação, uma vez que não possuem elevada reserva alcalina, decorrente das características dos produtos de sua hidratação – escórias ativadas não apresentam como produto de sua hidratação Ca(OH)₂, importante fonte alcalina de compósitos cimentícios e primeiro composto a sofrer o ataque do processo de carbonatação. Estes cenários culminam em maior coeficiente de carbonatação em concretos de CAT – 3,6654, perante concretos de CP – 2,317.

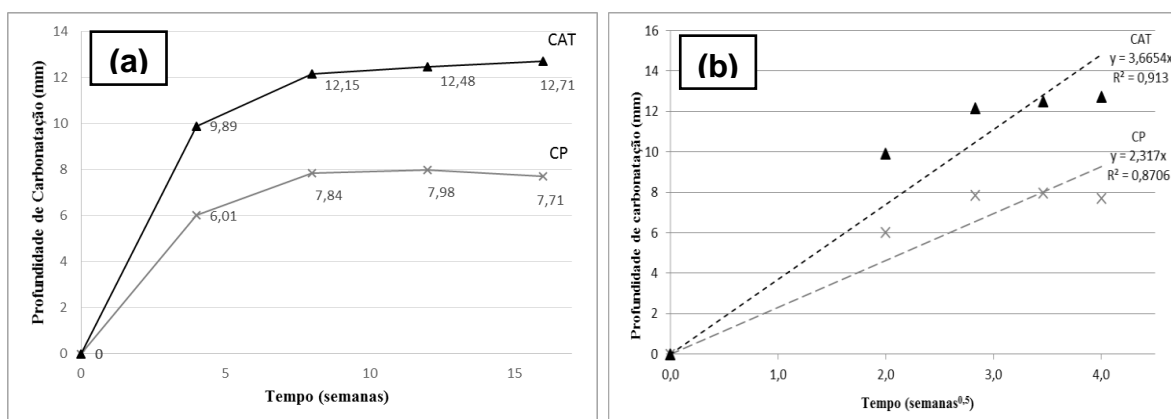


Figura 42 – Carbonatação em concretos de CAT e CP (a) Evolução da frente de carbonatação; (b) Curva linearizada – coeficientes de carbonatação.

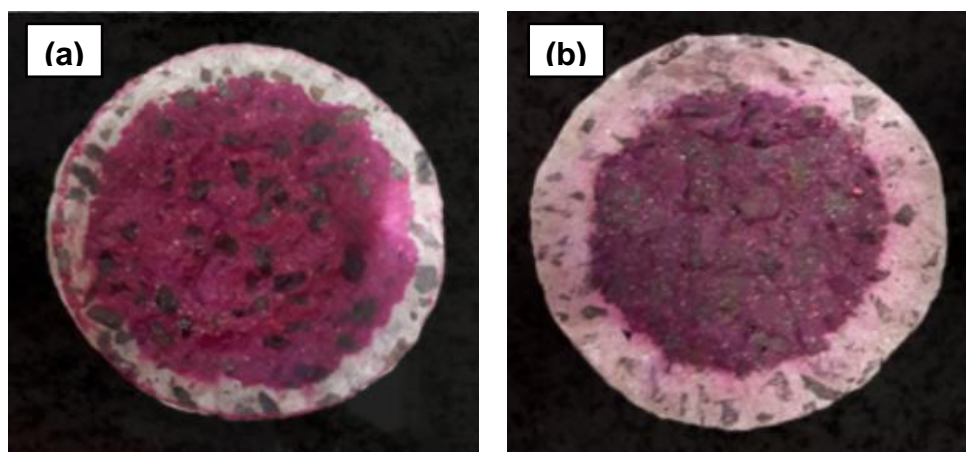


Figura 43 – Amostra de concreto carbonatado (16 semanas) após aplicação de fenolftaleína (a) Concreto à base CP; (b) Concreto à bas de CAT.

Outro aspecto importante a ser considerado é a redução, tanto em concretos de CAT, quanto em concretos de CP, da velocidade de progressão da frente de carbonatação em função do tempo de exposição. A Figura 44 apresenta um desenho esquemático das profundidades de carbonatação em amostras de CP e CAT, demonstrando que no período inicial de carbonatação, verificou-se avanço de 6,01mm em CP e 9,89 mm em amostras de CAT, correspondendo respectivamente, a 77,95% e 77,81% do avanço total da frente de carbonatação. Nos demais períodos o avanço da frente de carbonatação foi reduzido gradativamente, apresentando avanço de 22,05% em CP e 22,19% em CAT (4 a 16 semanas de carbonatação). Estes dados decorrem na precipitação do produto de carbonatação CaCO_3 nos poros do compósito, tornando-o mais denso, de

estrutura mais coesa, diminuindo sua porosidade e dificultando o acesso do CO_2 após o primeiro estágio de carbonatação (BERNAL, 2015).

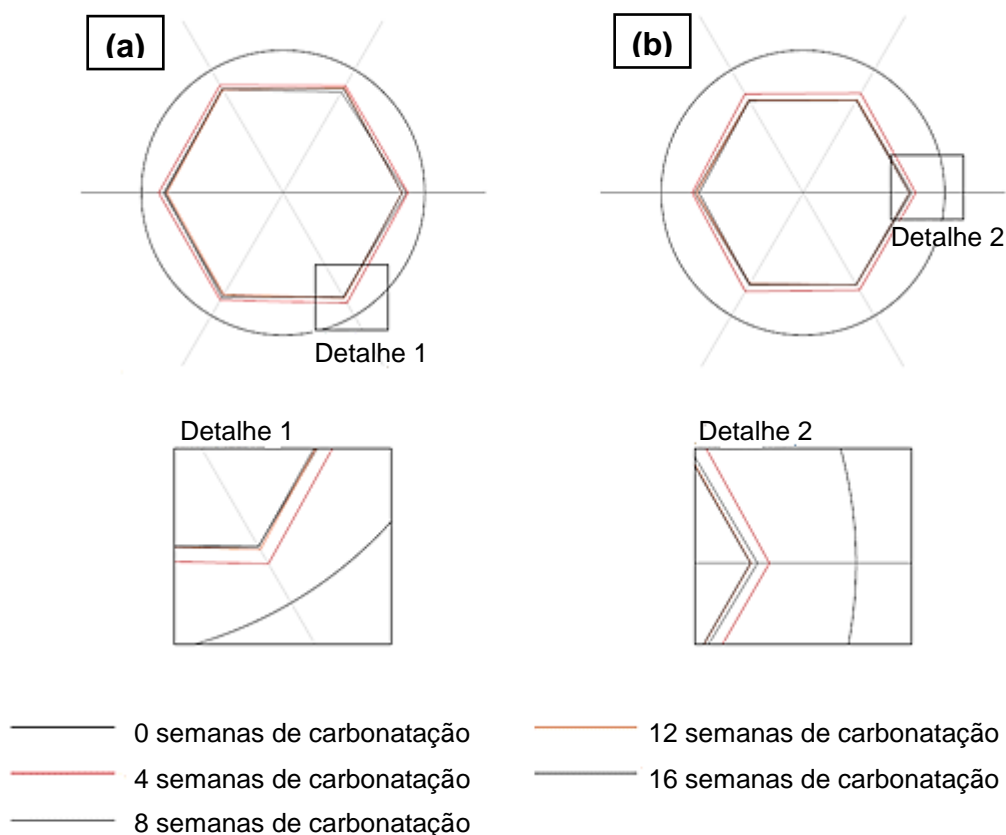


Figura 44 – Desenho esquemático da profundidade de carbonatação (a) amostra de concreto de CP; (b) amostra de concreto de CAT.

Os resultados obtidos nesta pesquisa se assemelham aos resultados obtidos no estudo de Bakharev et al. (2001) que verificaram profundidade de carbonatação de CAT e CP de aproximadamente 10mm e 3mm, respectivamente. A divergência de profundidades mais intensa em CP pode decorrer da diferença de composição dos CPs avaliados. Bakharev et al. (2001), em seu estudo, fizeram uso de CP sem adições em sua composição, enquanto que a presente pesquisa utilizou CP composto, com a adição de pozolana. Raisdorfer, 2015 observou que CP com adição de pozolanas – tipo cinza volante, mesma pozolana contida no CP utilizado nesta pesquisa, apresenta profundidade de carbonatação superior em relação à CP de referência – sem a adição de pozolana. A diferença de profundidade de carbonatação entre compósitos dos dois tipos de cimento citados foi de aproximadamente 54%, justificada pelo fato de que compósitos de CP com adições apresentam menor reserva álcali que compósitos de CP referência.

Com o intuito de validação dos resultados obtidos – velocidade de frente de carbonatação mais intensa no primeiro período de carbonatação e redução significativa nos períodos seguintes, foi estabelecido tratamento estatístico dos dados obtidos. As Tabelas 41, 42, 43 e 44 do Apêndice E trazem informações de validação da hipótese de igualdade de médias (alpha superior a 0,05) em leituras entre as semanas 8, 12 e 16, comprovando, desta forma, a significativa redução da velocidade de carbonatação naquelas idades de leitura, perante a velocidade de carbonatação na idade entre as idades 0 e 4 semanas.

4.2 MONITORAMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

4.2.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CONCRETOS NÃO CARBONATADOS

Os resultados de resistência à compressão dos concretos produzidos podem ser observados na Figura 45. A Figura 45 (a) apresenta os dados referentes a amostras prismáticas 4x4x16cm e a Figura 45 (b) traz os resultados obtidos por meio de ensaio em corpos de prova de cilíndricos de 100mm de diâmetro de 200mm de comprimento. Os valores estão exibidos no APÊNDICE B.

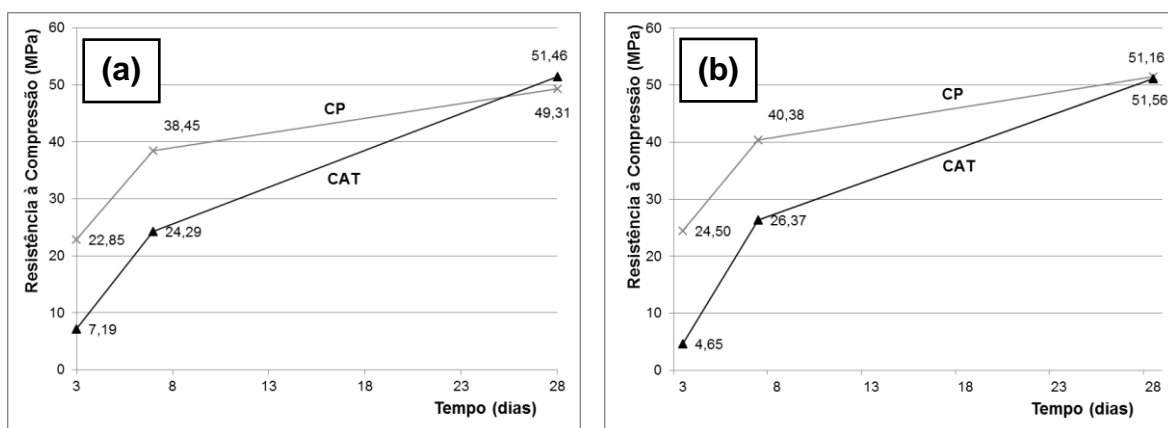


Figura 45 – Resistência à compressão de concretos à base de CP e de CAT (3, 7 e 28 dias) cura, úmida. Amostras prismáticas 4cm x 4cm x 16cm (a); Amostras cilíndricas 10cm x 20cm (b).

Observa-se que, assim como o verificado nos resultados de resistência à compressão de argamassas, o concreto à base de CP apresentou resistência mais elevada nas idades mais jovens (3 e 7 dias), quando comparado ao concreto

à base de CAT, enquanto aos 28 dias as resistências dos dois tipos de concreto são estatisticamente iguais.

O tratamento estatístico – Teste T (teste t de student) dos resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica de concretos de CAT e CP aos 28 dias, demonstram que tanto nas amostras 4x4x16cm, quanto nas amostras 10x20cm o “p-valor” (0,5513 e 0,2952, respectivamente) é superior ao “alfa” (0,05), rejeitando a hipótese de diferença estatística entre suas médias e confirmando a igualdade entre elas (APÊNDICE C).

O aumento de resistência de concretos de CAT, de 3 a 7 dias, foi, na média dos dois tipos de corpos de prova, de 19,41 MPa (42,57%) e de 7 a 28 dias de 26,18 MPa (57,42%) totalizando acréscimo de 45,39 MPa (88,46%). Quando analisados concretos de CP, o acréscimo nos valores de resistências nos mesmos períodos totalizou 26,56 MPa. Estes dados corroboram os adquiridos em ensaios de argamassa de CAT e CP no presente estudo. Ainda, os dados se assemelham a outras pesquisas, Puertas et al. (2007) verificaram ganho de resistência em concretos à base de CAT entre 3 e 28 dias de aproximadamente 75%. No mesmo sentido Bernal et al. (2011) identificaram ganho de CAT na ordem de 80% entre as idades pesquisadas (2 e 90 dias).

Vale salientar que as leituras de resistências à compressão utilizadas neste estudo são apenas até a idade de 28 dias. No entanto, pesquisadores como Neville e Brooks (2013) defendem que concretos com adições minerais devem ter suas leituras de resistências à compressão em idades mais avançadas, visto que algumas adições reduzem a velocidade de hidratação, mas aumentam a resistência em idades mais avançadas, o que também pode ocorrer com compósitos que utilizam aglomerante à base de escórias ativadas alcalinamente.

4.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PASTAS CARBONATADAS

Amostras de pastas de aglomerante tipo CAT e tipo CP foram submetidas a ensaio de verificação de resistência à compressão axial após passarem por processo de carbonatação acelerada. Os dados obtidos são apresentados na Figura 46, no apêndice B são apresentados os resultados de todas as amostras.

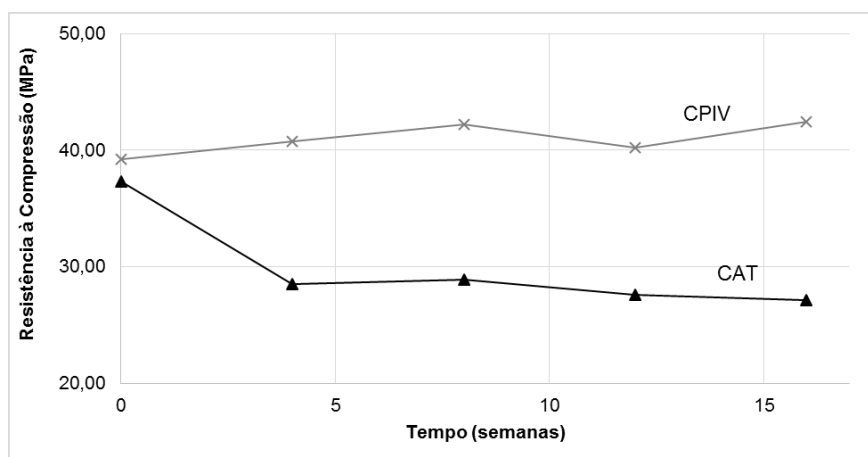


Figura 46 – Resistência à compressão de pastas carbonatadas de CP e de CAT (4, 8, 12 e 16 semanas).

Os dados demonstram redução na resistência à compressão em pastas de CAT e estabilidade, com até pequeno aumento de resistência, em pastas de CP. O acréscimo de resistência em compósito de CP pode ser justificado pela colmatação dos poros causada pela precipitação do produto da carbonatação do Ca(OH)_2 - CaCO_3 na estrutura dos poros do compósito, propiciando uma estrutura mais densificada e, conseqüentemente, pequeno ganho de resistência mecânica. Já a não verificação de queda na resistência mecânica à compressão dos compósitos de CP, se sustenta no fato de o produto de hidratação, inicialmente atacado pelo processo de carbonatação, ser o Ca(OH)_2 , o qual reage com o ácido carbônico (H_2CO_3), proveniente da dissolução do CO_2 em água no poro do compósito cimentício. Uma vez que, o hidróxido de cálcio não é o produto de hidratação responsável pela resistência, sua descalcificação para a formação do CaCO_3 não acarretando em redução de resistência mecânica.

Os resultados são consistentes com estudos anteriores (Castellote et al., 2008; Li et al., 2017), nos quais a carbonatação de CP foi principalmente relacionada à reação química de Ca(OH)_2 e C-S-H com CO_2 e formação de partículas de CaCO_3 . As partículas de CaCO_3 são geralmente cristais de micro tamanho que podem encher os poros na matriz, reduzir a porosidade; e, portanto, melhorar a resistência à compressão.

Pastas de CAT carbonatadas, apresentaram comportamento diverso às pastas de CP. Verifica-se decréscimo de resistência significativa no primeiro período de carbonatação acelerada (4 semanas), enquanto nos períodos

seqüentes a intensidades do decréscimo é reduzida – a redução da resistência no período inicial foi de 8,8 MPa, equivalente a 87,1% da perda de resistência total, já nos períodos seqüentes (de 4 a 16 semanas) tal redução foi de 1,3 MPa, correspondente a 12,8%. A redução na resistência mecânica no período inicial é atribuída ao fato de o ácido carbônico, proveniente da dissolução de dióxido de carbono em água, nos poros do compósito, atacar e reagir diretamente com o C-S-H, uma vez que o processo de hidratação do CAT, não apresenta como produto o Ca(OH)_2 . Este cenário é comprovado por meio dos ensaios microestruturais desenvolvidos e apresentados no capítulo seguinte (4.3). Sabendo que o C-S-H é responsável pelo aumento de resistência em compósitos cimentícios, é de se esperar a redução de resistência a partir de sua descalcificação para a formação do CaCO_3 .

Já a menor intensidade da redução de resistência entre 4 e 16 semanas de carbonatação acelerada, é explicada por meio da precipitação de CaCO_3 , originário do primeiro período de carbonatação acelerada, nos poros do compósito, reduzindo sua permeabilidade ao CO_2 , elemento necessário ao processo de descalcificação do C-S-H e conseqüente perda de resistência.

Os resultados apresentados, referentes a compósitos de CAT assemelham-se a resultados obtidos em pesquisas anteriores. Bakharev et al. (2001) e Li et al. (2017) obtiveram, em seus estudos perda de resistência em compósitos de CAT carbonatados na ordem de 13%, justificando tal resultado no consumo de C-S-H durante processo de carbonatação e retração significativa de CAT durante sua hidratação.

4.3 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

4.3.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

As análises por difração de raios-X de pastas carbonatadas e não carbonatadas de CP e CAT estão apresentadas na Figura 47 e Figura 48, respectivamente.

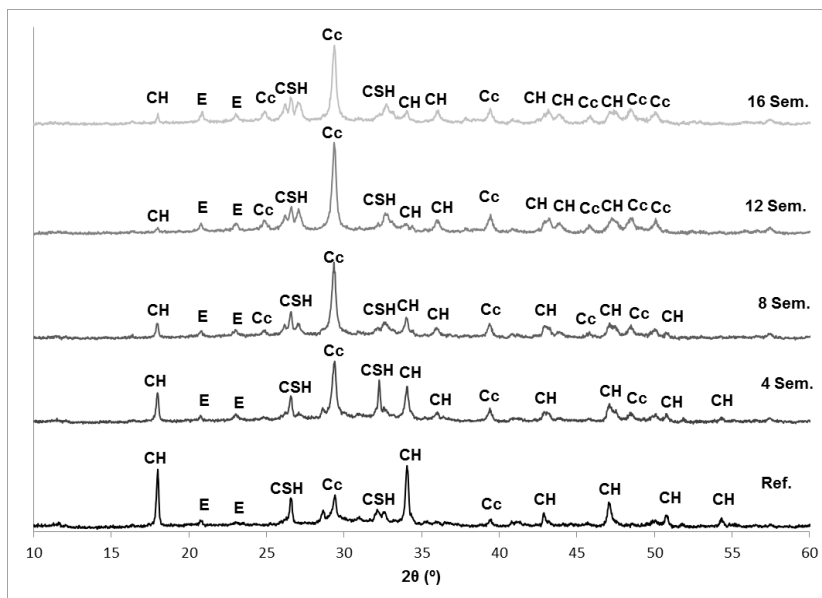


Figura 47 – Difractometria de Raios-X de amostras de pastas de CP carbonatadas (0, 4, 8, 12 e 16 semanas); CH – $\text{Ca}(\text{OH})_2$; C-S-H – Silicato de cálcio hidratado e Cc – CaCO_3 .

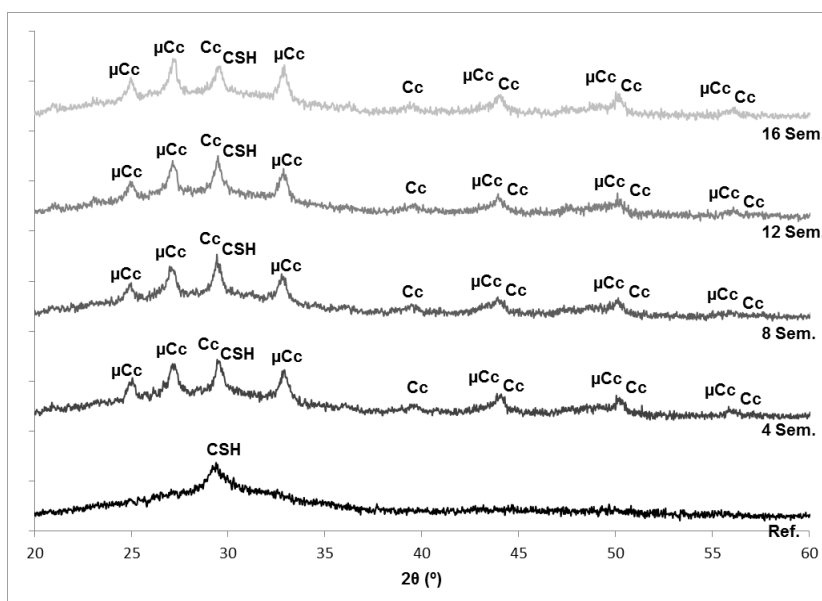


Figura 48 – Difractometria de Raios-X de amostras de pastas de CAT carbonatadas (0 - Referência, 4, 8, 12 e 16 semanas); C-S-H – Silicato de cálcio hidratado; Cc – CaCO_3 e μCc – Vaterita (CaCO_3 mal cristalizado).

Pastas de CAT, se apresentam de estrutura menos cristalinas, em relação às pastas de CP. Esta verificação decorre da característica específica da matéria-prima deste tipo de aglomerante - de estrutura parcialmente amorfa (Figura 23), além de sua hidratação produzir C-S-H de estrutura menos cristalina e mais amorfa em decorrência da presença de concentração significativa de Al_2O_3 . Ben

Haha et al. (2012) obtiveram resultados que validam tal afirmação, demonstrando que a quantidade de Al_2O_3 aumenta a incorporação de Al no C-S-H, tornando o sistema mais amorfo resultando em picos menos definidos nas análises de DRX.

Em CP os principais picos de CH demonstram redução de intensidade, situação está visualizada a aproximadamente 34° (2θ). Esta análise confirma que o CH é o composto que primeiro sofre ataque do processo de carbonatação, culminando em redução do pH do material cimentícios, uma vez que o CH é uma importante fonte de basicidade. O consumo CH, visualizado a partir de redução de picos representativos desse composto, decorre de sua combinação ao ácido carbônico, compondo o carbonato de cálcio, composto que demonstra picos de cristalinidade em crescimento, em função do tempo de carbonatação – aproximadamente 29° (2θ), demonstrando sua maior presença em compósitos carbonatados de CP. Ainda, observa-se que os picos de C-S-H (26° 2θ) se mantiveram com a mesma intensidade, já que o composto atacado pelo processo de carbonatação, primeiramente, é o CH e não o C-S-H. O composto hidratado C-S-H é atacado pela carbonatação após o consumo das reservas alcalinas (SHI et al., 2006).

O DRX de pastas de CAT carbonatadas (Figura 48) demonstra leve redução do pico de C-S-H e em consequência crescimento de pico referente ao $CaCO_3$ (aproximadamente 29° de 2θ), corroborando a teoria de o C-S-H ser o composto atacado pela carbonatação, sendo descalcificado na formação do $CaCO_3$, ocasionando perda de resistência mecânica, uma vez que o CSH é o composto responsável pela resistência em compósitos cimentícios. Na Figura 48 o pico localizado a aproximadamente 29° de 2θ refere-se, na amostra referência (não carbonatada), ao composto C-S-H, enquanto que em amostras carbonatadas, existe uma concorrência de picos naquela posição, picos representativos de C-S-H e de $CaCO_3$ (LI et al., 2017). Observa-se ainda a presença de vaterita ($CaCO_3$ metaestável), também identificada nos trabalhos de Li et al. (2017) e Ye et al. (2017), demonstrando que CAT quando carbonatado, tem como produto $CaCO_3$ de estrutura mais amorfa (JOHANNESON et al., 2001).

Tais verificações corroboram os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica de pastas carbonatadas de CP e CAT, nos quais, pastas de

CP não apresentaram perda de resistência, uma vez que o C-S-H – composto responsável pelo ganho de resistência em compósitos cimentícios, não sofreu o processo de carbonatação, o composto atacado por aquele processo foi o CH presente na matriz. Já em pastas de CAT, a carbonatação culminou também em redução de resistência, em decorrência deste compósito não possuir em sua matriz de hidratação o CH, desta forma, a carbonatação atinge, já em primeiro momento, o C-S-H, ocasionando a redução da resistência observada. A redução de resistência está também associada à formação de quantidade significativa de calcita não cristalina, em comparação ao CP (Ye et al., 2017), verificado em análises de TG/DTG a seguir.

A Figura 49 demonstra a relação entre o tempo e a intensidade dos picos dos compostos, verificados no DRX em pastas carbonatadas de CP e CAT, estabelecendo uma análise semi-quantitativa, no intuito de observar mais claramente o comportamento da presença dos compostos na matriz das pastas.

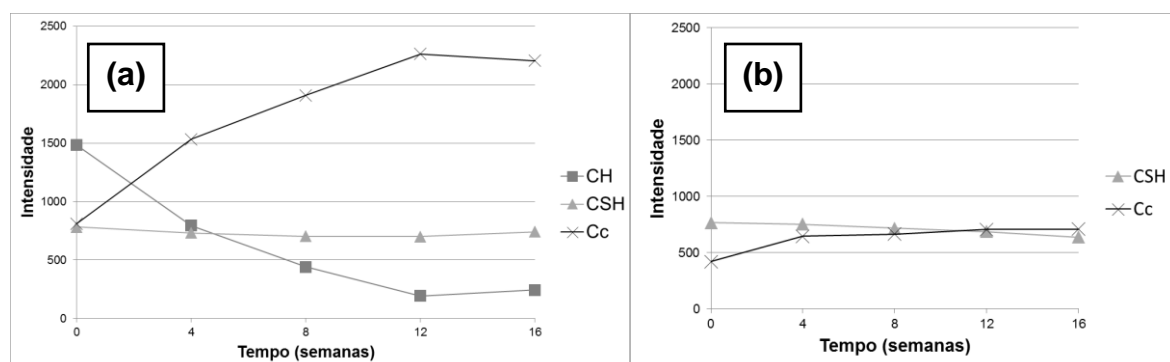


Figura 49 – Comparação dos principais picos visualizados em DRX (a) em pastas de CP carbonatadas; (b) em pastas de CAT carbonatadas.

Apesar da pequena alteração na estrutura de CAT carbonatadas, a maior profundidade de carbonatação pode ser explicada pela fissuração superficial observada e decorrente de sua significativa retração. Neste cenário a análise de DRX apresentou quantitativo superior de CaCO_3 em CP em relação à CAT, mesmo CAT apresentando profundidades de carbonatação mais significativa.

Li et al. (2017), em sua pesquisa quanto a carbonatação de argamassas de CAT, também observou em análise de DRX a formação de CaCO_3 a partir da descalcificação do C-S-H, identificando surgimento de picos de CaCO_3 após a carbonatação e decréscimo de intensidade de picos de C-S-H. A pesquisa da

referida autora teve foco em CAT elaborado através de escória básica ($\text{Ca/Si} > 1$), enquanto que o presente estudo apresenta os resultados obtido em CAT à base de escória de característica ácida ($\text{Ca/Si} < 1$). Sendo assim, é possível afirmar que a caracterização de basicidade da escória não apresentou influência no resultado dos testes de profundidade de carbonatação. Bernal et al. (2012) apresentou análises difratométricas de compósitos de CAT carbonatados, verificando a presença de picos endotérmicos, referentes a CaCO_3 , atribuindo esta constatação à descalcificação do C-S-H (Figura 50).

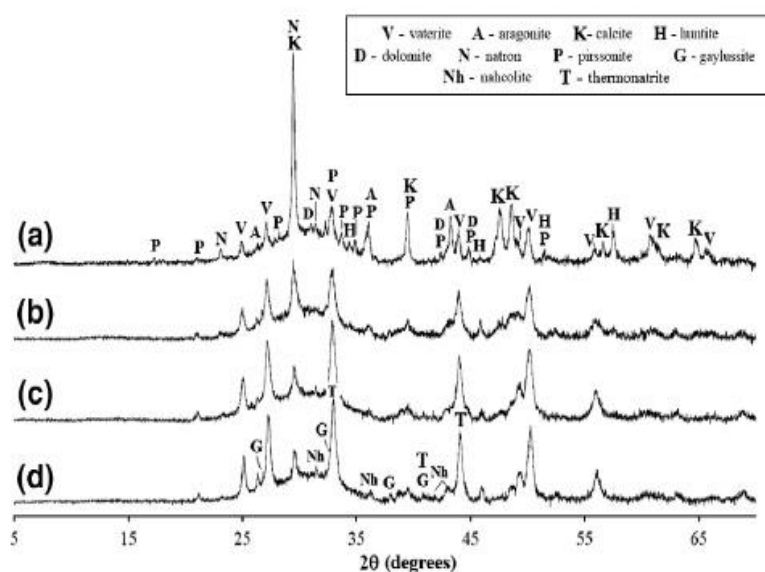


Figura 50 – Difractometria de raios-x de pastas de CAT carbonatadas (a) carbonatadas em ambiente natural, e carbonatadas por teste acelerado (b) ambiente 1% CO_2 ; (c) 3% CO_2 ; (d) 5% CO_2 .

Fonte: Bernal et al. (2012)

4.3.2 ANÁLISES TÉRMICAS (TG/DTG)

A partir das análises térmicas (TG e DTG), foi possível identificar os compostos hidratados de forma a correlacionar com os picos obtidos nas análises de DRX e aos ensaios mecânicos. As referidas análises corroboram os resultados obtidos nas análises de DRX, apresentando de forma clara o comportamento dos compostos formados, além de demonstrar que é no primeiro período de carbonatação (0 a 4 semanas) que ocorrem as alterações mais substanciais na estrutura das pastas (JOHANNESSON et al., 2001; BAKHAREV et al., 2001).

Na Figura 51 podem ser observadas as análises obtidas para as pastas de CP de 0 (referência), 4, 8, 12 e 16 semanas de carbonatação acelerada. Em todas as idades analisadas foram identificados os picos de C-S-H (principal perda de massa entre 100 e 200°C), picos de Ca(OH)_2 (decomposição de 400 a 500°C) e picos de CaCO_3 , de decomposição de 660 a 950°C (LI et al., 2017).

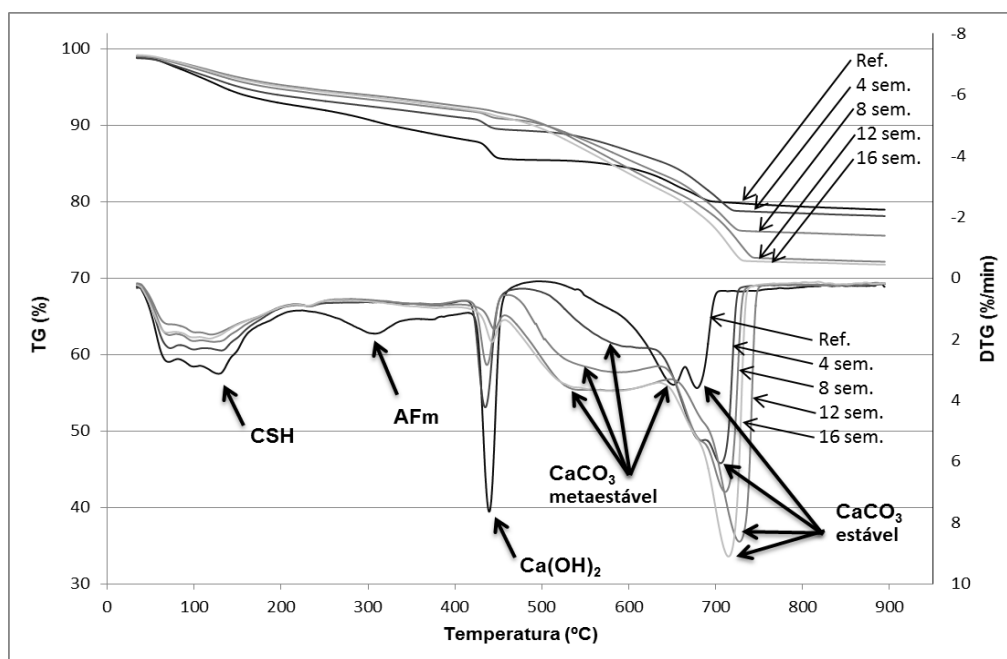


Figura 51 – Análise termogravimétrica (TG e DTG) de pastas de CP carbonatadas (0, 4, 8, 12 e 16 semanas na câmara de carbonatação).

Apesar da verificação de picos dos mesmos compostos nas pastas analisadas, é visível a diferença na intensidade destes picos em função do tempo de exposição ao processo de carbonatação. Corroborando as identificações de DRX e dos ensaios mecânicos executados em pastas carbonatadas, observa-se que o pico característico do composto Ca(OH)_2 apresenta redução significativa de intensidade em pastas de CP, confirmando a hipótese do composto estar sendo consumido pelo processo de carbonatação. O pico referente ao CaCO_3 apresenta ganho de intensidade, em decorrência de sua formação a partir da reação do CO_2 com o Ca(OH)_2 . A redução da intensidade do pico de Ca(OH)_2 e aumento do pico de CaCO_3 é mais significativa no primeiro período de carbonatação (0 a 4 semanas), demonstrando que a partir do processo inicial de carbonatação, o produto dessa (CaCO_3) precipita nos poros da pasta, densificando a mesma e

impedindo a carbonatação mais intensa a partir desta inicial. Esta situação também foi verificada através das análises de DRX e ensaios mecânicos de pastas.

Picos de C-S-H foram identificados, caracterizando-se pela pequena redução de intensidade, que pode ser decorrente do início do ataque da carbonatação a este produto hidratado do CP, caso a reserva alcalina da pasta já tenha sido toda consumida pela carbonatação.

Em pastas de CP, amostras carbonatadas apresentam dois picos referentes à CaCO_3 , um caracterizando composto mal cristalizado e outro o composto bem cristalino (HOPPE FILHO e CINCOTTO, 2008). Já Li et al. (2017) identificaram a formação de vaterina apenas em pastas de CAT carbonatadas, as amostras de CP não apresentaram a formação daquele composto, uma vez que segundo os autores a vaterita é formada a partir da carbonatação do C-S-H.

A Figura 52 apresenta as curvas de TG e DTG de pastas à base de CAT antes e depois da carbonatação.

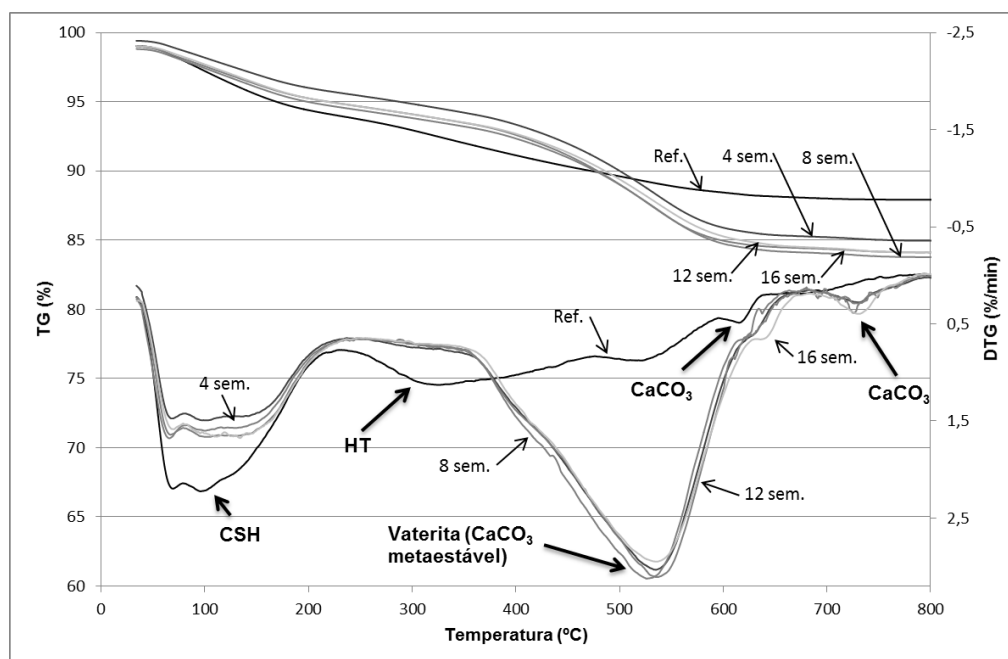


Figura 52 – Análise termogravimétrica (TG e DTG) de pastas de CAT carbonatadas (0, 4, 8, 12 e 16 semanas na câmara de carbonatação).

Picos endotérmicos foram detectados na matriz da pasta, referentes à C-S-H e CaCO_3 e a monossulfato (AFm). A partir da Figura 52, pode-se observar que

não foram encontrados picos característicos de Ca(OH)_2 nas amostras de pastas de CAT. Os resultados estão de acordo com os dados do DRX, indicando a não formação de Ca(OH)_2 como produto de hidratação de CAT. Uma significativa perda de massa ocorreu na faixa de 100 a 220°C devido à evaporação de água molecular no C-S-H e de poros (SONG et al., 2014). O pico a 350°C em pasta não carbonatada (referência) está relacionado à desidratação da hidrotalcita – produto secundário da hidratação de produtos à base de CAT, essa desidratação também demonstra picos a 170°C (BERNAL et al., 2013). Ainda na amostra de referência observou-se pico de pequena intensidade acima de 600°C, referentes à formação de CaCO_3 que pode ser decorrente de início de processo de carbonatação durante o período de cura das amostras.

Após a carbonatação, ocorreram alterações visíveis nas curvas DTG de amostras de pastas de CAT. O pico inicial (50 a 150°C) mostrou uma significativa redução, que pode ser indicativo da descalcificação de C-S-H na matriz.

O pico característico de decomposição do CaCO_3 é verificado a temperatura aproximada de 730°C, demonstrando assim, a influência da carbonatação na matriz das amostras. A diferença mais significativa, novamente, se apresenta na análise comparativa entre a amostra de referência (não carbonatada) e a amostra de 4 semanas de carbonatação. A diferença entre as amostras de 4, 8, 12 e 16 semanas são de pequena significancia, decorrente do processo de densificação das amostras após período inicial da carbonatação, no qual a precipitação do produto carbonato de cálcio nos poros é conhecida.

Assim como o pico de decomposição de carbonatos se intensifica, principalmente entre amostras não carbonatadas e amostras de 4 semanas de carbonatação, o pico referente a presença de C-S-H perde intensidade, principalmente de 0 a 4 semanas de carbonatação, demonstrando a decomposição do C-S-H para a formação do CaCO_3 . Esta situação - redução significativa do pico referente ao C-S-H pode explicar a queda de resistência observada em pastas carbonatadas de CAT, redução esta mais intensa no comparativo entre amostras não carbonatadas e com 4 semanas de carbonatação.

Foi identificado a aproximadamente 300°C pico característico de AFm, composto este também atacado pelo processo de carbonatação culminando em redução da intensidade de pico após a exposição à CO₂ (LEE et al., 2017).

Ainda a análise de TG/DTG de pastas de CAT, apresenta, em amostras carbonatadas, pico de grande intensidade centrado a aproximadamente 530°C, decorrente da descalcificação do C-S-H e formação de CaCO₃ mal cristalizado, conhecido por vaterita, a qual possui temperatura de decomposição inferior a calcita, sendo um composto de menor estabilidade perante a calcita (LI et al., 2017; HE, 2011). Este cenário pode levar a uma menor taxa de formação de calcita em amostras de CAT comparando com a do CP, positivando os resultados obtidos me análise DRX de pastas de CAT (Figura 48), além de contribuir para a baixa resistência de CAT carbonatada.

4.3.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As análises de microscopia foram realizadas com o objetivo de buscar imagens dos compostos hidratados observados nas demais análises (DRX e TG/DTG).

Além disso, é possível observar a evolução da microestrutura da pasta, de acordo com o tempo de exposição ao CO₂ em concentrações acima das atmosféricas (teste acelerado de carbonatação). Tanto em pastas à base de CP, quanto à base de CAT, não foram notadas diferenças significativas quando analisa-se comparativamente as pastas com 4, 8 e 16 semanas, A grande diferença é visualizada comparando-se amostras não carbonatadas das carbonatadas.

Na Figura 53, a partir das verificações de MEV, foi possível identificar os compostos hidratados, presentes em pastas de CP, de forma a correlacionar aos picos obtidos nas análises de TG/DTG, DRX e aos ensaios mecânicos. A Figura 53 (a) – amostra referência (não carbonatada), além da formação de C-S-H e Ca(OH)₂ – principais compostos hidratados de cimentos Portland, pôde-se observar a formação de etringita, assim como a presença da adição mineral cinza volante, decorrente das características do aglomerantes utilizado para a elaboração das amostras de CP (cimento Portland composto tipo IV, com adição

de cinza volante). A característica morfológica bastante cristalina do C-S-H em pastas à base de CP pôde ser observada em todas as fases analisadas (não carbonatada, 4, 8 e 16 semanas de carbonatação), uma vez que sua ocorrência não é reduzida em função da carbonatação, já que não é consumido por tal processo.

As demais observações da Figura 53 representam amostras de pastas carbonatadas nas quais a presença de Ca(OH)_2 já não é visualizada e a formação de CaCO_3 foi identificada. Tal situação justifica-se no consumo daquele composto para formação deste, corroborando as visualizações de DRX e TG/DTG, assim como os dados obtidos nos ensaios mecânicos de compósitos de CP antes e após o processo de carbonatação, nos quais aqueles não perderam resistência após tal processo, decorrente do não consumo de C-S-H para a formação do CaCO_3 .

O MEV trata-se de uma análise morfológica, através de imagens, e para maior assertividade dos compostos observados, análises de EDS foram realizadas juntamente com as análises de MEV em pastas não carbonatadas e após 4 semanas de carbonatação. A escolha destas amostras é decorrente da verificação de alterações mais significativas entre elas, em análises de DRX e TG/DTG, uma vez que as alterações observadas entre as demais amostras, não foram significativas.

A Figura 54 mostra a análise de EDS realizada na amostra não carbonatada de pasta de CP. Na Tabela 10 têm-se a análise química por EDS realizada em sete pontos. Os pontos de interesse naquela, resumem-se a observância da presença do Ca(OH)_2 – pontos 4 e 7, e de C-S-H – pontos 3, 5 e 6, os demais pontos referem-se a presença de cinza volante – ponto 2.

Já na Figura 55 e Tabela 11 têm-se o EDS de 5 pontos, para pastas de CP após 4 semanas de processo de carbonatação acelerada. Nesta pôde-se confirmar a presença do composto CaCO_3 , produto do processo de carbonatação – ponto 3, assim como a óbvia presença de C-S-H – pontos 4 e 5, e ainda a presença de agulhas de etringita.

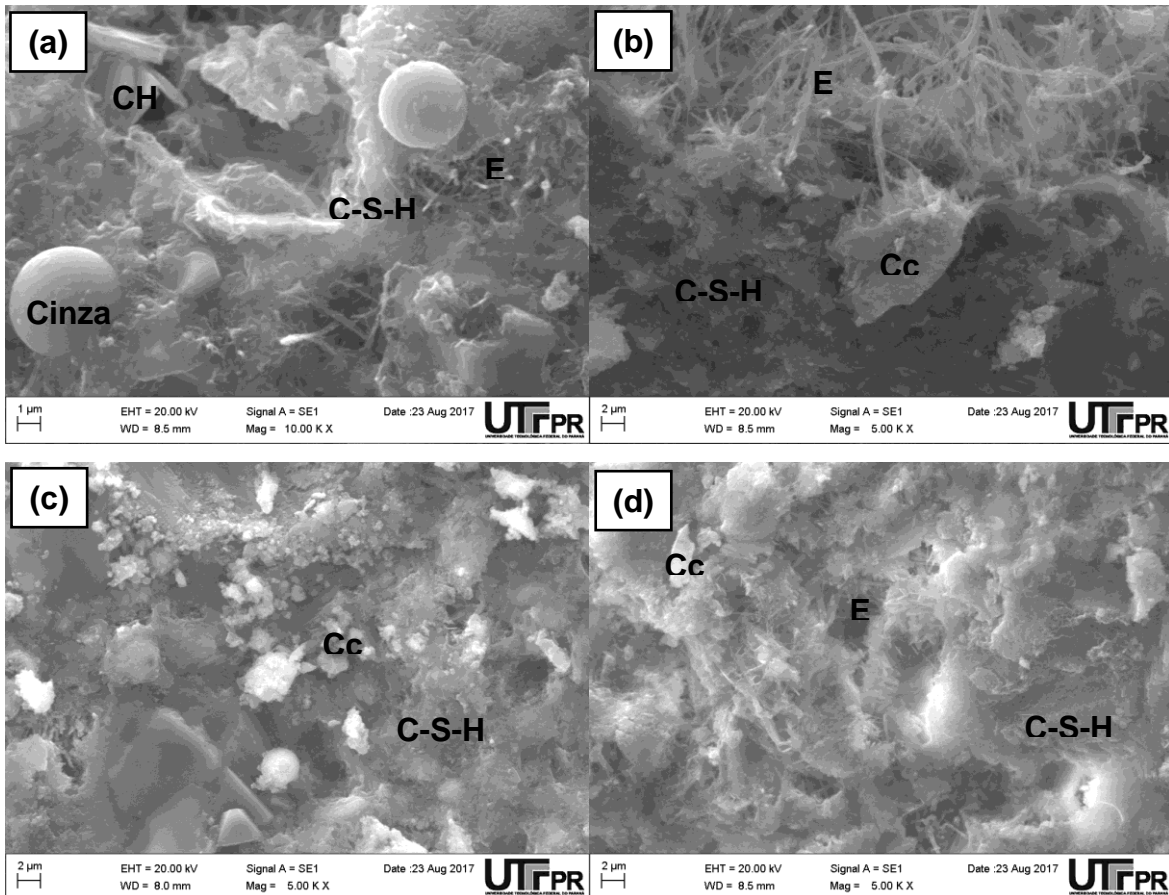


Figura 53 – MEV, C-S-H – Silicato de cálcio hidratado; CH – $\text{Ca}(\text{OH})_2$; E – Etringita; Cc – CaCO_3 em amostras de pastas de CP (a) não carbonatadas; (b) carbonatadas (4 semanas); (c) carbonatadas (8 semanas); e (d) carbonatadas (16 semanas).

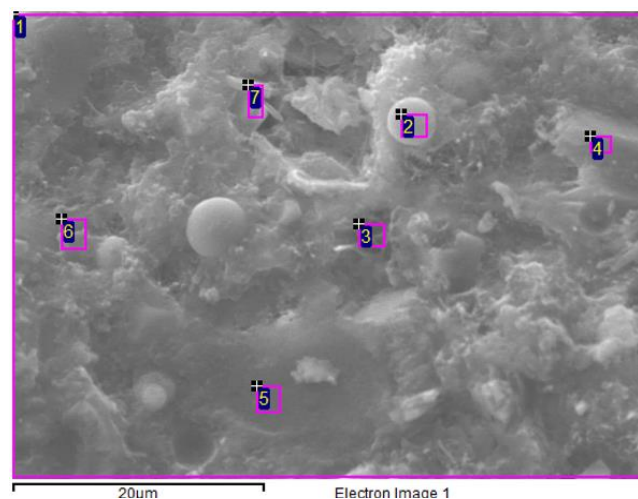


Figura 54 – EDS da micrografia da pasta de CP não carbonatada.

Tabela 10 – EDS da micrografia da pasta de CP não carbonatada.

Ponto	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Total
1	11,11	46,56	0,31	3,27	2,49	7,56	0,98	1,03	25,75		0,94	100,00
2		54,37	0,61	1,44	12,70	21,39	0,24	2,20	4,61	0,39	1,78	100,00
3	7,60	25,51		1,10	1,12	6,89	1,25	2,28	52,96		1,29	100,00
4		56,86		1,01	6,17	5,44	1,49	0,72	27,26		1,07	100,00
5		53,57			0,98	5,66	0,95	0,19	38,65			100,00
6		48,36	0,33	0,74	3,33	12,51	1,58	2,33	29,91		0,90	100,00
7	10,40	48,25		2,44	3,84	3,49	0,60	0,81	25,59		4,58	100,00

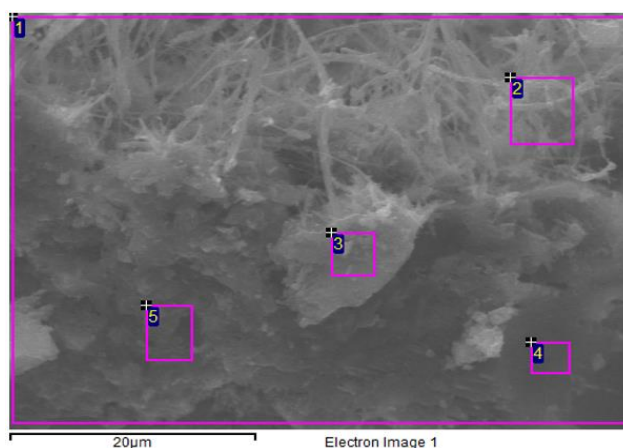


Figura 55 – EDS da micrografia da pasta de CP carbonatada (4 semanas carbonatação acelerada).

Tabela 11 – EDS da micrografia da pasta de CP carbonatada (4 semanas carbonatação acelerada).

Ponto	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Total
1	13,51	44,56	0,47	2,53	6,63	1,17	0,71	28,87	0,23	1,34	100,00
2		47,92	0,33	9,73	16,42	1,75	2,55	19,49	0,73	1,07	100,00
3	14,78	48,58	0,51	2,32	8,25	0,68	0,47	21,85		2,57	100,00
4	4,84	25,49		0,45	1,79	0,57		65,50		1,35	100,00
5		45,75	0,66	4,90	12,84	0,76	1,24	31,87	0,36	1,63	100,00

Dando sequência a análise morfológica, foi desenvolvida a análise de MEV de pastas à base de escória ativada – CAT, A Figura 56 apresenta as imagens obtidas através do MEV para pastas de CAT (a) não carbonatadas, (b) carbonatadas 4 semanas; (c) carbonatadas 8 semanas e (d) carbonatadas 16 semanas. Em todas as imagens apresentadas é possível observar a presença do principal produto da hidratação da escória ativada, o C-S-H. Este C-S-H contido nas pastas de escória ativadas com NaOH se apresenta em forma de gel com

estrutura parcialmente a pouco cristalina. A cristalinidade deste composto permitiu sua identificação em análises de DRX e TG/DTG conforme subtítulos anteriores.

Além da formação de C-S-H, pôde-se observar algumas fissuras na superfície da estrutura, tanto em amostras não carbonatadas, quanto em amostras carbonatadas, indicando a maior fissuração de compósitos à base de CAT, perante compósitos à base de CP ainda antes da carbonatação. O processo de carbonatação pode incorrer em fissuração de compósitos cimentícios, entretanto, não é este o caso desta pesquisa, já que amostras não carbonatadas apresentaram a fissuração também. Esta fissuração pode estar relacionada à retração mais intensa de compósitos à base de CAT, já abordada neste estudo, corroborando os resultados obtidos no ensaio de retração de argamassas, no qual argamassas de CAT apresentaram maior retração que amostras de argamassa de CP e no ensaio desenvolvido para verificação da profundidade de carbonatação, onde as amostras de concreto de CAT obtiveram profundidades mais significativas, em comparação a amostras de concreto de CP. Conforme exposto, está maior profundidade da frente de carbonatação também relacionada a maior fissuração do concreto, facilitando o acesso de CO_2 ao concreto.

A análise das imagens de MEV, demonstradas na Figura 56 (a), em conjunto com o EDS de pastas de CAT não carbonatadas - Figura 57 e Tabela 12, permite observar a presença apenas do C-S-H, como produto da hidratação de escórias ativadas, com ausência do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, presente na hidratação do CP. As demais imagens, demonstradas na Figura 56, de pastas carbonatadas, juntamente a Figura 58 e Tabela 13 – EDS de pastas de CAT após 4 semanas de carbonatação, demonstram a presença de CaCO_3 , produto da carbonatação – reação do CO_2 atmosférico com o C-S-H da estrutura do CAT. Esta reação justifica a queda na resistência de pastas de CAT carbonatadas, perante pastas de CAT não carbonatadas, situação está que não se verifica em pastas à base de CP, conforme dados obtidos em ensaio mecânicos. Salienta-se que o critério de escolhas das amostras a serem encaminhadas para a análise de EDS, foi o mesmo utilizado quando da verificação de pastas de CP.

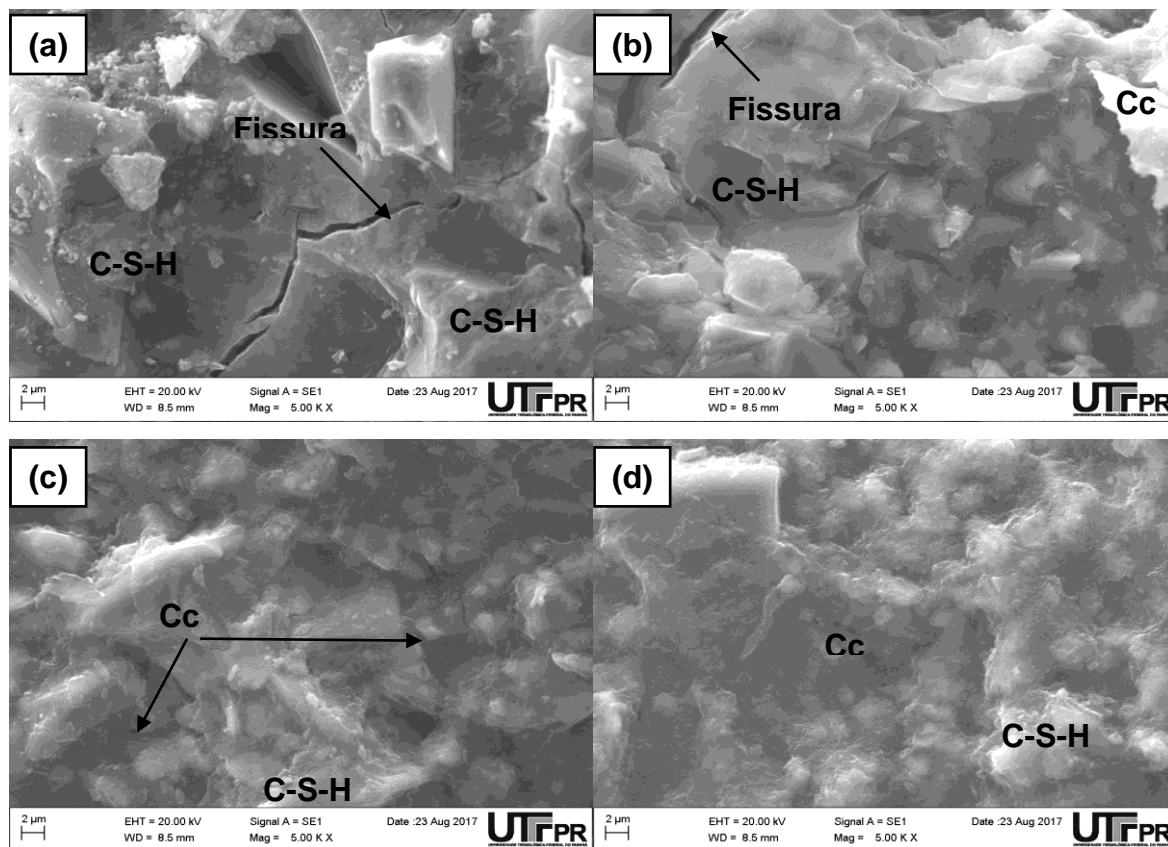


Figura 56 – MEV, C-S-H – Silicato de cálcio hidratado e Cc – CaCO_3 em amostras de pastas de CAT (a) não carbonatadas; (b) carbonatadas (4 semanas); (c) carbonatadas (8 semanas); e (d) carbonatadas (16 semanas).

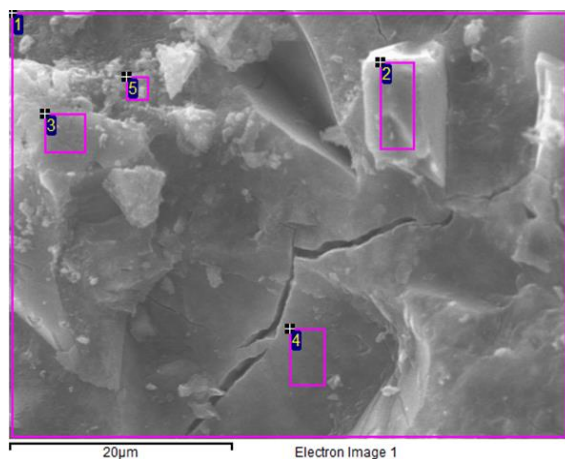


Figura 57 – EDS da micrografia da pasta de CAT não carbonatada.

Tabela 12 – EDS da micrografia da pasta de CAT não carbonatadas

Ponto	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Total
1		52,20	3,41	3,21	6,00	15,62	0,56	15,70	0,25	0,43	2,61	100,00
2		50,72	0,57	4,34	7,53	18,05	0,50	17,15	0,27	0,31	0,55	100,00
3	15,10	39,52	0,42	3,24	6,39	16,37	0,57	16,75	0,31	0,53	0,80	100,00
4	11,98	48,86	3,35	2,72	5,17	13,59	0,43	12,83	0,23	0,41	0,43	100,00
5		52,78	3,67	3,94	6,37	15,66	0,63	15,20	0,31	0,60	0,83	100,00

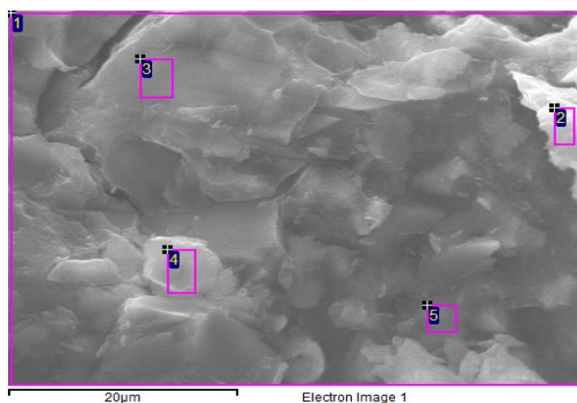


Figura 58 – EDS da micrografia da pasta de CAT carbonatada (4 semanas carbonatação acelerada).

Tabela 13 – EDS da micrografia da pasta de CAT carbonatada (4 semanas carbonatação acelerada).

Ponto	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Total
1		48,09	2,49	2,15	4,83	15,81	0,69	22,81	0,48	0,92	1,74	100,00
2	14,67	54,00	3,54	1,93	3,85	10,82	0,27	10,13	0,18	0,33	0,28	100,00
3		20,50	1,30	1,37	4,86	18,91	1,39	46,41	1,38	2,10	1,77	100,00
4		45,34	2,02	4,23	6,73	18,60	0,60	19,85	0,48	1,03	1,12	100,00
5		32,74	1,06	0,86	2,59	9,80	0,45	50,38	0,57	0,75	0,80	100,00

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, a ativação alcalina, por meio de NaOH, de escória de alto forno de características ácidas ($\text{CaO/SiO}_2 < 1$) foi realizada, visando a análise de aspectos relacionados à durabilidade de concretos produzidos à base deste aglomerante, a partir de ensaios e de análise comparativa a compósitos de cimento Portland.

Pode-se concluir que as análises elaboradas permitiram atingir ao objetivo principal a que este estudo se propôs – propiciar maior compreensão de aspectos de durabilidade de compósitos de CAT. Além disso, concluiu-se que:

- A profundidade de carbonatação medida através de indicador de pH, após processo acelerado de carbonatação, é mais significativa em concretos à base de CAT - Concretos produzidos à base de CAT obtiveram profundidades de carbonatação em média 4,42cm superiores aos concretos à base de CP. Este resultado tem relação com a maior fissuração daqueles compósitos, decorrentes da estrutura do poro dos mesmos, além da menor reserva alcalina em compósitos de CAT perante compósitos de CP, uma vez que aquele não apresenta a portlandita como produto de sua hidratação;
- O conhecimento adquirido em relação à estrutura do poro de CAT, sua contração e conseqüente fissuração, além de outros fatores, explicam os dados levantados no ensaio mais significativo desenvolvido para atender o objetivo principal deste estudo – ensaio acelerado de carbonatação;
- A fissuração em argamassas de CAT é mais significativa que em amostras de CP, tanto em argamassas em estado plástico como em argamassas em estado endurecido. A hipótese para tal fenômeno reside na característica da estrutura do poro do compósito de CAT, promovendo maior fluxo de fluidos entre eles, decorrente de seu menor diâmetro em relação a compósitos de CP, uma vez que a hidratação de escórias ativadas alcalinamente apresenta maior quantidade de material fluido em sua estrutura, perante compósitos de CP que apresentam estrutura mais cristalina, a tensão de contração é também superior;
- A não formação de portlandita – importante fonte de basicidade de compósitos cimentícios, durante o processo de hidratação de CAT,

representa menor alcalinidade na matriz de compósitos formados por aqueles. Este cenário se apresenta como outro fator que interfere em maiores profundidades de carbonatação de compósitos de CAT, uma vez que com a redução da reserva alcalina a frente de carbonatação não encontra barreiras para seu avanço mais intenso;

- A absorção de água e índice de vazios, neste estudo, se mostrou muito similar nos compósitos comparados (de CAT e de CP), tal constatação decorre da fissuração diferenciada entre estes compósitos;
- Compósitos de CAT quando atacados por CO_2 apresentam redução de resistência à compressão, sendo que não apenas sua durabilidade é comprometida, mas também suas características mecânicas;
- Nesta pesquisa escórias ácidas foram utilizadas como matéria prima para a produção de CAT's. Os resultados obtidos a partir dos ensaios elaborados demonstram que CAT's de escórias ácidas, comparativamente a dados de CAT's de escórias básicas, presentes em literaturas, não apresentam diferenças significativas. Bakharev et al. (2001) que investigou a carbonatação acelerada em CAT's durante período similar a esta pesquisa, obteve profundidades de carbonatação na ordem de 10 mm, enquanto que na presente pesquisa aquela foi de 12,71mm. Li et al. (2017) verificaram em suas pesquisas a queda da resistência mecânica de CAT's de escórias básicas após período de carbonatação. Em pastas similares às testadas neste estudo, a queda de resistência foi de aproximadamente 25%, enquanto que neste estudo a queda de resistência foi de 33%.
- Os compostos formados a partir da hidratação de escórias ácidas ativadas por NaOH justificam os dados obtidos por meio das análises microestruturais DRX, TG/DTG e MEV.
- Ainda, as análises microestruturais forneceram informações quanto às alterações na estrutura dos compósitos após processo de carbonatação, confirmando as teorias existentes no que tange a formação do produto da carbonatação - CaCO_3 . No caso de pastas de CP o composto de sacrifício para a formação daquele foi o Ca(OH)_2 , produto de sua hidratação, já no caso das pastas de CAT o composto a ser consumido é o C-S-H, e isso decorre da não presença da portlandita em sua matriz;

- Estudos recentes de microestrutura de CAT's à base de escórias básicas, demonstraram a formação de um polimorfo de CaCO_3 (vaterita) de menor cristalinidade e estabilidade que a calcita, correlacionando as maiores profundidades de carbonatação e maior queda de resistência àquele. As análises microestruturais da presente pesquisa também identificaram a formação de vaterita, uma vez que, segundo Black et al. (2007) este composto é verificado quando o C-S-H, resultante da hidratação da escória, possui relação Ca/Si entre 0,67 e 1,33. A relação observada neste estudo foi de 0,94, obtida por meio da análise da composição do C-S-H apresentada pelo EDS elaborado juntamente ao MEV.
- Também nas análises de microestrutura foi possível observar as fissuras decorrentes da retração em pastas de CAT, elementos estes não visíveis em pastas de CP;
- Por meio de todos os dados obtidos e análises elaboradas alcançou-se o objetivo principal deste estudo, ao verificar aspectos de durabilidade de compósitos de CAT à base de escória ácida relacionados à resistência à carbonatação. Concluindo-se que compósitos de CAT apresentam maiores profundidades de carbonatação, perante compósitos de CP, decorrente de dois principais motivos – maior retração, decorrente da característica de seus produtos de hidratação e estrutura de poros, além de menor reserva alcalina, que decorre da não ocorrência de portlandita durante sua hidratação. A contribuição desta pesquisa foi de analisar e obter as características de CAT's de escória ácida, produto este que, na literatura observada, ainda não tinha sido analisado em termos de durabilidade, especificamente resistência à carbonatação.
- A análise da carbonatação (objetivo primordial desta pesquisa) de compósitos cimentícios é uma das vertentes da análise da durabilidade daqueles, importante variável a ser considerada quando da recomendação de materiais para compor estruturas. Sendo assim, após a aquisição e análise dos resultados obtidos neste, é possível afirmar que a utilização de elementos estruturais à base de CAT deve ser cautelosa, uma vez que sua durabilidade pode ser comprometida em decorrência de fissuração, carbonatação e consequente despassivação da película de óxidos protetora

do aço de reforço em concretos armados. Salienta-se que este resultado, obtido nesta pesquisa, a qual fez uso de escória ácida para a elaboração do CAT, foi similar a estudos de carbonatação de CAT com base em escórias de características básicas. Entretanto, a tecnologia de materiais de construção apresenta soluções para as mais diversas fragilidades dos mesmos, desta forma, estudos que abordem a carbonatação e durabilidade de compósitos de CAT ainda necessitam ser elaborados, buscando alternativas ao desempenho apresentado.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para dar continuidade a este trabalho, pode-se citar:

- A análise da carbonatação de concreto à base de CAT em ambiente natural, estabelecendo um comparativo com os resultados obtidos neste estudo;
- Estudos de carbonatação de CAT com diferente ativador alcalino, uma vez que também é variável das características do aglomerante produzido;
- Verificação da carbonatação por meio de teste acelerado em ambiente diverso ao deste estudo, alterando-se a taxa de CO₂, temperatura e umidade na câmara de carbonatação;
- Análise aprofundada das características da estrutura de poro de compósitos de CAT, comparando com CP e por fim correlacionando tal análise a resultados de carbonatação;
- Avaliação da carbonatação através da solução dos poros com o auxílio de técnica de extração e análise;
- Análise de técnicas de inibição de retração em compósitos de CAT por meio de inserção de aditivos compensadores de retração, no intuito de evitar o surgimento de fissuras, reduzindo a difusão de CO₂ na matriz do compósito; e
- Avaliação de técnicas de acréscimo de reserva álcali em CAT.

6 REFERÊNCIAS

ABREU, A. G. Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante. 2004. Tese (Doutorado) Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

ADAM, A. A. Strength and Durability Properties of Alkali Activated Slag and Fly Ash-based Geopolymer Concrete. School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, RMIT University, Melbourne, Australia, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C348/2: Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. Estados Unidos, 2002, 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C989/C989M: Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars. Estados Unidos, 1999, 8 p.

ANDRADE, C. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras. São Paulo, Pini, 2012.

APERADOR, W.; BAUTISTA, J.; Vera, E. Mössbauer and XRD analysis of corrosion products of carbonated alkali-activated slag reinforced concretes. Dyna, v. 78, 198 – 203 p., 2011.

ARELLANO-AGUILAR, R.; BURCIAGA-DÍAZ, O.; GOROKHOVSKY, A.; ESCALANTE-GARCÍA, J.I. Geopolymer mortars based on a low grade metakaolin: effects of the chemical composition, temperature and aggregate: binder ratio. Construction Build Materials, v. 50, 642–648 p., 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido: Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005, 3 p.

_____. NBR 15261: Argamassa para assentamento e revestimento para paredes e tetos: Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005, 6 p.

_____. NBR 5738: Concreto: Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015, 5 p.

_____. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento para paredes e tetos: Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016, 2p.

AUTEF, A.; JOUSSEIN, E.; GASGNIER, G.; ROSSIGNOL, S. Role of the silica source on the geopolymerization rate. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 358, 2886–2893 p., 2012.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation. *Cement and Concrete Research*, v. 31, 1277–1283 p., 2001.

BEN HAHA, M.; LOTHENBACH, B.; LE SAOUT, G.; WINNEFELD, F. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag — Part II: Effect of Al₂O₃. *Cement and Concrete Research*, v. 42, 74–83 p., 2012.

BEN HAHA, M.; LOTHENBACH, B.; LE SAOUT, G.; WINNEFELD, F. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag – Part I: Effect of MgO. *Cement and Concrete Research*, v. 41, 955–963 p., 2011b.

BENTZ, D. P.; EHLEN, M. A.; FERRARIS, C. F.; GARBOCZI, E. J. Sorptivity-based service life predictions for concrete pavements. In: *Proceedings 7th international conference on concrete pavements*, Orlando, 2001.

BERNAL, S. A. The resistance of alkali-activated cement-based binders to carbonation. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concrete*. 319-332 p., 2015.

BERNAL, S. A.; GUTIÉRREZ, R. M.; PEDRAZA, A. L.; PROVIS, J. L.; RODRIGUEZ, E. D.; DELVASTO, S. Effect of binder content on the performance of

alkali-activated slag concretes. *Cement and Concrete Research*, v. 41, 1–8 p., 2011.

BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; BRICE, D. G.; KILCULLEN, A.; DUXSON, P.; VAN DEVENTER, J. S. J. Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimate the real service life: The role of the pore solution. *Cement and Concrete Research*, v. 42, 1317–1326 p., 2012.

BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; Mejía de Gutiérrez, R.; Van Deventer, J. S. J. Accelerated carbonation testing of alkali-activated slag/metakaolin blended concretes: effect of exposure conditions. *Materials and Structures*, 2014a.

BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; WALKLEY, B.; SAN NICOLAS, R.; GEHMAN, J. D.; BRICE, D. G.; KILCULLEN, A.; DUXSON, P.; VAN DEVENTER, J. S. J. Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*, v. 53, 127–144 p., 2013.

BERNAL, S. A.; SAN NICOLAS, R.; MYERS, R. J.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; PUERTAS, F.; VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. L. MgO content of slag controls phase evolution and structural changes induced by accelerated carbonation in alkali-activated binders. *Cement and Concrete Research*, v. 57, 33–43 p., 2014b.

BLACK, L.; BREEN, C.; YARWOOD, J.; GARBEV, K.; STEMMERMANN, P.; GASHAROVA, B. Structural Features of C-S-H (I) and Its Carbonation in Air-A Raman Spectroscopic Study. Part II: Carbonated Phases, *Journal of the American Ceramic Society*, v.90, 908–917p. 2007.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 6699 Specification for Ground Granulated Blastfurnace Slag for Use with Portland Cement. London, U.K. 1992.

BYFORS, K.; KLINGSTEDT, G.; LEHTONEN, V.; PYY, H.; ROMBEN, L. Durability of concrete made with alkali activated slag, *Trondheim Conference*, 1429–1466 p., 1989.

CASCUDO, O; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto – Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON. v. 1. 849-883 p., 2011.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X.; CAMPO, J.; Cuelloc, G. J. Accelerated carbonation of cement pastes in situ monitored by neutron diffraction. *Cement and Concrete Research*, v. 38, 1365-1373 p., 2008.

CHI, M.C.; CHANG, J.J.; HUANG, R. Strength and drying shrinkage of alkali-activated slag paste and mortar. *Advances in Civil Engineering*, 2012.

CINCOTTO, M. A.; MELO, A. A.; REPETTE, W. L. Effect of diferente activator types and dosages and relation to autogenous shrinkage of activated blast furnace slag cement. *Proceedings of the 11th International Congress the Chemistry of Cement. Africa do Sul*, 2003.

DEJA, J. Carbonation aspects of alkali activated slag mortars and concretes. *Silicates Industriels*, v. 67, 37–42 p., 2002.

DIAS, A.; SILVA, T. J. V.; POGGIALI, F. S. J. O concreto sustentável brasileiro, *Construindo*, v. 9, 2017.

EUROPEAN STANDARDS EN 197-1. Composition, specifications and conformity criteria for common cements, 2000.

FERNÁNDEZ-BERTOS, M.; SIMONS, S. J. R.; HILLS, C. D.; CAREY, P. J. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂. *Journal of Hazardous Materials*, B 112, 193–205 p., 2004.

GALAN, I.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; Natural and accelerated CO₂ binding kinetics in cement paste at different relative humidities. *Cement and Concrete Research*, v. 49, 21–28 p., 2013.

GARCIA-LODEIRO, I.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, A. Alkali-activated based concrete. In *Eco-efficient concrete*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 439 – 487 p., 2013b.

GARCIA-LODEIRO, I.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, A. Variation in hybrid cements over time: alkaline activation of fly ash–Portland cement blends. *Cement and Concrete Research*, v. 52, 112–122 p., 2013a.

GHANTOUS, R. M.; POYET, S.; L'HOSTIS, V.; TRAN, N. C.; François, R. Effect of crack openings on carbonation-induced corrosion. *Cement and Concrete Research*, v. 95, 257-269 p., 2017.

HE, J. Study on Carbonation Behavior and Mechanism of Alkali-activated Slag. Chongqing University, 2011.

HI, C.; ROY, D.; KRIVENKO, P. Alkali-Activated Cements And Concrete, Ed. Taylor & Francis em Londres e Nova York, 2006.

HOPE FILHO, J. Sistemas cimento, cinza volante e cal: Mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

HYVERT, N. Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués em béton. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2009.

ISMAIL, I.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; HAMDAN, S.; VAN DEVENTER, J. S. J. Drying-induced changes in the structure of alkali-activated pastes. *Journal of Materials Science*, v. 48, 3566–3577 p., 2013.

JANG, J. G.; LEE, H. K. Microstructural densification and CO₂ uptake promoted by the carbonation curing of belite-rich Portland cement. *Cement and Concrete Research*, v. 82, 50-57 p., 2016.

JOHANNESSON, B., UTGENANT, P. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. *Cement and Concrete Research*, v. 31, 925-931 p., 2001.

KASHEF-HAGHIGHI, S.; SHAO, Y.; GHOSHAL, S. Mathematical modeling of CO₂ uptake by concrete during accelerated carbonation curing. *Cement and Concrete Research*, v. 67, 1-10 p., 2015.

KLEIN, C.; DUTROW, B. Manual de Ciência dos materiais. 23 ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

KULAKOWSKI, M. P. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

LANGARO, E. A. Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

LEE, K. N.; KOH, T. K.; KIM, O. M.; AN, H. G.; RYU, S. G. Physicochemical changes caused by reactive MgO in alkali-activated fly ash/slag blends under accelerated carbonation. *Ceramics International*, v. 43, 12490-12496 p., 2017.

LEMOUGNA, P. N.; CHINJE MELO, U. F.; DELPLANCKE, M. P.; RAHIER, H. Influence of the chemical and mineralogical composition on the reactivity of volcanic ashes during alkali activation. *Ceramics International*, v. 40, 811–820 p., 2014.

LEÓN, M.; DÍAZ, E.; BENNICI, S.; VEGA, A.; ORDÓÑEZ, S.; AUROUX, A. Adsorption of CO₂ on hydrotalcite-derived mixed oxides: sorption mechanisms and consequences for adsorption irreversibility. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 49, 3663–3671 p., 2010.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. *Cement and Concrete Research*, v. 40, 1341–1349 p., 2010.

LI, N.; FARZADNIA, N.; SHI, C. Microstructural changes in alkali-activated slag mortars induced by accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*, v. 100, 214-226 p., 2017.

MEDEIROS, M. H. F. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloreto. Tese (Doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

MORANDEAU, A.; THIÉR, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. *Cement and Concrete Research*, v. 56, 153–170 p., 2014.

NEDELIJKOVIC, M.; SAVIJA, B.; ZUO, Y.; LUKOVIC, M.; GUANG, Y. Effect of natural carbonation on the pore structure and elastic modulus of the alkali-activated fly ash and slag pastes. *Construction and Building Materials*, v. 161, 687-704 p., 2018.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismos de transporte de fluídos no concreto. In: *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2005. 923-951 p., 2005.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do Concreto*. ed. 2. Bookman. São Paulo, 2013.

PACHECO-TORGAL, F.; MOURA, D.; DING, Y.; JALALI, S. Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. *Construction and Building Materials*, v. 25, 3732–3745 p., 2011.

PAL, S. C; MUKHERJEE, A.; PATHAK, S. R. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 33, 1481–1486 p. 2003.

PALACIOS, M. Empleo de aditivos orgánicos en la mejora de las propiedades de cementos y morteros de escoria activada alcalinamente. Tese (Doutorado) Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Química Inorgánica. 2006

PALACIOS, M.; PUERTAS, F. Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 37, 691–702 p., 2007.

PALOMO A.; MALTSEVA O.; GARCIA-LODEIRO I.; FERNÁNDEZ-JIMENEZ A. Hybrid alkaline cements: Part II. Clinker fator. *Romanian Journal of Materials*, v. 43, 74–79 p., 2013

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYANAS, C. G. Hydration and carbonation of pozzolanic cements. *ACI Materials Journal*, v. 89, 119-130 p., 1992.

PAULETTI, C. Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

POSSAN, E. Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

PROVIS J.; VAN DEVENTER J.S.J. Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications, Woodhead Publishing Limited, Cambridge. 2009.

PUERTAS, F.; PALACIOS, M.; VÁZQUEZ, T. Carbonation process of alkali-activated slag mortars. *Journal of Materials Science*, v. 41, 3071–3082 p., 2006.

PUERTAS, F.; PALACIOS, M.; GUTIÉRREZ, R. Morteros de Escoria Activada Alcalinamente. Propiedades y Durabilidad. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, 2007.

PUERTAS, F.; VARGAS, C.; ALONSO, M. M. Rheology of alkali-activated slag pastes. Effect of the nature and concentration of the activating solution. *Cement and Concrete Composites*. v. 53, 2014.

RAISDORFER, J. W. Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: Efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. TC116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*. v.32, 174-179 p., 1999.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATORIES D'ESSAIS DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS - RILEM
Measurement of hardened concrete carbonation depth: RILEM CPC-18. *Materials and Structures*, v. 21, n. 6, 453-55 p., 1988.

SAETTA, A.V.; VITALIANI, R. V. Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation. *Cement and Concrete Research*, v. 34, 571-579 p., 2004.

SAN NICOLAS, R.; CYR, M.; ESCADEILLAS, G. Characteristics and applications of flash metakaolins. *Applied Clay Science*, 253–262 p., 2012.

SANJUÁN, M. A.; ANDRADE, C.; CHEYREZY, M. Concrete carbonation test in natural and accelerated conditions. *Advances in Cement Research*, v. 15, 171–180 p., 2003.

SANJUÁN, M. A.; DEL OLMO, C. Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating. *Building and Environment*, v. 36, 949-953 p., 2001.

SHI, C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, v. 41, 750–763 p., 2011.

SHI, C.; ROY, D.; KRIVENKO, P. *Alkali-Activated Cements And Concrete*, Ed. Taylor & Francis em Londres e Nova York, 2006.

SILVA, T. J. Mecanismos de transporte de massa no concreto – *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, v.1. 809-848 p., 2011.

SLATY, F.; KHOURY, H.; WASTIELS, J.; RAHIER, H. Characterization of alkali activated kaolinitic clay. *Applied Clay Science*, 75–76 p., 2013.

SONG, K. I.; SONG, H. I.; SONG, J. K.; LEE, B. Y.; YANG, K. H. Carbonation characteristics of alkali-activated blast-furnace slag mortar. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2014, 11 p., 2014.

STEFANONI, M.; ANGST, U.; ELSENER, B. Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete – A critical review. *Cement and Concrete Research*, v. 103, 35-48 p., 2018.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete – Swedish. *Cement and Concrete Research*, institute. Stockholm, 1982.

UHLIG, A.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas. *Revista Brasileira de Energia*, v. 14, 67 – 85 p., 2008.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). *Cement Sustainability Initiative (CSI)*, 2017.

WU, Z.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Transport properties of concrete after drying-wetting regimes to elucidate the effects of moisture content, hysteresis and microcracking. *Cement and Concrete Research*, v. 98, 136-154 p., 2017.

YE, H.; RADLINSKA, A. Carbonation-induced volume change in alkali-activated slag. *Construction and Building Materials*, v. 144, 635-644 p., 2017.

ZHANG, Z.; SCHERER, G. W.; BAUER, A. Morphology of cementitious material during early hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 107, 85-100 p., 2018.

ZIVICA, V.; KRIZMA, M. Acidic-resistant slag cement. *Magazine of Concrete Research*, v. 65, 1073-1080 p., 2013.

APÊNDICE A

O APÊNDICE A apresenta a sequência de procedimentos estabelecidos na argamassadeira para a elaboração de argamassas e concretos de CAT e CP.

Argamassas.

- Etapa 01: Adição de água e aglomerante no misturador mantendo-o em agitação em velocidade baixa por 30s;
- Etapa 02: Adição gradual do agregado miúdo em velocidade baixa por 30s;
- Etapa 03: Agitação dos materiais em velocidade alta por 30s;
- Etapa 04: Desligar o misturador mecânico durante 1min e 30s, deixando a argamassa repousar;
- Etapa 05: Após, agitação em velocidade alta por 1 min.

Concretos.

- Etapa 01: Adição de água e aglomerante no misturador mantendo-o em agitação em velocidade baixa por 30s;
- Etapa 02: Adição gradual do agregado miúdo em velocidade baixa por 30s;
- Etapa 03: Agitação dos materiais em velocidade alta por 30s;
- Etapa 04: Adição gradual do agregado graúdo em velocidade baixa por 30s;
- Etapa 05: Agitação dos materiais em velocidade alta por 30s;
- Etapa 06: Desligar o misturador mecânico durante 1min e 30s, deixando o concreto repousar;
- Etapa 07: Após, agitação em velocidade alta por 1 min.

Totalizando 5 minutos de preparação do concreto. Destaca-se que no caso de concreto no qual o aglomerante é escória ácida ativada por NaOH, a solução alcalina foi diluída juntamente com a água de emassamento, na etapa 01.

Tal processo se deu por analogia ao utilizado quando da elaboração das argamassas, o qual se baseou na ASTM C 348-02.

APÊNDICE B

O APÊNDICE B apresenta os valores de ensaios de resistência à compressão axial nos compósitos produzidos, argamassas, concretos e pastas de CP e CAT. Os resultados apresentados para pastas são referentes a amostras submetidas ao processo de carbonatação acelerada, já os resultados, aqui apresentados, para argamassas e concretos, são de amostras que não passaram por tal processo.

Tabela 14 – Resistência compressão axial de corpos de prova - **Argamassa à base de CP.**

Argamassa de cimento Portland		
	Compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
CP 01	37,56	46,56
CP 02	35,98	47,56
CP 03	36,90	48,25
SOMA	110,44	142,37
MÉDIA	36,81	47,46
DESVIO P.	0,79	0,85
COEF. V.	0,02	0,02

Tabela 15 – Resistência compressão axial de corpos de prova - **Argamassa à base de escória ácida ativadas com NaOH.**

Argamassa de escória ativada por NaOH		
	Compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
CP 01	9,45	37,45
CP 02	9,62	42,04
CP 03	8,90	38,63
SOMA	27,97	118,12
MÉDIA	9,32	39,37
DESVIO P.	0,38	2,38
COEF. V.	0,04	0,06

Tabela 16 – Resistência a compressão axial de corpos de prova (4x4x16cm) - **Concreto à base de CP.**

Concreto de CP (CP 4x4x16cm)			
	Compressão (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
CP 01	20,86	37,13	47,17
CP 02	21,36	38,13	49,64
CP 03	26,34	40,10	51,11
SOMA	68,56	115,36	147,92
MÉDIA	22,85	38,45	49,31
DESVIO P.	3,03	1,51	1,99
COEF. V.	0,13	0,04	0,04

Tabela 17 – Resistência a compressão axial de corpos de prova (4x4x16cm) - **Concreto à base de escória ácida ativadas com NaOH.**

Concreto de escória ativada por NaOH (CP 4x4x16cm)			
	Compressão (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
CP 01	6,81	24,20	52,16
CP 02	6,67	23,49	54,28
CP 03	8,10	25,17	47,94
SOMA	21,58	72,86	154,38
MÉDIA	7,19	24,29	51,46
DESVIO P.	0,79	0,84	3,23
COEF. V.	0,11	0,03	0,06

Tabela 18 – Resistência a compressão axial de corpos de prova (10x20cm) - **Concreto à base de CP.**

Concreto de CP (CP 10x20cm)			
	Compressão (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
CP 01	25,35	40,29	51,08
CP 02	24,03	39,88	52,03
CP 03	24,11	40,96	51,56
SOMA	73,49	121,13	154,67
MÉDIA	24,50	40,38	51,56
DESVIO P.	0,74	0,55	0,48
COEF. V.	0,03	0,01	0,01

Tabela 19 – Resistência a compressão axial de corpos de prova (10x20cm) - **Concreto à base de escória ácida ativadas com NaOH.**

Concreto de escória ativada por NaOH (CP 10x20cm)			
	Compressão (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
CP 01	4,50	26,96	49,86
CP 02	5,21	24,50	51,6
CP 03	4,23	27,65	52,01
SOMA	13,94	79,11	153,47
MÉDIA	4,65	26,37	51,16
DESVIO P.	0,51	1,66	1,14
COEF. V.	0,11	0,06	0,02

Tabela 20 – Resistência a compressão axial de corpos de prova (25x40mm) submetidos à carbonatação acelerada - **Pasta à base de CP .**

Pastas de CPIV Carbonatadas					
	Compressão (MPa)				
	0 semanas	4 semanas	8 semanas	12 semanas	16 semanas
CP 01	37,17	40,27	42,09	36,95	41,11
CP 02	38,80	41,27	40,97	42,28	42,31
CP 03	41,59	40,81	43,47	41,38	43,78
SOMA	117,56	122,34	126,53	SOMA	127,20
MÉDIA	39,19	40,78	42,18	MÉDIA	42,40
DESVIO P.	2,24	0,50	1,25	DESVIO P.	1,34
COEF. V.	0,06	0,01	0,03	COEF. V.	0,03

Tabela 21 – Resistência a compressão axial de corpos de prova (25x40mm) submetidos à carbonatação acelerada - **Pasta à base de escória ácida ativadas com NaOH.**

Pastas de escória ativada por NaOH Carbonatadas					
	Compressão (MPa)				
	0 semanas	4 semanas	8 semanas	12 semanas	16 semanas
CP 01	36,56	24,34	24,69	25,86	19,13
CP 02	35,45	26,88	25,39	21,23	24,81
CP 03	37,89	21,89	23,39	23,19	22,34
SOMA	109,91	73,11	73,47	SOMA	66,28
MÉDIA	36,64	24,37	24,49	MÉDIA	22,09
DESVIO P.	1,22	2,49	1,01	DESVIO P.	2,85
COEF. V.	0,03	0,10	0,04	COEF. V.	0,13

APÊNDICE C

Neste, é apresentado o tratamento estatísticos dos dados de ensaios mecânicos de compressão axial para argamassas e concretos não carbonatados de CP e de CAT. O teste utilizado em ambos os casos foi o teste Tukey.

Tabela 22 – Teste de significância argamassa de CP.

Teste de Significância para Argamassa CP					
Efeito	SS (Soma dos Quadrados)	df (Grau de liberdade)	MS (Quadrado médio)	F	p
Interceptação	10652	1	10652,15	15760,34	0,000000
Tempo	169,92	1	169,92	251,41	0,000092
Erro	2,7	4	0,68		

Tabela 23 – Teste Tukey argamassa de CP.

Teste Tukey HSD; variável Argamassa CP				
Possibilidades de Aproximação para testes Post Hoc				
Erro: Entre MS = 0,67588, df = 4,0000				
Célula nº	Tempo	{1}	{2}	
		36,813	47,457	
1	7			0,000346
2	28	0,000346		

Tabela 24 – Teste de significância argamassa de CAT.

Teste de Significância para Argamassa CAT					
Efeito	SS (Soma dos Quadrados)	df (Grau de liberdade)	MS (Quadrado médio)	F	p
Interceptação	3557,048	1	3557,048	1221,71	0,000004
Tempo	1354,504	1	1354,504	465,22	0,000027
Erro	11,646	4	2,912		

Tabela 25 – Teste Tukey argamassa de CAT.

Teste Tukey HSD; variável Argamassa CAT				
Possibilidades de Aproximação para testes Post Hoc				
Erro: Entre MS = 2,9115, df = 4,0000				
Célula nº	Tempo	{1}	{2}	
		9,3233	39,373	
1	7			0,000297
2	28	0,000297		

Tabela 26 – Teste T amostras argamassa de CP e CAT.

Teste T											
Grupo 1: CP											
Grupo 2: CAT											
Var	Média CP	Média CAT	t-valor	df	p	N CP	N CAT	SD. CP	SD. CAT	F	p
Var											
3	47,456	39,373	5,5327	4	0,0052	3	3	0,8497	2,3835	7,8686	0,2255

Tabela 27 – Teste de significância amostras 4x4x16cm concreto de CP.

Teste de Significância para Concreto CP					
Efeito	SS (Soma dos Quadrados)	df (Grau de liberdade)	MS (Quadrado médio)	F	p
Interceptação	12235,31	1	12235,31	2379,176	0,000000
Tempo	1060,93	2	530,47	103,15	0,000023
Erro	30,86	6	5,14		

Tabela 28 – Teste Tukey amostras 4x4x16cm concreto de CP.

Teste Tukey HSD; variável Concreto CP				
Possibilidades de Aproximação para testes Post Hoc				
Erro: Entre MS = 5,1427, df = 6,0000				
Célula nº	Tempo	{1}	{2}	{3}
1	3	22,853	38,453	49,307
2	7	0,000557		0,000231
3	28	0,000231	0,0028	

Tabela 29 – Teste de significância amostras 4x4x16cm concreto de CAT.

Teste de Significância para Concreto CAT					
Efeito	SS (Soma dos Quadrados)	df (Grau de liberdade)	MS (Quadrado médio)	F	p
Interceptação	6879,044	1	6879,044	1756,491	0,000000
Tempo	2990,11	2	1495,055	381,746	0,000000
Erro	23,498	6	3,916		

Tabela 30 – Teste Tukey amostras 4x4x16cm concreto de CAT.

Teste Tukey HSD; variável Concreto CAT				
Possibilidades de Aproximação para testes Post Hoc				
Erro: Entre MS = 3,9164, df = 6,0000				
Célula nº	Tempo	{1}	{2}	{3}
		22,853	38,453	49,307
1	3		0,000300	0,000227
2	7	0,000300		0,000227
3	28	0,000227	0,000227	

Tabela 31 – Teste T amostras 4x4x16cm concreto de CP e CAT.

Teste T**Grupo 1: CP****Grupo 2: CAT**

Var	Média	Média	t-valor	df	p	N		SD. CP	SD. CAT	F	p
	CP	CAT				N CP	CAT				
Var											
3	49,306	51,46	-0,98352	4	0,3810	3	3	1,9910	3,2274	2,6275	0,5513

Tabela 32 – Teste de significância amostras 10x20cm concreto de CP.

Teste de Significância para Concreto CP					
Efeito	SS (Soma dos Quadrados)	df (Grau de liberdade)	MS (Quadrado médio)	F	p
Interceptação	13555,94	1	13555,94	37986,02	0,000000
Tempo	1109,41	2	554,71	1554,38	0,000000
Erro	2,14	6	0,36		

Tabela 33 – Teste Tukey amostras 10x20cm concreto de CP.

Teste Tukey HSD; variável Concreto CP				
Possibilidades de Aproximação para testes Post Hoc				
Erro: Entre MS = 5,1427, df = 6,0000				
Célula nº	Tempo	{1}	{2}	{3}
		24,497	40,377	51,557
1	3		0,000227	0,000227
2	7	0,000227		0,000227
3	28	0,000227	0,000227	

Tabela 34 – Teste de significância amostras 10x20cm concreto de CAT.

Teste de Significância para o Concreto CAT					
Efeito	SS (Soma dos Quadrados)	df (Grau de liberdade)	MS (Quadrado médio)	F	p
Interceptação	6752,457	1	6752,457	4709,957	0,000000
Tempo	3249,462	2	1624,731	1133,279	0,000000
Erro	8,602	6	1,434		

Tabela 35 – Teste Tukey amostras 10x20cm concreto de CAT.

Teste Tukey HSD; variável Concreto CAT				
Possibilidades de Aproximação para testes Post Hoc				
Erro: Entre MS = 3,9164, df = 6,0000				
Célula nº	Tempo	{1}	{2}	{3}
		4,6467	26,370	51,157
1	3		0,000227	0,000227
2	7	0,000227		0,000227
3	28	0,000227	0,000227	

Tabela 36 – Teste T amostras 10x20cm concreto de CP e CAT.

Teste T											
Grupo 1: CP											
Grupo 2: CAT											
Var	Média CP	Média CAT	t-valor	df	p	N CP	N CAT	SD. CP	SD. CAT	F	p
Var											
3	51,556	51,15	0,560356	4	0,6051	3	3	0,4750	1,1415	5,7750	0,2952

APÊNDICE D

O APÊNDICE E apresenta os dados referentes ao ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios, regidos pela NBR 5738/2015. Assim como o tratamento estatísticos dos dados, por meio do teste Tukey.

Tabela 37 – Absorção de água em amostras de concreto à base de **CP e CAT**.

ABSORÇÃO DE ÁGUA						
		Massa seca Ms (g)	Massa após 72h de imersão Msat (g)	Massa imersa em água - Mi (g)	Absorção (%) (Msat-Ms)/Ms	Média Absorção (%)
CP	AM1	3581,70	3773,70	2223,00	5,36	5,19
	AM2	3618,50	3800,00	2230,50	5,02	
	AM3	3543,40	3727,40	2164,30	5,19	
CAT	AM1	3551,50	3734,70	2204,50	5,16	5,07
	AM2	3694,90	3878,70	2299,50	4,97	
	AM3	3712,30	3901,20	2304,50	5,09	

Tabela 38 – Teste T ensaio absorção de água em concretos de CP e CAT.

Teste T												
Grupo 1: CP												
Grupo 2: CAT												
Var	Média CP	Média CAT	t-valor	df	p	N CP	N CAT	SD. SD. CP	SD. CAT	F	p	
Var	3	5,19	5,07	5,5327	4	0,0052	3	3	0,8497	2,3835	7,8686	0,1935

Tabela 39 – Índice de vazios em amostras de concreto à base de **CP e CAT**.

ÍNDICE DE VAZIOS						
		Massa seca Ms (g)	Massa após 72h de imersão Msat (g)	Massa imersa em água Mi (g)	Índice de vazios (%) (Msat-Ms)/(Msat-Mi)	Média Índice de vazios (%)
CP	AM1	3581,70	3773,70	2223,00	12,38	11,97
	AM2	3618,50	3800,00	2230,50	11,56	
	AM3	3543,40	3727,40	2164,30	11,77	
CAT	AM1	3551,50	3734,70	2204,50	11,97	11,81
	AM2	3694,90	3878,70	2299,50	11,64	
	AM3	3712,30	3901,20	2304,50	11,83	

Tabela 40 – Teste T índice de vazios de concretos de CP e CAT.

Teste T											
Grupo 1: CP											
Grupo 2: CAT											
Var	Média CP	Média CAT	t-valor	df	p	N CP	N CAT	SD. CP	SD. CAT	F	p
Var											
3	11,97	11,81	5,5327	4	0,0052	3	3	0,8497	2,3835	7,8686	0,1935

APÊNDICE E

O Apêndice C destina-se a apresentação do tratamento estatístico (teste Tukey) aos dados referentes a profundidade de carbonatação.

Tabela 41 – Teste de significância concretos de CP.

Teste de Significância para o CP					
Efeito	SS (Soma dos Quadrados)	df (Grau de liberdade)	MS (Quadrado médio)	F	p
Interceptação	2617,244	1	2617,244	3421,625	0,000000
Tempo	30,779	3	10,26	13,413	0,000002
Erro	33,656	44	0,765		

Tabela 42 – Teste Tukey concretos de CP.

Teste Tukey HSD; variável CP					
Possibilidades de Aproximação para testes Post Hoc					
Erro: Entre MS = 0,76491, df = 44,0000					
Célula nº	Tempo	{1}	{2}	{3}	{4}
		6,0067	7,8425	7,9758	7,7117
1	4		0,000196	0,000176	0,000274
2	8	0,000196		0,982068	0,98303
3	12	0,000176	0,982068		0,880532
4	16	0,000274	0,98303	0,880532	

Tabela 43 – Teste de significância concretos de CAT.

Teste de Significância para o CAT					
Efeito	SS (Soma dos Quadrados)	df (Grau de liberdade)	MS (Quadrado médio)	F	p
Interceptação	6692,609	1	6692,609	38135,88	0,000000
Tempo	60,521	3	20,174	114,95	0,000000
Erro	7,722	44	0,175		

Tabela 44 – Teste Tukey concretos de CAT.

Teste Tukey HSD; variável CAT					
Possibilidades de Aproximação para testes Post Hoc					
Erro: Entre MS = 0,17549, df = 44,0000					
Célula nº	Tempo	{1}	{2}	{3}	{4}
		9,8939	12,151	12,476	12,711
1	4		0,00169	0,000169	0,000169
2	8	0,000169		0,243026	0,010904
3	12	0,000169	0,243026		0,523237
4	16	0,000169	0,010904	0,523237	

APÊNDICE F

O APÊNDICE G destina-se a apresentação dos dados referentes ao ensaio de carbonatação – método acelerado, elaborado em amostras de concreto, cujo aglomerante variaram entre CP e CAT.

Tabela 45 – Medição de amostras de concretos de CP e CAT expostas a carbonatação acelerada – 4 semanas de exposição.

MEDIÇÃO 01 (4 SEMANAS NA CAMARA DE CARBONATAÇÃO)						
	Profundidade Carbonatação CP (mm)			Profundidade Carbonatação CAT (mm)		
	AM1	AM2	Média	AM1	AM2	Média
0°	5,8	6,04	5,92	10,23	10,19	10,21
60°	6,3	6,48	6,39	9,54	9,45	9,495
120°	6,77	5,44	6,105	9,476	9,86	9,668
180°	5,89	6,18	6,035	10,04	10,13	10,085
240°	6,06	6,49	6,275	9,7	10,02	9,86
300°	5,73	4,9	5,315	9,98	10,11	10,045
MÉDIA		6,01			9,89	

Tabela 46 – Medição de amostras de concretos de CP e CAT expostas a carbonatação acelerada – 8 semanas de exposição.

MEDIÇÃO 02 (8 SEMANAS DE CARBONATAÇÃO)						
	Profundidade Carbonatação CP (mm)			Profundidade Carbonatação CAT (mm)		
	AM1	AM2	Média	AM1	AM2	Média
0°	6,15	7,02	6,585	10,982	12,23	11,606
60°	9,12	8,96	9,04	11,963	12,44	12,2015
120°	10,14	5,57	7,855	12,2	12,12	12,16
180°	7,86	7,7	7,78	11,88	11,59	11,735
240°	8,23	8,05	8,14	12,54	12,69	12,615
300°	7,64	7,67	7,655	12,64	12,54	12,59
MÉDIA		7,84			12,15	

Tabela 47 – Medição de amostras de concretos de CP e CAT expostas a carbonatação acelerada – 12 semanas de exposição.

MEDIÇÃO 03 (12 SEMANAS DE CARBONATAÇÃO)						
	Profundidade Carbonatação CP (mm)			Profundidade Carbonatação CAT (mm)		
	AM1	AM2	Média	AM1	AM2	Média
0º	8,99	7,13	8,06	12,54	12,23	12,385
60º	7,26	7,25	7,255	11,984	12,44	12,212
120º	7,79	7,93	7,86	12,56	12,12	12,34
180º	9,97	7,89	8,93	12,98	11,59	12,285
240º	8,88	8,19	8,535	13,4	12,69	13,045
300º	7,17	7,26	7,215	12,64	12,54	12,59
MÉDIA		7,98			12,48	

Tabela 48 – Medição de amostras de concretos de CP e CAT expostas a carbonatação acelerada – 16 semanas de exposição.

MEDIÇÃO 04 (16 SEMANAS DE CARBONATAÇÃO)						
	Profundidade Carbonatação CP (mm)			Profundidade Carbonatação CAT (mm)		
	AM1	AM2	Média	AM1	AM2	Média
0º	7,39	8,49	7,94	12,65	12,23	12,44
60º	7,07	8,17	7,62	12,52	12,44	12,48
120º	7,02	7,94	7,48	12,86	12,12	12,49
180º	8,71	7,93	8,32	13,02	13,58	13,3
240º	7,58	7,03	7,305	13,01	12,69	12,85
300º	6,76	8,45	7,605	12,87	12,54	12,705
MÉDIA		7,71			12,71	

Tabela 49 – Coeficiente de carbonatação - concretos de CP e CAT (ajustado ao modelo de Tuuti).

$$ec = KCO_2 * t^{0,5} \text{ (Modelo de Tuuti)}$$

onde:

ec - espessura carbonatada;

KCO₂ - coeficiente de carbonatação;

t - tempo em semanas.

t (semanas)	Concreto de CP			t (semanas)	Concreto de CAT		
	T ^{0,5}	ec (mm)	KCO ₂ (mm.t ^{0,5})		T ^{0,5}	ec (mm)	KCO ₂ (mm.t ^{0,5})
0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
4	2,00	6,01	3,01	4	2,00	9,89	4,95
8	2,83	7,84	2,77	8	2,83	12,15	4,30
12	3,46	7,98	2,30	12	3,46	12,48	3,60
16	4,00	7,71	1,93	16	4,00	12,71	3,18

APÊNDICE G

Os dados referentes a variação dimensional e de massa de argamassas à base de CP e de CAT, são apresentadas neste Apêndice F. O procedimento e número de amostras do ensaio desenvolvido para a aquisição de tais dados está em de acordo com a NBR 15261:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear).

Tabela 50 – Leituras dimensional e de massa em amostras de argamassa de CP.

		LEITURAS														
		Leitura inicial	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias	56 dias	63 dias	70 dias	77 dias	84 dias	91 dias	112 dias
CP	B. Pad.	1,302	1,296	1,319	1,311	1,301	1,303	1,303	1,307	1,3	1,302	1,302	1,31	1,308	1,303	1,307
	AM1	3,061	3,056	3,061	3,045	3,011	3,014	3,009	3,01	2,975	2,975	2,971	2,982	2,98	2,971	2,998
	massa	405,34	400,41	396,71	395,65	394,76	394,49	393,55	392,17	391,94	391,55	391,46	391,37	391,42	392,48	392,38
	diferença	1,759	1,760	1,742	1,734	1,710	1,711	1,706	1,703	1,675	1,673	1,669	1,672	1,672	1,668	1,691
	AM2	3,096	3,084	3,094	3,061	3,043	3,043	3,034	3,030	3,020	3,01	3,012	3,026	3,033	3,013	3,024
	massa	402,81	398,34	394,5	393,39	392,37	392,08	391,09	389,67	389,45	389,74	389,36	389,42	389,45	390,00	389,93
	diferença	1,794	1,788	1,775	1,750	1,742	1,740	1,731	1,723	1,720	1,708	1,710	1,716	1,725	1,710	1,717
	AM3	3,077	3,069	3,070	3,047	3,031	3,026	3,019	3,014	3,005	3,002	3,005	3,013	3,010	3,005	3,012
	massa	404,07	400,05	396,12	395,54	394,86	394,54	393,59	392,15	391,92	391,96	391,93	391,89	391,88	391,52	391,51
	diferença	1,775	1,773	1,751	1,736	1,730	1,723	1,716	1,707	1,705	1,700	1,703	1,703	1,702	1,702	1,705

Tabela 51 – Variação dimensional em amostras de argamassa de CP.

VARIÇÃO DIMENSIONAL ARGAMASSA CP							
	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias
AM1	3,9968E-06	-6,79456E-05	-9,99201E-05	-0,000195843	-0,000191847	-0,000211831	-0,000223821
AM2	-2,3933E-05	-7,57878E-05	-0,000175509	-0,000207419	-0,000215397	-0,000251296	-0,000283207
AM3	-7,97798E-06	-9,57358E-05	-0,000155571	-0,000179505	-0,000207428	-0,00023535	-0,000271251
Média	-9,304721950	-79,823068979	-143,666421670	-194,255706300	-204,890303864	-232,825779514	-259,426436624
	56 dias	63 dias	70 dias	77 dias	84 dias	91 dias	112 dias
AM1	-0,000335731	-0,000335731	-0,000343725	-0,000359712	-0,000347722	-0,000347722	-0,00036370
AM2	-0,000295174	-0,000295174	-0,000343039	-0,000335062	-0,000311129	-0,000275229	-0,00033506
AM3	-0,000279229	-0,000279229	-0,000299174	-0,000287207	-0,000287207	-0,000291196	-0,00029119
Média	-303,378085362	-303,378085362	-328,646262801	-327,327121644	-315,352656541	-304,715826186	-329,989052

Tabela 52 – Variação de massa em amostras de argamassa de CP.

VARIÇÃO MASSA ARGAMASSA CP														
	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias	56 dias	63 dias	70 dias	77 dias	84 dias	91 dias	112 dias
AM1	1,216	2,155	2,443	2,674	2,749	2,989	3,346	3,417	3,518	3,545	3,569	3,557	3,285	3,302
AM2	1,110	2,086	2,388	2,654	2,735	2,989	3,360	3,429	3,356	3,451	3,439	3,431	3,289	3,303
AM3	0,995	1,987	2,153	2,328	2,414	2,656	3,029	3,097	3,089	3,096	3,106	3,111	3,203	3,208
Média	1,107	2,076	2,328	2,552	2,632	2,878	3,245	3,314	3,321	3,364	3,371	3,366	3,259	3,271

Tabela 53 – Leituras dimensional e de massa em amostras de argamassa de CAT.

	LEITURAS														
	Inicial	01 dia	03 dias	07 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias	56 dias	63 dias	70 dias	77 dias	84 dias	91 dias	112 dias
B. Pad.	1,302	1,296	1,319	1,311	1,301	1,303	1,303	1,307	1,3	1,302	1,302	1,31	1,308	1,303	1,307
AM1	3,514	3,493	3,392	3,257	3,221	3,19	3,176	3,173	3,175	3,163	3,143	3,2	3,199	3,17	3,172
massa	410,84	402,09	394,32	392,38	391,64	390,58	386,92	385,87	385,79	385,90	386,07	385,39	385,46	384,59	382,88
diferença	2,212	2,197	2,073	1,946	1,920	1,887	1,873	1,866	1,875	1,861	1,841	1,890	1,891	1,867	1,865
CAT															
AM2	3,314	3,296	3,199	3,079	3,064	3,028	3,009	3,004	3,008	3,011	3,007	3,012	3,009	3,001	3,000
massa	407,25	399,54	387,60	389,36	378,55	377,70	374,41	373,34	373,24	373,25	373,15	373,14	373,15	372,87	372,875
diferença	2,012	2,000	1,880	1,768	1,763	1,725	1,706	1,697	1,708	1,709	1,705	1,702	1,701	1,698	1,693
AM3	3,766	3,740	3,638	3,495	3,466	3,436	3,326	3,322	3,327	3,322	3,352	3,355	3,361	3,349	3,351
massa	413,2	405,4	396,12	395,450	390,840	390,300	386,740	385,700	385,646	385,640	385,710	385,620	385,550	385,130	385,128
diferença	2,464	2,444	2,319	2,184	2,165	2,133	2,023	2,015	2,027	2,020	2,050	2,045	2,053	2,046	2,044

Tabela 54 – Variação dimensional em amostras de argamassa de CAT.

VARIAÇÃO DIMENSIONAL ARGAMASSA CAT							
	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias
AM1	-6,06061E-05	-0,000561616	-0,001074747	-0,001179798	-0,001313131	-0,001369697	-0,00139798
AM2	-4,85633E-05	-0,000534197	-0,000987454	-0,001007689	-0,001161473	-0,001238365	-0,001274788
AM3	-8,06452E-05	-0,000584677	-0,001129032	-0,001205645	-0,001334677	-0,001778226	-0,001810484
Média	-63,27151886	-560,1634208	-1063,744735	-1131,044112	-1269,760607	-1462,095937	-1494,417068
	56 dias	63 dias	70 dias	77 dias	84 dias	91 dias	112 dias
AM1	-0,001361616	-0,001361616	-0,001418182	-0,00149899	-0,00130101	-0,00129697	-0,001393939
AM2	-0,001230271	-0,001230271	-0,001226224	-0,001242412	-0,001254553	-0,0012586	-0,001270741
AM3	-0,001762097	-0,001762097	-0,001790323	-0,001669355	-0,001689516	-0,001657258	-0,001685484
Média	-1451,328027	-1451,328027	-1478,242867	-1470,252239	-1415,026348	-1404,27584	-1450,054619

Tabela 55 – Variação de massa em amostras de argamassa de CP.

VARIAÇÃO MASSA ARGAMASSA CAT														
	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias	56 dias	63 dias	70 dias	77 dias	84 dias	91 dias	112 dias
AM1	2,130	4,109	4,681	4,893	5,173	6,124	6,454	6,492	6,465	6,419	6,592	6,586	6,810	7,270
AM2	1,892	4,918	4,616	7,371	7,806	8,695	9,057	9,109	9,109	9,135	9,140	9,138	9,213	9,219
AM3	1,904	4,230	4,499	5,672	5,877	6,797	7,129	7,162	7,165	7,147	7,169	7,188	7,299	7,307
Média	1,975	4,419	4,599	5,979	6,285	7,205	7,546	7,587	7,579	7,567	7,634	7,637	7,774	7,932