

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

HENRIQUE LEONARDO BATISTA PEREIRA

**ANÁLISE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO NATURAL EM CONCRETOS
À BASE DE CIMENTOS PORTLAND CP IV-32 RS E CP V-ARI RS.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

HENRIQUE LEONARDO BATISTA PEREIRA

**ANÁLISE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO NATURAL EM CONCRETOS
À BASE DE CIMENTOS PORTLAND CP IV-32 RS E CP V-ARI RS.**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentando como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Pato Branco.

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

PATO BRANCO

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO NATURAL EM CONCRETOS À BASE DE CIMENTOS PORTLAND CP IV-32 RS E CP V-ARI RS.

HENRIQUE LEONARDO BATISTA PEREIRA

No dia 15 de junho de 2018, as 10h20min, na sala Q004 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº 01-TCC/2018.

Orientador: Prof^a. Dr^a. CAROLINE ANGULSKI DA LUZ (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof. Dr. JOSÉ ILO PEREIRA FILHO (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Msc. DOUGLAS ÉVERTON CADORE (UTFPR-DV)

*Com muito amor e carinho, dedico este
trabalho aos meus queridos pais, Célio e
Edna, e às minhas irmãs Druscila e Priscila!*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por ter me concedido o dom da vida e por me conceder uma família incrível que é a minha razão de viver.

Aos meus pais, grandes exemplos de vida, Edna e Célio e às minhas irmãs, Dru e Pri, por todo amor, apoio e suporte ao longo desses anos na universidade. Vocês são meus exemplos e minha inspiração, obrigado por nunca me desampararem e pelas mensagens de força nos momentos difíceis, obrigado por terem sido os moldes do meu caráter e por toda ajuda para realização desse sonho. A pessoa que sou hoje devo única e exclusivamente a vocês. Agradeço imensamente pela formação como ser humano que vocês me concederam.

À professora Dr^a Caroline Angulski da Luz pela disponibilidade, orientação, contribuições, incentivo e principalmente pelos conhecimentos transmitidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por ter me concedido a oportunidade de estudar em uma instituição pública de qualidade. E a todos os professores pelo aprendizado e dedicação que contribuíram para minha formação acadêmica.

À Karolyne Amaral, que se tornou uma grande amiga nesses últimos anos e foi fundamental para o desenvolvimento dessa pesquisa. Obrigado pela amizade, paciência e toda ajuda no laboratório durante este último ano.

Aos meus queridos amigos Aída, João e Camila, que foram meus fiéis escudeiros durante o núcleo básico, e ainda são! Vocês também fazem parte dessa conquista, cada um de vocês tem um lugarzinho reservado aqui no lado esquerdo do peito.

Aos meus grandes amigos que Pato Branco proporcionou, não vou citar nomes para não correr o risco de esquecer de algum! Obrigado por toda força, carinho, por estarem ao meu lado nos momentos mais difíceis e por também serem a razão diária do meu sorriso, obrigado por terem sido minha família patobranquense.

E por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para conclusão dessa etapa.

“Não é o mais forte ou o mais inteligente que sobrevive, mas sim o que consegue lidar melhor com a mudança”.

Charles Darwin

RESUMO

PEREIRA, H.L.B. Análise da frente de carbonatação natural em concretos à base de cimentos Portland CP IV-32 RS e CP V-ARI RS. 101 fls. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil – Departamento Acadêmico de Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2018.

A carbonatação é considerada uma das principais patologias no concreto que pode ocasionar problemas como o consumo do CSH e principalmente a corrosão das armaduras. Trata-se de um fenômeno que ocorre naturalmente nas estruturas de concreto a partir de um processo físico-químico entre o gás carbônico (CO_2) da atmosfera e os compostos da pasta de cimento, acarretando na redução da alcalinidade da camada superficial e formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) no interior dos poros. A carbonatação ocorre de fora para dentro, esta camada que vai sendo formada com pH reduzido, denomina-se frente de carbonatação, que ao atingir a profundidade das armaduras provoca desestabilização da película passivadora em torno do aço, ocasionando o início da corrosão. São escassos na literatura as pesquisas relacionadas ao comportamento desse fenômeno natural e que considerem também as variáveis reais a que as estruturas estão submetidas. Dentro deste contexto, o presente trabalho apresenta uma análise dos fatores que influenciam diretamente na frente de carbonatação em ambientes natural, como tipo de cimento, relação água/cimento, porosidade e retração no concreto. Os tipos de cimento utilizados foram o cimento Portland CPIV-32 RS e CPV-ARI RS, e as relações água/cimento foram de 0,5 e 0,65. Foram moldados corpos de prova de concretos para realização dos ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água, carbonatação, retração hidráulica e pastas de cimento para análise morfológica e microestrutural. As análises foram realizadas aos 28 dias, 3, 6 e 9 meses com concretos e pastas condicionadas em ambiente natural parcialmente abrigado da chuva no estacionamento da UTFPR Campus Pato Branco. Ao final das análises, os resultados apontaram que a relação água/cimento foi a principal variável que influencia no processo de carbonatação, já que é o responsável pelo aumento da rede de poros na matriz cimentícia, visto que os resultados não foram tão significativos quando se alterou o tipo de cimento. Concretos com maiores relações água/cimento apresentaram maiores variações de massa e retração e concretos à base de cimentos com maiores teores de adições incorporadas (CPIV-0,5) apresentaram menores valores de variação de massa e retração. Ao se comparar os resultados de profundidade carbonatada natural com as do ensaio acelerado, encontrou-se que levaria 364 dias para o ensaio natural atingir a profundidade encontrada em 30 dias do ensaio acelerado, que foi de 6,01 mm.

Palavras-chave: Concreto. Durabilidade. Carbonatação. Carbonatação Natural. Ensaio Natural.

ABSTRACT

PEREIRA, H.L.B. Analysis of the natural carbonation front in concretes based on Portland cement CP IV-32 RS and CP V-ARI RS. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil – Departamento Acadêmico de Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2018.

The carbonation is considered one of the main pathologies in concrete, which can cause issues like the consumption of CSH and mainly the corrosion of the steel reinforcement bars. The carbonation is a phenomenon that occurs naturally in concrete structures from a physical-chemical process between the carbon dioxide (CO_2) of the atmosphere and the compounds of the cement paste. It causes the reduction of alkalinity in the surface layer and formation of calcium carbonate (CaCO_3) inside the pores. The carbonation occurs from the outside to the inside, forming a layer with reduced pH denominated carbonation front, which upon reaching the depth of the steel reinforcement causes destabilization of the passivating film around the steel, causing the beginning of the corrosion. Research on the behavior of this natural phenomenon and considering the real variables to which the structures are submitted are scarce. In this context, the present research show an analysis of factors that directly influence the front of carbonation, such as cement type, water/cement ratio, porosity and shrinkage in concrete in a natural environment. The cement types used were Portland cement CPIV-32 RS and CPV-ARI RS, and water/cement ratios used were 0,5 and 0,65. The concretes made intended to perform the tests of resistance to axial compression, water absorption, carbonation, hydraulic retraction, and cement pastes were used for morphological and microstructural analysis. The tests were performed at 28 days, 3, 6 and 9 months with concretes and pastes conditioned to a natural environment partially sheltered from rain in the parking lot of UTFPR - Pato Branco. At the end of the analysis, the results showed that the water/cement ratio was the main responsible for the advance of the carbonation front, since it increases the pore network in the cement matrix, since the results were not significant when changed the type of cement. Concretes with higher water/cement ratios showed larger mass and shrinkage variations, and cement-based concretes with higher content of incorporated additives (CPIV-0,5) presented lower values of mass variation and retraction. Comparing the results of natural carbonation depth with the accelerated test, it was found that it would take 364 days for the natural test to reach the depth found within 30 days of the accelerated test, which was 6,01 mm.

Keywords: Concrete. Durability. Carbonation. Natural Carbonation. Natural test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento de resistência dos compostos puros.....	22
Figura 2 - Representação esquemática da formação à hidratação do cimento Portland.....	23
Figura 3 – Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil	25
Figura 4 – Representação dos tipos de água livre na pasta de cimento	26
Figura 5 - Representação esquemática das proporções volumétricas: antes e durante a hidratação (à esquerda e à direita respectivamente)	27
Figura 6 - Carbonatação do hidróxido de cálcio.....	29
Figura 7 – Representação esquemática da difusão do CO ₂	30
Figura 8 – Fatores intervenientes na carbonatação do concreto.....	32
Figura 9 – Teor médio das concentração de CO ₂ conforme alguns ambientes	33
Figura 10 - Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente.	34
Figura 11 - Efeito das condições de exposição na carbonatação	34
Figura 12 - Resumo dos principais mecanismos de transporte de gases	39
Figura 13 - Mecanismo de retração total	45
Figura 14 – Exemplo de difratograma de amostra de cimento Portland CPIV-32 RS	48
Figura 15 – Morfologia do CSH (a) e da Portlandita (b)	48
Figura 16 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo	51
Figura 17 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo	52
Figura 18 – Betoneira utilizada (à esquerda) e aparência do CPIV-0,5 fabricado (à direita)	55
Figura 19 – Slump Test: a) CP V-0,5; b) CP IV-0,5; c) CP V-0,65	56
Figura 20 – Molde dos corpos de prova	56
Figura 21 – Câmara úmida.....	57
Figura 22 – Local de condicionamento dos corpos de prova	58
Figura 23 – Ensaio de compressão diametral	59
Figura 24 – Intervalo de mudança de cor entre a região carbonatada e não carbonatada	60
Figura 25 – Pontos utilizados para medição de profundidade de carbonatação	60

Figura 26 – Amostras no recipiente submersas em água	61
Figura 27 – Relógio comparador (esquerda) e amostras para variação dimensional e de massa (direita).....	63
Figura 28 – Fragmentos selecionados	63
Figura 29 – Região da pasta endurecida selecionada (cinza).....	64
Figura 30 – Amostras submersas em acetona	64
Figura 31 – Conjunto filtro de buncher e bomba de vácuo.....	65
Figura 32 – Amostras para MEV	65
Figura 33 – Procedimento de moagem	66
Figura 34 – Amostras para ensaio de DRX e TG-DTG	66
Figura 35 – Resistência à compressão dos concretos.	68
Figura 36 – Aspecto da carbonatação por meio da fenolftaleína	70
Figura 37 – Aspecto da carbonatação por meio da timolftaleína.....	71
Figura 38 – Profundidade de carbonatação a partir da Fenolftaleína.....	72
Figura 39 – Profundidade de carbonatação a partir da Timolftaleína.....	72
Figura 40 – Comparação entre os indicadores de pH para CPIV-0,5	74
Figura 41 – Comparação entre os indicadores de pH para CPV-0,5	74
Figura 42 – Comparação entre os indicadores de pH para CPV-0,65	75
Figura 43 – Profundidade de carbonatação: ensaio acelerado (CADORE, 2018) x natural	76
Figura 44 – Absorção de água	77
Figura 45 – Variação de massa (acima) e variação dimensional (abaixo)	78
Figura 46 – DRX das amostras ensaiadas.....	80
Figura 47 – Intensidade dos picos ao longo do tempo.....	81
Figura 48 – MEV da amostra CPV-0,5 (3 meses)	82
Figura 49 – MEV da amostra CPV-0,5 (9 meses)	82
Figura 50 – MEV da amostra CPV-0,65 (3 meses)	83
Figura 51 – MEV da amostra CPIV-0,5 (9 meses)	83
Figura 52 – MEV da amostra CPIV-0,5 (3 meses)	84
Figura 53 – MEV da amostra CPIV-0,5 (9 meses)	84
Figura 54 - Metodologias empregadas nos estudos de carbonatação no Brasil	93
Figura 55 - Metodologias empregadas nos estudos de carbonatação no Exterior	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites aproximados da composição do cimento Portland.....	21
Tabela 2 - Principais compostos do cimento Portland.....	21
Tabela 3 - Tipos de retração	44
Tabela 4 - Características dos indicadores de pH.....	46
Tabela 5 – Propriedades dos aglomerantes.....	50
Tabela 6 – Caracterização química, física e mecânica do CPIV-32 RS.....	50
Tabela 7 – Caracterização química, física e mecânica do CPV-ARI RS.....	50
Tabela 8 - Caracterização do agregado miúdo	51
Tabela 9 - Caracterização do agregado graúdo.....	52
Tabela 10 - Traços utilizados para composição dos concretos	53
Tabela 11 – Amostragem e dimensões dos corpos de prova	54
Tabela 12 – Valores de Slump Test	56
Tabela 13 - Metodologia de preparo da solução indicadora de pH	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	JUSTIFICATIVA	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	CIMENTO PORTLAND	20
2.1.1	Composição Química	20
2.1.2	Hidratação do cimento Portland	22
2.1.3	Tipos de cimento Portland.....	24
2.1.4	Influência da porosidade na resistência mecânica em concretos à base de cimentos Portland.....	25
2.2	CARBONATAÇÃO DO CONCRETO	28
2.3	FATORES QUE INFLUENCIAM NA PROFUNDIDADE E VELOCIDADE DA CARBONATAÇÃO	31
2.3.1	Condições de exposição ambiental.....	32
2.3.2	Características do concreto.....	35
2.3.3	Mecanismos de transporte do CO ₂ para o interior do concreto.....	38
2.4	MÉTODOS DE ENSAIOS DA CARBONATAÇÃO	40
2.4.1	Relação entre o ensaio acelerado e o natural.....	41
2.5	RETRAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	43
2.5.1	Efeito da retração devido à carbonatação.....	45
2.6	MÉTODOS DE MEDIDA DE CARBONATAÇÃO	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	49
3.1.1	Cimento Portland	49
3.1.2	Agregado Miúdo	51
3.1.3	Agregado Graúdo.....	52
3.1.4	Água.....	53
3.2	MÉTODOS	53

3.2.1	Composição dos Traços.....	53
3.2.2	Amostragem de corpos de prova	53
3.2.3	Moldagem dos concretos ¹	54
3.2.4	Cura	57
3.2.5	Condicionamento	58
3.2.6	Determinação da temperatura e umidade do ambiente	58
3.2.7	Ensaio de resistência à compressão.....	58
3.2.8	Ensaio de profundidade da carbonatação natural.....	59
3.2.8.1	Comparação entre ensaio Acelerado e Natural	61
3.2.9	Ensaio absorção de água por imersão.....	61
3.2.10	Ensaio de variação dimensional	62
3.2.11	Ensaio de análise da microestrutura	63
3.2.11.1	Difração de Raios-X (DRX).....	66
3.2.11.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	68
4.2	MEDIDA DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	69
4.2.1	Influência do indicador de pH.....	74
4.2.2	Comparação com processo acelerado.....	75
4.3	ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	76
4.4	VARIAÇÃO DIMENSIONAL E DE MASSA	78
4.5	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA	80
4.5.1	Difração de Raios-X (DRX)	80
4.5.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	82
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
	ANEXO I.....	92
	APÊNDICE A.....	97
	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	97
	ABSORÇÃO DE ÁGUA	97
	VARIAÇÃO DIMENSIONAL E DE MASSA	98

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos as estruturas de concreto tendem a sofrer modificações em sua estrutura interna, acarretando alterações em sua microestrutura. Essas modificações ocorrem por conta da interação entre o material e o meio ambiente, sendo que em alguns casos acaba comprometendo a durabilidade da estrutura (PAULETTI, 2004). Essa interação ocorre quando os agentes agressivos presentes na atmosfera entram em contato com o material cimentício, penetrando-o através dos poros. (POSSAN, 2004).

Estudos realizados por diversos autores, dentre eles Helene (1986), Andrade (1992), Cascudo e Helene (2001) e Figueiredo e Meira (2013) comprovam que a corrosão de armaduras tem se apresentado como a principal manifestação patológica em estruturas de concreto armado. Esse fenômeno ocorre devido a dois principais fenômenos: o primeiro devido à ação de íons de cloreto, cuja característica é a alteração da película passivadora da armadura; já o segundo, tema do presente estudo, é a carbonatação, fenômeno que traz como consequência a redução da alcalinidade do concreto, que reduz a estabilidade da película passivadora (KULAKOWSKI, 2002).

A carbonatação trata de um processo físico-químico entre o gás carbônico (CO_2) e os compostos da pasta cimento. A reação de carbonatação se inicia basicamente quando o CO_2 presente na atmosfera começa a penetrar da superfície para o interior do concreto, através dos poros. Na presença de umidade, o gás reage com alguns compostos da pasta de cimento (especialmente o hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Essa interação resulta, principalmente, na precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) no interior dos poros do concreto.

Esse fenômeno acarreta mudanças internas no concreto; que são primeiramente devido à formação de novos produtos; e devido a redução da alcalinidade do material, que passa de um pH que inicialmente era entre 12,5 e 13 para 9 ou até menor (FERREIRA, 2013). As principais responsáveis pela destruição da película passivadora ao redor do aço são as alterações químicas, deixando-o vulnerável à corrosão (PAULETTI, 2009), visto que a faixa de pH crítica de despassivação do aço está entre 11,5 a 11,8 (ISAIA, 2011).

A difusão do CO_2 no interior do concreto dependerá principalmente de fatores como a concentração do gás na atmosfera e as condições da superfície do concreto, como tamanho dos poros, distribuição dos poros e teor de água intersticial (PAULETTI, 2009). Ou seja, quanto mais poroso for o concreto, e maior interligação entre estes poros, maior facilidade terá o gás de se penetrar em seu interior.

As propriedades microestruturais do concreto são diretamente afetadas pelo fator água/cimento, que está diretamente relacionada com a porosidade e as propriedades mecânicas do concreto endurecido (CADORE, 2008). De acordo com Possan (2004) quanto maior o fator água/cimento, mais poroso se tornará o concreto, colaborando com um dos principais responsáveis na contribuição para o avanço da frente de carbonatação.

O uso de adições minerais permite a redução da permeabilidade e da porosidade do concreto, conseqüentemente aumentando a resistência à compressão (KULAKOWSKI, 2002), acarretando também no aumento da durabilidade das estruturas, através das mudanças que ocorrem na microestrutura cimentícia, gerando uma estrutura mais densa e compacta, ou seja, ocorre um refinamento dos poros (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Apesar das melhoras significativas em algumas propriedades do concreto, segundo Kulakowski (2002), as adições podem contribuir também no aumento da velocidade da carbonatação, o que não é desejável, devido à redução da reserva alcalina. Isso ocorre por conta do consumo do hidróxido de cálcio proporcionado pelas adições. Osborne (1986), citado por Kulakowski (2002), observou em seus estudos que essa redução do hidróxido de cálcio acaba expondo e deixando vulnerável outros produtos do concreto à carbonatação, dentre eles o silicato de cálcio hidratado (CSH.)

O concreto carbonatado também está sujeito à retração por carbonatação, devido à perda das moléculas de água na reação principal e pela diminuição de volume na pasta de cimento endurecida, devido à dissolução do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e à precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) (NEVILLE, 1997).

Neville (1997) ainda discorre que a frente de carbonatação ocorre a uma velocidade decrescente, em virtude de o processo ser consideravelmente lento e ainda dificultado por conta da formação de novos produtos no interior dos

poros, devido à precipitação dos carbonatos, que acabam formando uma espécie de barreira superficial no concreto.

Nos estudos de carbonatação são comumente empregados processos acelerados para simulação desse fenômeno em laboratório, expondo concretos a elevadas concentrações de CO₂ com objetivo de acelerar a velocidade das reações. O maior problema da simulação da carbonatação natural através da carbonatação acelerada consiste no processo de correlação dos dados, isso devido a fatores como escolha e realização do pré-condicionamento das amostras, condições de execução dos ensaios (que não são normalizados) e definição dos fatores influentes (PIRES, 2016).

Pires (2016) ainda aponta a importância de pesquisas visando ao processo de carbonatação em ambiente natural, considerando-se que em ensaios acelerados de laboratório, apesar de todo controle do ambiente de exposição que se tem, não são capazes de representar a aleatoriedade das variáveis que ocorrem em situações reais.

Neste trabalho, foi realizado o estudo da carbonatação em dois tipos de cimento Portland (pouco e alto teor de adição) e duas diferentes relações água/cimento de 0,5 e 0,65 todos sujeitos à carbonatação natural. Além da profundidade de carbonatação, foram monitoradas a resistência à compressão, retração, porosidade e análise da microestrutura até o período de nove meses.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Contribuir no estudo da carbonatação do cimento Portland CPV RS e CPIV-32 RS em atmosfera natural.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência do tipo de cimento e da relação água/cimento na velocidade de carbonatação.
- Investigar a influência da retração e da porosidade na carbonatação do concreto.
- Realizar análise comparativa entre os resultados de carbonatação natural e carbonatação acelerada.

1.2 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de pesquisas na área de durabilidade dos materiais cimentícios tem sido cada vez mais motivada pelo aumento progressivo das emissões e, conseqüente, elevada concentração de gás carbônico na atmosfera (TASCA, 2012). A durabilidade engloba desde a qualidade do concreto, as condições naturais do ambiente de exposição que a estrutura está inserida, as operações de manutenção e reparo até as condições de uso que a edificação está submetida durante sua vida útil (POSSAN, 2004).

É amplamente conhecido o comportamento do efeito da carbonatação em estruturas de concreto armado, porém ainda há poucos relatos na literatura de estudos da carbonatação natural em concreto expostos às condições ambientais naturais por longo prazo. Esse fenômeno ocorre de modo bastante lento e pode causar sérios problemas às armaduras de uma estrutura em concreto armado.

Muitos pesquisadores empregam métodos acelerados para o estudo da carbonatação a fim de se verificar as influências do tipo de cimento, adições

minerais, relação água/cimento, tempo e tipo de cura na resistência à penetração de CO₂, no desenvolvimento da carbonatação, porém, ainda não existe uma padronização ou normatização desses ensaios, podendo ser realizados com diferentes temperaturas, condições de umidade relativa, tempo de exposição e concentração de CO₂ do ambiente (KULAKOWSKI, 2002). Baroghel-Bouny *et al.* (2008) citado por Tasca (2012), relata que as modificações devido às reações que ocorrem na microestrutura nos ensaios acelerados não são as mesmas que ocorrem no material naturalmente. Por essa razão, nota-se a importância de se investigar o fenômeno da carbonatação natural.

Neste estudo foi verificado o comportamento da velocidade da frente de carbonatação em ambiente natural, de corpos de prova de concreto submetidos às condições climáticas e ambientais do município de Pato Branco-PR por nove meses, verificando-se este comportamento em diferentes tipos de concreto quando se altera o tipo de cimento (com pouco e elevado teor de adições) e também a relação água/cimento.

O suporte para realização dessa pesquisa foi dado pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *campus* Pato Branco que possui disponibilidade dos materiais e equipamentos necessários para realização desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CIMENTO PORTLAND

Bauer (2008) define o cimento Portland como um material pulverulento obtido a partir da queima de materiais calcários e argiloso, ocorrendo posteriormente a moagem do clínquer resultante, que se constitui basicamente de silicatos e aluminatos de cálcio, eventualmente podendo receber adições de substâncias que alterem suas propriedades ou facilitem seu emprego. De modo sintetizado o cimento ainda pode ser definido como “substância adesiva capaz de unir fragmentos ou massas de matéria sólida tornando-as um todo compacto” (HEWLETT, 2004, p.1).

O principal fator que tornou o concreto principal material de construção foi a capacidade de não sofrer alterações químicas quando expostos à ação da água ao longo do tempo (NEVILLE e BROOKS, 2013).

2.1.1 Composição Química

De acordo com Mehta e Monteiro (1994) uma das principais substâncias componentes do cimento Portland são os silicatos de cálcio, dessa forma, a matéria-prima necessária para sua produção deve conter cálcio e sílica em quantidades e proporções adequadas. Portanto, as pedras calcárias, giz, mármore e conchas do mar – que consistem-se de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro – são as fontes industriais mais comuns.

Bauer (2008) aponta que os principais constituintes do cimento Portland são: a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3), contendo ainda uma pequena quantidade de magnésia (MgO) e o anidrido sulfúrico (SO_3), este também com a função de retardar o tempo de pega, podendo conter ainda outra pequena parcela de impurezas como óxido de titânio (TiO_2) e álcalis como o óxido de sódio (Na_2O) e óxido de potássio (K_2O). Esses constituintes (Tabela 1) ao se misturarem no forno, geram uma série de produtos mais complexos (Tabela 2), que são os principais compostos do cimento Portland.

Tabela 1 - Limites aproximados da composição do cimento Portland.

Óxido	Teor (%)	Abreviatura
CaO	60 - 67	C
SiO ₂	17 - 25	S
Al ₂ O ₃	3 - 8	A
Fe ₂ O ₃	0,5 - 6	F
MgO	0,1 - 4	M
Álcalis	0,2 - 1,3	-
SO ₃	1 - 3	S̄

Fonte: Neville e Brooks (2013) e Isaia (2011), adaptado pelo autor.

Pode-se observar que os componentes essenciais do cimento Portland são a cal (C), a sílica (S), a alumina (A) e o óxido de ferro (F), totalizando mais de 90% de sua composição.

Tabela 2 - Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura	Teor (%)
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	54,1
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	16,6
Aluminado tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	10,8
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	9,1

Fonte: Neville e Brooks (2013), adaptado pelo autor.

Os teores típicos dos compostos do cimento Portland são obtidos através das fórmulas de Bogue (1929), que foram desenvolvidas a partir da obtenção da composição das fases do clínquer, estimadas estequiometricamente a partir de análises químicas.

Outros elementos como água (H₂O) e gás carbônico (CO₂) são representados como H e C respectivamente. Já os produtos resultantes da hidratação do cimento como o silicato de cálcio hidratado e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) são representados por CSH e CH respectivamente (ISAIA, 2011).

O silicato tricálcico (C₃S) é o principal responsável pelo ganho de resistência em todas as idades, principalmente nas primeiras quatro semanas de cura. Já o silicato dicálcico (C₂S) possui mais importância nas idades mais avançadas durante o processo de endurecimento, sendo o responsável pelo ganho de resistência a partir de um ano. O aluminado tricálcico (C₃A) é o principal contribuinte na geração do calor de hidratação, principalmente no período de cura e na resistência durante os primeiros dias. Por fim, o ferroaluminado tetracálcico (C₄AF), que apesar de não agregar contribuição nenhuma para o

desenvolvimento de resistência, é o principal responsável pela rapidez de pega, sendo este fenômeno controlado pela adição de certa proporção de gipsita (BAUER, 2008). A Figura 1 apresenta o desenvolvimento de resistência à compressão de cada composto puro.

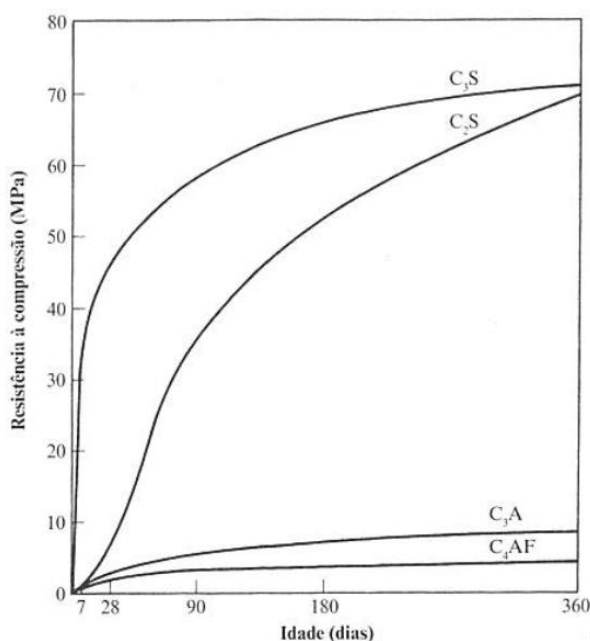


Figura 1 - Desenvolvimento de resistência dos compostos puros
Fonte: Neville e Brooks (2013).

2.1.2 Hidratação do cimento Portland

O cimento Portland só obtém sua propriedade adesiva assim que misturado em água. Isso ocorre devido à reação química conhecida como hidratação do cimento, que permite a formação dos produtos que possuem as características de pega e endurecimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Segundo Hewlett (2004) a hidratação do cimento consiste em uma série de reações químicas entre os elementos que o compõem.

De acordo com Neville e Brooks (2013) os silicatos e aluminatos (C₃S/C₂S e C₃A/C₄AF), na presença de água, se hidratam gerando ao longo do tempo compostos sólidos e resistentes como o silicato de cálcio hidratado (CSH) e o hidróxido de cálcio (CH).

O produto gerado pela hidratação do C₃S é o composto hidratado microcristalino C₃S₂H₃ havendo a liberação da cal na forma cristalina. O C₂S se comporta de maneira análoga, apenas gerando menor quantidade da cal na

reação. Os silicatos de cálcio hidratado são descritos como CSH, sem apresentarem os valores dos índices, visto que sua estrutura varia conforme a relação água/cimento, temperatura, e idade de hidratação (NEVILLE e BROOKS, 2013).

A etringita ($C_6AS_3H_{32}$) e o monossulfato (C_4ASH_{18}) são produtos formados durante a hidratação do aluminato tricálcico (C_3A) e do ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A Figura 2 apresenta de maneira esquemática os elementos constituintes até os produtos de hidratação final do cimento Portland.

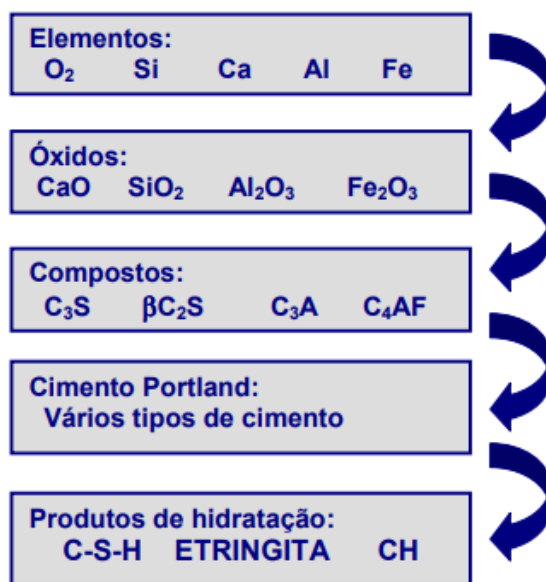


Figura 2 - Representação esquemática da formação à hidratação do cimento Portland
Fonte: Neville e Brooks (2013).

De acordo com Neville (1997) as reações estequiométricas aproximadas de hidratação que ocorrem no cimento Portland podem ser descritas como apresentada nas Equações 1 e 2 para os silicatos e nas Equações 3, 4 e 5 para os aluminatos.

a) Hidratação dos Silicatos de cálcio (C_3S e C_2S):

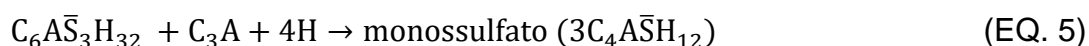
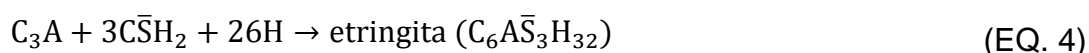


Nota-se que ambos necessitam quase da mesma quantidade de água (H) para se hidratar, porém, o primeiro gera cerca de três vezes mais hidróxido de cálcio (CH) que o segundo.

b) Hidratação dos Aluminatos de cálcio (C₃A) (HEWLETT, 2004):



Na presença de sulfatos:



As reações resultantes do processo de hidratação do cimento Portland são reações exotérmicas, ou seja, ocorre liberação de calor. A quantidade desse calor liberado é em função da composição e da finura do cimento. Pode-se então definir calor de hidratação como uma quantidade de calor que é liberada por grama de cimento até a hidratação completa sob determinada temperatura (NEVILLE E BROOKS, 2013).

2.1.3 Tipos de cimento Portland

Mehta e Monteiro (1994) discorre que ao se conhecer as reatividades relativas e os produtos de hidratação, é possível produzir cimentos conforme necessidade desejada, com características especiais, trazendo como exemplos: cimentos especiais de alta resistência inicial, de baixo calor de hidratação, de alta resistência ao sulfato e moderado calor de hidratação ou moderada resistência ao sulfato.

Após passar pelo processo de hidratação, cimentos com características distintas em suas propriedades químicas, irão resultar em materiais com propriedades distintas (NEVILLE e BROOKS, 2013). As principais mudanças nos tipos de cimentos ocorrem, principalmente, devido às quantidades de clínquer e tipos de adições minerais utilizadas na mistura, conforme ilustra a Figura 3.

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos Componentes (%)			
			Clínquer + gipsita	Escória	Pozolana	Filer calcário
Comum	CPI	25, 32, 40	100	0		
Comum com Adição	CPI-S	25, 32, 40	99-95	1-5		
Composto com Escória	CP II-E	25, 32, 40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com Pozolana	CP II-Z	25, 32, 40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Filer	CP II-F	25, 32, 40	94-90	0	0	6-10
Alto-Forno	CP III	25, 32, 40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CP IV	25, 32	85-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25, 32, 40	-			
Baixo Calor de Hidratação	BC	25, 32, 40				
Branco Estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

Figura 3 – Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil
Fonte: Isaia (2011).

Pode-se notar, que a variação que ocorre entre um tipo de cimento e outro é a quantidade de adição que é incorporada ao teor de clínquer+gipsita. Os cimentos de alta resistência inicial (CPV-ARI) são compostos quase que com 100% de clínquer+gipsita, sendo permitida a incorporação de até 5% de filer de calcário. Nos cimentos Pozolânicos (CPIV), o teor de clínquer é menor, estando entre 45 a 85%, entretanto é permitido um acréscimo de até 5% de filer de calcário e também incorporação de 15 a 50% de adições pozolânicas.

2.1.4 Influência da porosidade na resistência mecânica em concretos à base de cimentos Portland

De acordo com Bauer (2008) o concreto é um material poroso e essa porosidade ocorre por diversas razões que geralmente estão relacionadas à hidratação do cimento, como a perda de água livre pela evaporação, e falhas de execução por falta de adensamento (vazios de concretagem). Diferentes tipos de vazio são gerados nas pastas de cimento, o que influencia diretamente suas propriedades.

Dentre os tipos de vazio pode-se citar os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta, com formato irregular, chamados vazios

capilares e o ar incorporado e aprisionado, que apresentam poros com formato esférico (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Mehta e Monteiro (1994) ainda tratam de outro fator que gera vazios nas pastas de cimento: a água aprisionada na pasta endurecida. Está se classifica de acordo com a facilidade ou dificuldade que pode ser removida (Figura 4):

- a) Água capilar: Presente nos vazios maiores que 50 Å, que pode ser descrita como a água livre dentro do concreto. Lembrando que 1 ângström (Å) equivale a 10^{-10} metros.
- b) Água adsorvida: Que está próxima à superfície do sólido, sob a influência de forças de atração. As moléculas da água estão fisicamente adsorvidas na superfície dos sólidos na pasta. A perda dessa água é a principal responsável pelo fenômeno de retração da pasta na secagem.
- c) Água interlamelar: Associada à estrutura do CSH, também conhecida como água gel.
- d) Água quimicamente combinada: Parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados do cimento

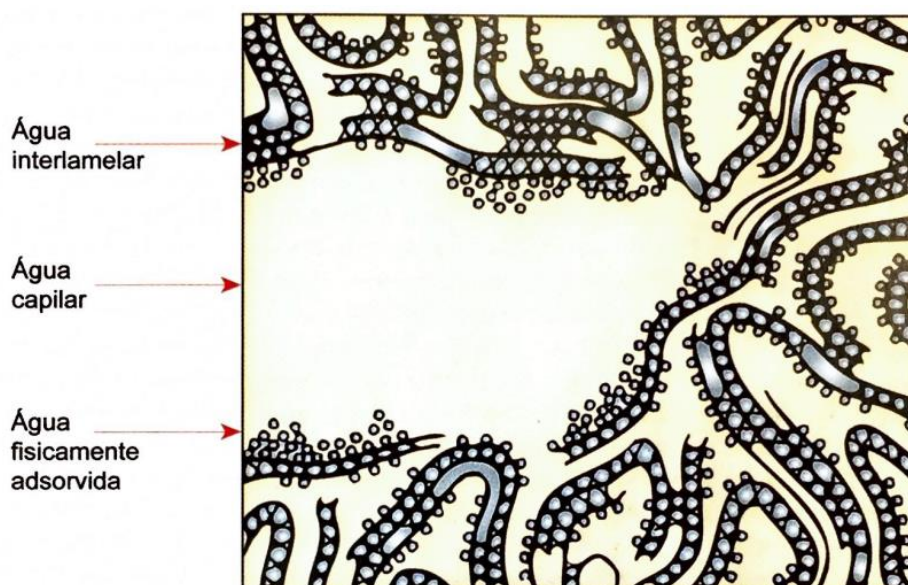


Figura 4 – Representação dos tipos de água livre na pasta de cimento
Fonte: Mehta e Monteiro (1994).

Neville e Brooks (2013) representam através da Figura 5 as proporções volumétricas dos constituintes das pastas de cimento antes e durante a hidratação do cimento.

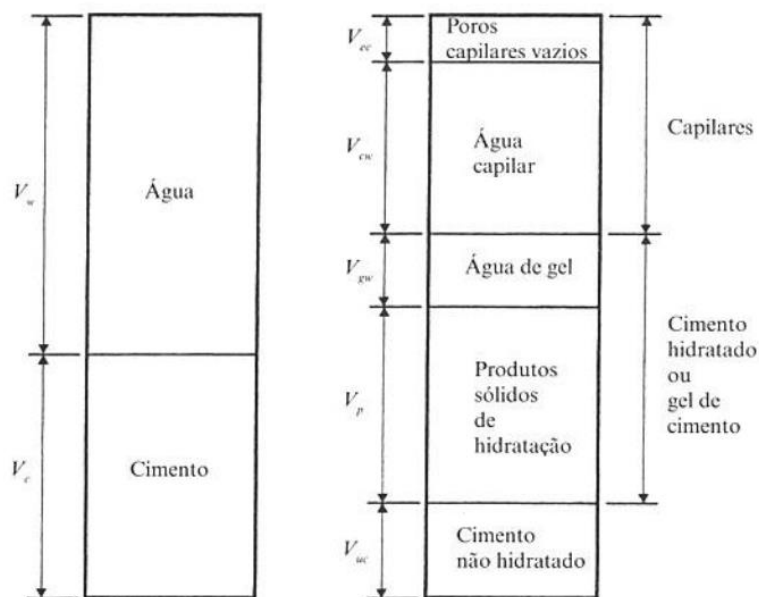


Figura 5 - Representação esquemática das proporções volumétricas: antes e durante a hidratação (à esquerda e à direita respectivamente)

Fonte: Neville e Brooks (2013).

Sabe-se que há uma relação inversamente proporcional entre a porosidade e a resistência, já que a resistência se baseia na parte sólida do material, o que torna os vazios um fator prejudicial no desempenho quanto ao ganho de resistência (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Ainda de acordo com Metha e Monteiro (1994):

“Não é a porosidade total, mas a distribuição do tamanho dos poros que controla efetivamente a resistência, a permeabilidade, e as variações de volume em uma pasta de cimento endurecida. A distribuição do tamanho dos poros é afetada pela relação água/cimento, e pela idade (grau) de hidratação do cimento. Os poros grandes influenciam principalmente a resistência à compressão e a permeabilidade; os poros pequenos influenciam mais a retração por secagem e a fluência”.

Concretos submetidos à carbonatação tendem a apresentar um ganho de resistência na camada superficial, devido redução dos poros nessa região oriundos da precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) no interior desses poros. Estudos realizados por Martins *et al.* (2014) apontam um aumento da resistência à compressão superficial em concretos de relação água cimento 0,45, 0,55 e 0,65 de 50, 60 e 160% respectivamente após o processo de carbonatação.

2.2 CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

De acordo com Possan (2010), um dos principais fatores responsáveis pela limitação da vida útil das estruturas de concreto é o fenômeno da carbonatação. Ocorre naturalmente em estruturas de concreto expostas ao ambiente, sujeitas à ação de intempéries em determinada condição de umidade (SILVA, 2007).

A carbonatação é um fenômeno natural que resulta de um processo físico-químico que ocorre quando gases ácidos presentes no ambiente, como o gás sulfídrico (H_2S), dióxido de enxofre (SO_2) e principalmente o gás carbônico (CO_2), entram em contato com os produtos alcalinos do concreto, gerados durante o processo de hidratação (KULAKOWSKI, 2002), através de um processo de dissolução/precipitação que forma um produto final à base de carbonato e gel de sílica (JUNIOR, 2014).

O processo de carbonatação recebe esse nome devido à ocorrência de uma reação de neutralização do hidróxido de cálcio (CH) pelo CO_2 que resulta no carbonato de cálcio ($CaCO_3$) como produto final, isto é, transformação de um hidróxido alcalino em um sal de baixa solubilidade. Ainda neste processo, ressalta-se que os produtos consumidos pelos gases, responsáveis por esse fenômeno, são o sódio (Na), potássio (K), silicatos alcalinos e principalmente o cálcio (Ca), que após processo de hidratação se tornam hidróxidos de: sódio (NaOH), potássio (KOH) e cálcio ($Ca(OH)_2$) respectivamente (CADORE, 2008).

Os hidróxidos dissolvidos na fase aquosa ou precipitados, geram um ambiente alcalino no concreto, resultando no elevado pH da solução do poro contida na pasta de cimento. Portanto, ao serem consumidos no processo de carbonatação, ocorre uma redução significativa no pH desta solução (CASCUDO e CARASEK, 2011 *apud* FERREIRA, 2013), que conforme Mehta e Monteiro (1994) normalmente apresenta valores iguais ou superiores a 12,5 e após passar por esse processo, passa a atingir valores inferiores a 8,5.

Pauletti (2009) discorre que essa redução da alcalinidade não traz problemas ao concreto por si só, desde que não haja a carbonatação do CSH, porém, no concreto armado pode ser comprometedora. Este é um dos principais fatores responsáveis pela iniciação da corrosão das armaduras, entretanto, é um fenômeno que felizmente ocorre em uma velocidade bastante lenta e se

enfraquece ao longo do tempo, devido barreira superficial que vai sendo formada a partir da superfície (ISAIA, 2011).

Pauletti (2009) ainda descreve as reações de carbonatação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ilustrada através da Figura 6.

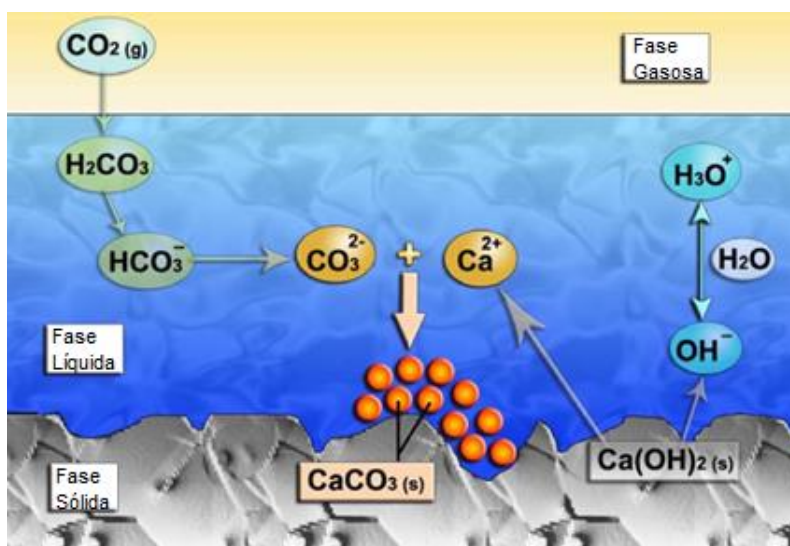
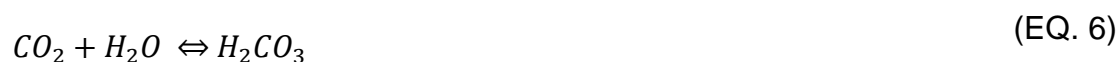
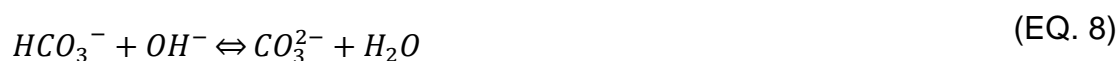


Figura 6 - Carbonatação do hidróxido de cálcio.
Fonte: Thiery (2005, p 10.), adaptado pelo autor.

Segundo Pauletti (2009) inicialmente ocorre a difusão do gás carbônico na fase gasosa dos poros e em seguida ocorre a dissolução na água presente nos poros, resultando na formação do ácido carbônico (Equação 6).



O ácido carbônico possui um comportamento de diácido fraco na água, que dissolve-se em duas fases (Equação 7 e 8).



Quando o CO_2 passa pelos processos apresentados nas Equações 6, 7 e 8, resultando numa solução, ocorre uma redução dos íons OH^- na solução livre,

intersticial do poro, que causa a redução do pH. Isaia (2011) aponta que o pH da solução do poro, após a ação do CO_2 , resulta em um valor menor ou igual a 8,5.

Ao mesmo tempo, íons OH^- e Ca^{2+} são formados na solução do poro proveniente da reação do hidróxido de cálcio com a água livre nos poros, ou, resultantes da decomposição do silicato de cálcio hidratado (CSH) e das fases aluminato (TAYLOR, 1997). A fim de retomar a alcalinidade do meio, acontece a dissolução do hidróxido de cálcio na água presente nos poros (Equação 9), ocorrendo a difusão do hidróxido de cálcio dissolvido das regiões com alcalinidade elevada para as de menor alcalinidade.



A Equação 10 representa a reação entre o CO_2 dissolvido e o hidróxido de cálcio dissolvido, resultando na precipitação do carbonato de cálcio.



Pauletti (2009) apresenta ainda a reação da carbonatação do hidróxido de cálcio simplificada, mostrada na Equação 11.



Salienta-se que as reações de carbonatação só ocorrerão em presença de umidade. Como a difusão de gases em meio aquoso é muito mais lenta que no ar, nos poros saturados essa difusão será desprezível (Figura 7).

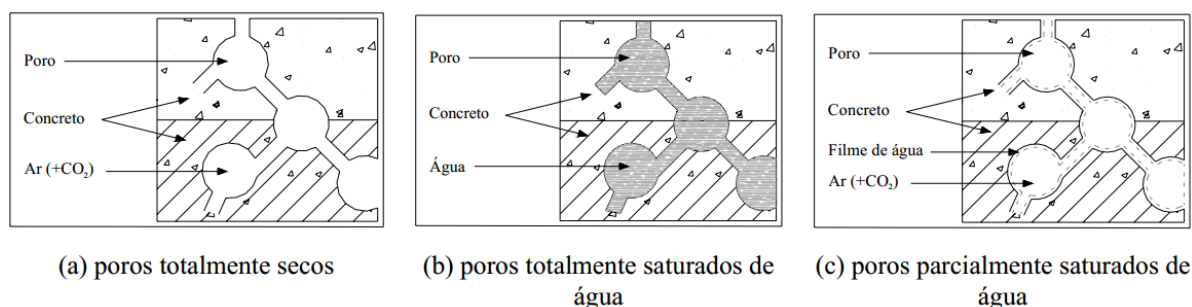


Figura 7 – Representação esquemática da difusão do CO_2
Fonte: Bakker (1988, p.29)

Concretos com elevados teores de adições minerais, devido ao baixo teor de Ca(OH)_2 , podem levar à carbonatação do CSH, em que inicialmente ocorre uma descalcificação, que diminui a relação Ca/Si, tendo como produto gerado dessa iteração um gel de sílica bastante poroso (FERREIRA, 2013).

Outros compostos que também estão suscetíveis à carbonatação são os aluminatos e os álcalis de sódio e de potássio presentes nas pastas de cimento, entretanto, destaca-se que como o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), dentre os produtos é o mais solúvel, assim como é o que reage mais rápido com o gás carbônico, tendo maior relevância e importância no processo de carbonatação (ISAIA, 2011).

Ferreira (2013) discorre que no processo de carbonatação além da redução da alcalinidade do concreto, também podem ocorrer a formação de fissuras devido formação de novos produtos, com conseqüente alteração da estrutura dos poros, o que torna importante a associação dos estudos da carbonatação e porosidade. Devido à precipitação do CaCO_3 no interior do poro, ocorre uma redução da porosidade total na pasta do cimento (NGALA e PAGE, 1997 *apud* CADORE, 2008).

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA PROFUNDIDADE E VELOCIDADE DA CARBONATAÇÃO

A velocidade de penetração da frente de carbonatação é determinada basicamente por fatores que estão representados esquematicamente na Figura 8.

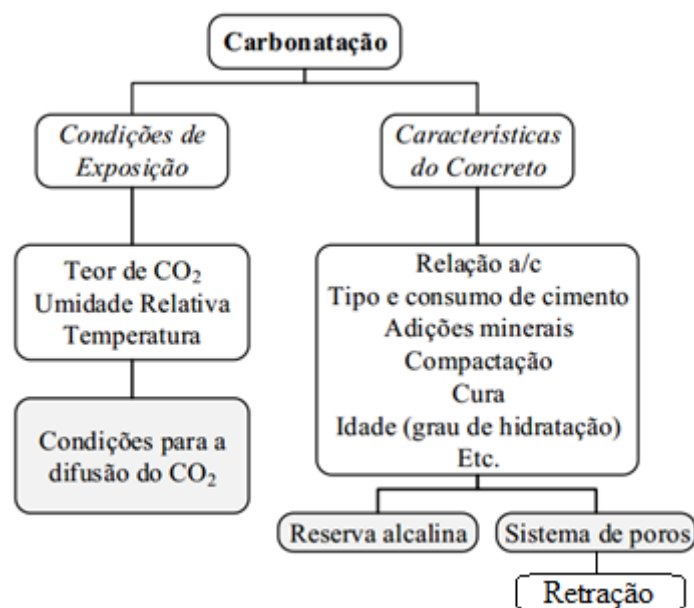


Figura 8 – Fatores intervenientes na carbonatação do concreto.
 Fonte: Pires (2016), adaptado pelo autor.

2.3.1 Condições de exposição ambiental

Para Possan (2004) a condição de exposição do material suscetível à carbonatação, seja ele ambiente interno ou externo, protegido ou desprotegido da chuva, apresenta considerável influência, já que o material que permanece abrigado da chuva carbonata mais rápido do que os materiais desprotegidos, devido à vedação dos poros pela água da chuva, impedindo a difusão do gás.

Os principais fatores responsáveis pelo fenômeno de carbonatação do concreto é o teor de CO₂ no ar, umidade relativa do ar e temperatura do ambiente (ISAIA, 2011).

a) Teor de CO₂ no ar

De acordo com Cadore (2008), a velocidade de carbonatação e sua durabilidade relaciona-se diretamente com a concentração de CO₂ presente na atmosfera, portanto, aumenta-se a velocidade de carbonatação à medida que aumenta-se a concentração de CO₂.

Possan (2010) relaciona em sua pesquisa as concentrações de CO₂, de acordo com cada ambiente, adotadas por cada autor ao longo dos últimos anos de pesquisa (Figura 9). Nota-se que há um certo consenso entre os autores quanto a alguns ambientes, como por exemplo em zona rural, porém, este

consenso não é notado quando observa-se em relação a zona urbana, visto que esse fator varia de cidade para cidade, região para região.

Local	Teor médio (%)	Pesquisador
Ambiente normal*	0,033	Da Silva (1998)
Ambiente normal*	0,030 a 0,050	Papadakis et al. (1989)
Campo Aberto	0,015	Saetta e Vitaliani (2004)
Estábulo	0,075	Saetta e Vitaliani (2004)
Estábulo ventilado	0,046	Saetta e Vitaliani (2004)
Laboratório não ventilado	> 0,100	Neville (1997)
Laboratório (sala climatizada)	0,088	Pauletti (2009)
Túneis	0,100 a 0,300	Parrot (1987)
Zona industrial	0,045	Saetta e Vitaliani (2004)
Zona rural	0,030 a 0,050	Helene (1993)
Zona rural	0,035%	Papadakis e Efstathiou (2006)
Zona rural	0,030	Neville (1997)
Zona rural	0,0325	Schiessl (1976)
Zona rural	0,03	Khunthongkeaw, et al. (2006)
Zona rural	0,033	Tuutti (1982)
Zona urbana	0,036	Saetta e Vitaliani (2004)
Zona urbana	0,100	Tuutti (1982)
Zona urbana	0,08	Papadakis e Efstathiou (2006)
Zona urbana	0,006	Khunthongkeaw, et al. (2006)
Zona urbana, grandes centros	0,100	Schiessl (1976)
Zona urbana, grandes cidades	0,300	Neville (1997)
Zona urbana, Madrid, Espanha	0,033 a 0,058	Da Silva (1998)
Zona urbana, margens do rio Rin, Alemanha	0,0434 a 0,0542	Schiessl (1976)
Zona urbana, região de Munich, Alemanha	0,0325 a 0,0434	Schiessl (1976)
Zona urbana, tráfego intenso	0,1 a 1,20	Helene (1993)
Zona Urbana, Grande Porto Alegre, RS	0,063	Pauletti (2009)
Zonas agressivas	1,000	Tuutti (1982)

* pode ser considerado um ambiente rural ou uma cidade com baixa taxa de poluição atmosférica.

Figura 9 – Teor médio das concentração de CO₂ conforme alguns ambientes
Fonte: Possan (2010)

b) Umidade relativa do ar

Este fator é o que determina o grau de saturação dos poros do concreto, o que condiciona a velocidade de difusão do CO₂. Conforme a umidade presente nos poros do concreto, poderá haver distintas situações de carbonatação (CADORE, 2008).

Estudos realizados por Papadakis *et al.* (1992 *apud* ISAIA, 2011) apresentam graficamente (Figura 10) os resultados de experimentos em concretos submetidos a variadas condições de umidade e nota-se que as maiores profundidades de carbonatação acontecem sob umidade relativa do ambiente entre 50 e 65%.

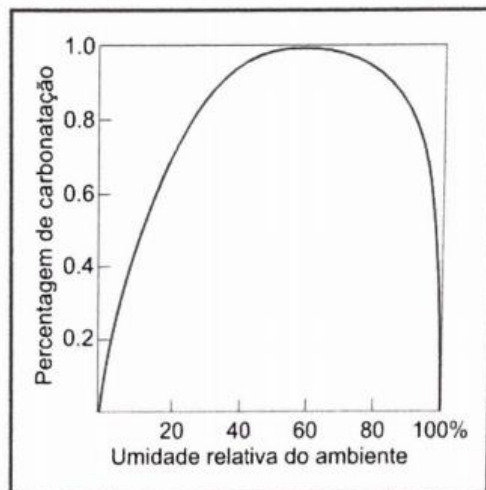


Figura 10 - Grau de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente.
Fonte: Isaia (2011, p. 857.)

Meyer (1969, *apud* POSSAN, 2004) representou graficamente a influência da umidade, conforme condição de exposição do material sujeito à carbonatação (Figura 11), onde: 1 – representa concreto constantemente submerso ou em ambiente úmido; 2 – superfícies externas horizontais de concreto em clima úmido; 3 – concreto em ambiente externo desprotegido da chuva e da neve; 4 – concreto em ambiente interno exposto ao ar ou em ambiente externo protegido da chuva e da neve.

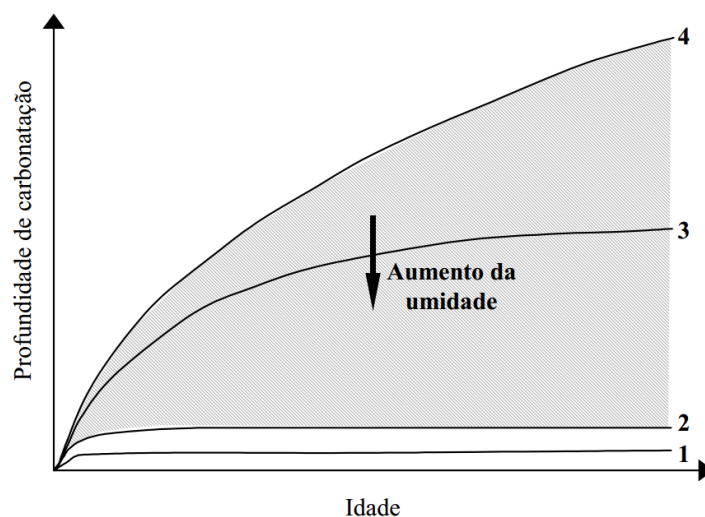


Figura 11 - Efeito das condições de exposição na carbonatação
Fonte: Meyer (1969, *apud* POSSAN, 2004, p.40) adaptado pelo autor.

c) Temperatura

Para Isaia (2011) esse fator é conhecido por possuir ação catalizadora de reações químicas, que normalmente resulta numa aceleração da reação

conforme aumenta-se a temperatura. Estudos realizados por Roy *et al.* (1996 *apud* KULAKOWSKI, 2002) mostram diferenças consideráveis na profundidade da carbonatação de concretos semelhantes em Singapura, que possui temperatura média de cerca de 28°C, e do Reino Unido e Europa em geral que possui temperatura média de cerca de 8°C. A profundidade de carbonatação em Singapura chegou a ser 70% maior.

Kulakowski (2002) discorre que o efeito da temperatura na carbonatação parece não ser tão significativo sob temperaturas habituais entre 20 e 40°C. Entretanto, Andrade (1992, *apud* PAULETTI, 2009) alerta que apesar de não ser um fator tão determinante na velocidade de carbonatação, não deve ser desprezado, já que é um fator importante quando se trata de estudos relacionados à corrosão por efeito da carbonatação.

2.3.2 Características do concreto

De acordo com Isaia (2011) os principais fatores que são determinantes e que influenciam diretamente na carbonatação, devido às características do concreto, são a relação água/cimento, o tipo e consumo de cimento, as adições minerais, compactação, cura e idade (grau de hidratação). Estes serão abordados individualmente na sequência.

a) Tipo de cimento

A velocidade da frente de carbonatação ocorre em função da composição química do cimento (Item 2.2.1), visto que o avanço é proporcional à reserva alcalina disponível na matriz cimentícia da pasta. A composição química será a responsável pela quantidade total de álcalis disponível para as reações de neutralização (ISAIA, 1999). Os compostos alcalinos disponíveis para reagir com o CO₂ dependerão do tipo de cimento que será utilizado (CADORE, 2008).

Cadore (2008) aponta que o cimento Portland comum possui maior reserva alcalina que cimentos com adições minerais, dessa forma, nas pastas de cimento Portland sem adições a difusão do CO₂ ocorre a uma velocidade bem baixa, já que o gás necessita reduzir o pH e reagir com o Ca(OH)₂ presente (em maior quantidade) para conseguir avançar e consumir o Ca(OH)₂.

Bakker (1988) relata que a carbonatação tenderia a avançar até consumir todo $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente no concreto, porém, isso não ocorre porque a rede de poros vai se reconfigurando ao longo do tempo, formando uma barreira física que limita o avanço da carbonatação.

b) Adições minerais

De acordo com Neville (1997) as adições minerais são capazes de reduzir os poros capilares da pasta de cimento, gerando um refinamento dos poros. Entretanto, segundo Kulakowski (2002), elas também podem contribuir no aumento da velocidade da carbonatação, devido redução da reserva alcalina. Isso ocorre por conta do consumo do hidróxido de cálcio proporcionado pelas adições, ou seja, há uma redução do hidróxido de cálcio que sobra da reação e outros álcalis, fazendo com que aumente-se a profundidade de carbonatação ao longo do tempo quando comparado com concretos sem adições (TASCA, 2012).

Venquiaruto *et al.* (2001) constatou em seu estudo maiores profundidades carbonatadas em concretos com maiores teores de adições e maiores relações água/cimento. Osborne (1986), citado por Kulakowski (2002), observou em seus estudos que essa redução do hidróxido de cálcio acaba expondo e deixando vulnerável outros produtos do concreto à carbonatação, dentre eles o CSH, resultando-se em um gel de sílica poroso.

Segundo Mehta e Monteiro (1994, p306):

“Algumas adições minerais são pozolânicas (como a cinza volante de baixo teor de cálcio), algumas cimentantes (como a escória granulada de alto-forno, enquanto outras são tanto cimentantes quanto pozolânicas (como as cinzas volantes com alto teor de cálcio)”.

Mehta e Monteiro (1994) ainda definem adições minerais pozolânicas como sendo um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, porém, quando finamente pulverizada e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes, formando novos compostos com propriedades cimentantes, dentre eles o CSH.

De acordo com Pauletti (2009), apesar dessa possível contribuição para o aumento da carbonatação, o uso de adições melhora a compacidade, diminui a penetração de líquidos, gases e íons, que por fim pode acabar trazendo mais benefícios do que prejuízos.

c) Relação água/cimento

A principal influência do fator água/cimento é relacionada à formação dos poros (continuidade, quantidade e tamanho) na pasta do cimento endurecida, visto que possui influência direta no desenvolvimento e profundidade da carbonatação (SILVA, 2007), sabendo-se que o fluxo para percolação do fluido ocorre entre os poros capilares interconectados (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Quanto maior for o tamanho médio e a interconectividade entre estes, mais fácil se tornará a difusão do CO₂. Ou seja, quanto maior a relação água/cimento, maior a porosidade do material, mais facilidade os agentes agressivos terão de penetrar-se, contribuindo para o aumento da velocidade da frente de carbonatação (PARROT, 1987).

d) Metodologia de execução

Kulakowski (2002) relata que um fator de grande importância relacionado a durabilidade é a qualidade de execução do concreto, que está relacionada basicamente ao processo de compactação e de cura. Problemas durante o processo de compactação podem acarretar em falhas como ninhos de concretagem, excesso de ar aprisionado e alterações na porosidade que acabam facilitando a penetração e propagação da frente de carbonatação.

O procedimento de cura trata-se do intervalo de tempo necessário para ocorrer as reações iniciais de hidratação do cimento e endurecimento. Portanto, é necessário que haja água suficiente em tempo adequado para que essas reações de hidratação ocorram (CADORE, 2008).

Para Tasca (2012) a cura é capaz de influenciar diretamente na hidratação e na formação da microestrutura do concreto. Quanto maior o grau de hidratação do cimento, mais densa será a matriz e menor a taxa de penetração dos agentes agressivos.

Tasca (2012) ainda destaca que quando se trata da carbonatação, ao se utilizar adições minerais no concreto é recomendado realizar cura por um período mais prolongado, pois proporcionará um desenvolvimento melhor das reações pozolânicas e refinamento dos poros da estrutura.

2.3.3 Mecanismos de transporte do CO₂ para o interior do concreto

O processo de carbonatação ocorre da superfície para o interior do concreto de modo gradativo e é denominado “frente de carbonatação”, que está diretamente relacionada com a facilidade que o CO₂ tem de se propagar para o interior do concreto (POSSAN, 2004).

De acordo com Tasca (2012), o dióxido de carbono e os íons de cloreto são alguns dos principais agentes agressivos do concreto. Estes são capazes de se penetrar ao interior da estrutura através da configuração dos poros da matriz cimentícia, portanto, quanto mais poroso for o material mais facilidade esses agentes possuem de se infiltrar ao interior do concreto.

Os mecanismos de transporte são os processos que controlam o ingresso desses agentes. Dentre estes destacam-se a permeabilidade, a absorção capilar, a difusão de íons e gases e a migração de íons, podendo ocorrer uma interação entre estas, agindo concomitantemente (POSSAN, 2010). A partir da Figura 12 percebe-se que, exceto a migração iônica, todos são influenciados pelas características do poro, como tamanho, continuidade e estrutura.

Tasca (2012) relata que o principal mecanismo responsável pela entrada do CO₂ no interior do concreto é a difusão, ou seja, ocorre a movimentação natural de um gás através do outro, ocorrendo um espalhamento no meio gasoso. Dessa forma, são adsorvidas as moléculas de CO₂ nas paredes da estrutura de poros. Pauletti (2004, p.40) ainda traz que a difusão é “o fenômeno de transporte de massa através de um fluido por efeito de gradientes de concentração”.

A estrutura estará vulnerável à ação dos mecanismos de deterioração a partir da penetração dos agentes agressivos, que podem comprometer o concreto e a armadura (POSSAN, 2010).

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 dos 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 ^{1/2})	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 12 - Resumo dos principais mecanismos de transporte de gases
 Fonte: Possan (2010, p.71)

2.4 MÉTODOS DE ENSAIOS DA CARBONATAÇÃO

Os métodos mais comuns e usuais de medidas e de previsão da carbonatação são relacionados ao ensaio natural e acelerado.

No método natural, verifica-se o comportamento do concreto exposto ao ambiente atmosférico, simulando o efeito sobre uma estrutura em condições normais de exposição. O método acelerado, como o próprio nome sugere, acelera-se o processo de carbonatação em laboratório, através de um ambiente mais agressivo que o natural sob condições controladas (TASCA, 2012).

Os ensaios de carbonatação acelerada são amplamente utilizados pelos pesquisadores a fim de verificar o comportamento do material cimentício diante do fenômeno da carbonatação, entretanto, ainda não existe uma padronização ou normatização desses ensaios, podendo ser realizados com diferentes temperaturas, condições de umidade relativa, tempo de exposição e concentração de CO₂ do ambiente (KULAKOWSKI, 2002).

Trata-se de um ensaio de laboratório realizados em câmaras condicionadas com atmosfera rica em CO₂, com umidade e temperatura controladas (TASCA 2012). Para Pauletti (2009) esses ensaios têm como objetivo simular a evolução das reações da carbonatação, averiguando e controlando as condições ideais a fim de se obter resultados no menor intervalo de tempo possível. Ainda segundo a autora, a maior dificuldade de comparar os estudos que se tem é principalmente devido ao fato que cada autor julga e escolhe o método, assim como limita as condições em que trabalhará.

Há uma quantidade bem limitada de estudos na literatura relacionadas à carbonatação natural. Isso devido, principalmente, ao tempo necessário para obtenção dos resultados. A principal razão que leva pesquisadores a verificar o comportamento da carbonatação natural ocorre devido a necessidade de se conseguir dados confiáveis para correlacionar com dados de estudos desse fenômeno acelerado, determinando parâmetros capazes de prever o tempo necessário para alcançar determinada profundidade na realidade (PAULETTI, 2009).

Muntean *et al.* (2005) afirmam que não basta apenas extrapolar os ensaios acelerados aumentando apenas as concentrações de CO₂ a fim de se obter o efeito de ambiente natural. Os autores também lamentam o fato de haver escassa bibliografia sobre o tema.

De acordo com Kobuku e Nagataki (1989 *apud* TASCA, 2012) as reações que ocorrem em virtude da difusão do CO₂ nos poros com os compostos alcalinos da pasta de cimento são lentas em ambientes que possuem baixa concentração de CO₂. Dessa forma, acaba não sendo viável o tempo de espera para verificar a velocidade real da carbonatação, que segundo o autor pode levar até 20 anos. Na literatura nacional o maior tempo de exposição de concretos submetidos à carbonatação natural encontrado foi de 10 anos e realizado por Ferreira (2013).

Possan (2004) apresenta as principais vantagens e desvantagens dos ensaios de carbonatação natural. Como vantagens tem-se a interação real com o meio agressivo, exposição às intempéries e a possibilidade de avaliação da degradação devido efeito dos agentes agressivos. Como desvantagem, pode-se citar os componentes e os materiais que não são testados nas configurações de uso, o que dificulta a correlação com as condições reais de serviço; não representam a variação das condições de exposição; não consideram também os fatores de uso, e por fim o período de tempo necessário para obtenção de dados confiáveis.

A ASTM E-632 aborda o fato de que deve-se correlacionar os dados obtidos através de ensaios acelerados com estruturas reais ou com ensaios de degradação natural, ou, utilizar-se de ensaios não acelerado.

2.4.1 Relação entre o ensaio acelerado e o natural

Tasca (2012) apresenta em sua pesquisa as relações entre ensaios naturais e acelerados realizados por Isaía, Veghetti e Gastaldini (2001), onde os concretos permaneceram em cura por 28 dias e na sequência foram submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada e à carbonatação natural, expostos pelo período de 0,5, 1 e 2 anos condicionados no ambiente de laboratório. Os autores encontraram uma correlação entre o ensaio natural e o acelerado através da equação (Equação 12) proposta por Tuutti (1982), em que x_c é a profundidade

de carbonatação (mm), K é um coeficiente ($\text{mm.semana}^{-0,5}$) e t o tempo em semanas.

$$e_c = K_{CO_2} \sqrt{t} \quad (\text{EQ. 12})$$

Os valores obtidos através dessa correlação foi de um coeficiente na ordem de: $1,0 \text{ mm.semana}^{-0,5} = 1,0 \text{ mm.ano}^{-0,5}$ para concretos com relação água/aglomerante inferiores a 0,45 e com teores de substituição de cimento de até 25%, ou seja, a profundidade encontrada em 1 semana do ensaio acelerado, levou 1 ano para ser encontrada no ensaio natural. Nos concretos com maiores relações água/cimento e com maiores quantidades de pozolana (50%), encontrou-se valores médios na ordem de 3,6 vezes maiores nos ensaios de carbonatação acelerada em relação ao natural.

Pauletti (2009) traz em seu estudo resultados referentes à pesquisa de Ho e Lewis (1987) que expuseram concretos para ensaios de carbonatação natural em laboratório, com temperatura de 23°C e umidade relativa de 50%, assim como em ambiente externo não protegido de intempéries. Os autores notaram que a profundidade de carbonatação após 1 ano no laboratório, equivale a 1 semana em câmaras com 4% de CO_2 . E como esperado, as amostras que permaneceram no laboratório obtiveram maior carbonatação que as que permaneceram no ambiente externo desprotegido.

Possan (2004) também mostra em sua pesquisa os resultados de carbonatação em concretos com e sem adição de sílica ativa, condicionado em ambiente externo não protegido das intempéries durante sete anos que foi realizado por Kulakowski (2002) e Vieira (2003). Estes utilizaram fator água/aglomerante de 0,30, 0,45 e 0,8, destes, apenas o último fator apresentou camada carbonatada. Ao relacionar os resultados dessa pesquisa com ensaios acelerados, adotando 5% de CO_2 e umidade relativa de 70%, verificou-se que para 14 semanas de ensaio acelerado equivale a 8,3 anos de exposição natural, sob essas condições, para concretos a base de cimento Portland CP V (sem adições) e 9,5 anos para concretos com adição de 20% de sílica ativa.

Pauletti (2009) desenvolveu em sua pesquisa tabelas (Anexo I) que apresentam de maneira resumida os principais dados e metodologias utilizadas

nos estudos de carbonatação no Brasil e no mundo, em um período entre 1982 e 2008.

Percebe-se que ampla é a investigação da carbonatação em materiais cimentícios, entretanto ainda não existem uma padronização para a execução dos ensaios, ficando a critério de cada autor determinar os parâmetros utilizados em cada pesquisa, que mostra a grande dificuldade existente em se correlacionar esses dados de modo que se possua considerável grau de confiabilidade.

É impossível diferenciar se os resultados obtidos são consequentes das características dos materiais ou dos métodos utilizados, tal dificuldade explica algumas lacunas que existem no entendimento do fenômeno (PAULETTI, 2009).

Baroghel-Bouny *et al.* (2008 *apud* TASCA, 2012) traz uma consideração importante sobre a correlação dos ensaios naturais com os acelerados. Às modificações devido às reações que ocorrem na microestrutura nos ensaios acelerados não são as mesmas que ocorrem no material naturalmente. Existem modificações estruturais quando se utiliza altos teores de CO_2 , havendo formação de uma capa de CaCO_3 envolta aos cristais de Ca(OH)_2 impossibilitando a carbonatação total. O autor finaliza citando que só se pode ser avaliada a severidade de um ensaio quando estuda-se a resposta do desempenho para traços de concreto em que se conheça o comportamento “in-situ”, em um período consideravelmente grande de no mínimo 10 anos.

Um tema de grande importância é a correlação entre os ensaios acelerados e ensaios a partir de exposição natural, devido a dificuldade existente em relacionar esses dados fielmente as condições que ocorrem naturalmente (TASCA 2012).

2.5 RETRAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A retração trata de uma redução volumétrica nas pastas de cimento, argamassas e concretos que ocorre principalmente devido à perda por evaporação do excesso de água que não foi consumida durante a hidratação, sem que o material esteja submetido a qualquer tipo de carregamento (SOUZA, 2016).

Amaral (2011) relaciona e descreve de maneira sucinta os tipos de retração, que são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de retração

Tipo de Retração	Característica	Observações
Autógena (química)	Redução macroscópica do volume de materiais cimentícios devido às reações de hidratação do cimento, medidas em ambiente fechado sem alterações climáticas e nem acréscimo de substâncias.	Ocorre antes da retração hidráulica.
Hidráulica (por secagem)	Redução do volume devido à secagem (perda de água para o ambiente) do material.	Depende diretamente do tamanho do poro. O processo de secagem é longo e difícil de determinar, experimentalmente, quando o elemento estará totalmente seco.
Plástica	Redução do volume pela superioridade da taxa de perda de água da superfície do elemento em relação à taxa disponível de água exsudada.	Ocorre antes do endurecimento da pasta de cimento.
Térmica	Redução de volume pelo resfriamento, à temperatura ambiente, do calor liberado pela reação de hidratação do cimento.	Torna-se evidente em elementos com alta espessura, pois, há um grande aumento de temperatura interna (expansão do volume).
Por carbonatação	Redução de volume pela reação do Ca(OH)_2 presente na matriz cimentícia com o CO_2 da atmosfera.	Considerada de baixa magnitude.

Fonte: Amaral (2011), adaptado pelo autor.

Segundo Dellinghausen (2009) a partir do momento que o material permanece em ambientes com umidade relativa menores que 100%, ocorrerá a evaporação da água presente nos poros. Quanto maior a relação água cimento, maior será a retração, visto que esse fator é o que determina a quantidade de água evaporável (NEVILLE, 1997)

Silva (2011) apresenta os mecanismos durante o processo de retração desde a hidratação até a retração total (Figura 13). No concreto ela pode ser dividida em duas fases: a precoce, que ocorre nas primeiras 24 horas, durante o estado plástico e a longo prazo, que ocorre após as 24 horas na fase endurecida (SOUZA, 2016).



Figura 13 - Mecanismo de retração total
 Fonte: Silva (2011)

A autora apresenta que as retrações plásticas e química são consideradas retrações que ocorrem no estado fresco, e as demais ocorrem em idades mais avançadas.

2.5.1 Efeito da retração devido à carbonatação

A partir do momento que o CO_2 é fixado pela pasta de cimento hidratado, formando novos produtos no interior do poro, ocorrerá um aumento de massa, automaticamente, um aumento de concreto. Ao expor o concreto seco ao ambiente, sujeito à carbonatação, este passará a ter um ganho de massa por carbonatação (NEVILLE, 1997).

Entretanto, Neville (1997) aponta que a carbonatação possivelmente é causada a partir da dissolução dos cristais de Ca(OH)_2 , sob tensão resultantes da retração hidráulica, e deposição do CaCO_3 em espaços não sujeitos a tensão, aumentando temporariamente a compressibilidade da pasta de cimento hidratado. “Se a carbonatação ocorre após o estágio de desidratação do CSH, também resulta uma retração por carbonatação” (NEVILLE, 1997, p. 444).

Para Cadore (2008) a água que é liberada durante o processo de carbonatação (Equação 13) é capaz de ajudar na hidratação do cimento, resultando em uma maior dureza superficial, menor permeabilidade superficial reduzindo conseqüentemente a movimentação da umidade.



2.6 MÉTODOS DE MEDIDA DE CARBONATAÇÃO

Existem diversos métodos de ensaios para análise da região carbonatada do concreto, pode-se citar dentre eles: a difração de raios-X, análise térmica diferencial, espectroscopia por infravermelho, termogravimetria, microscopia eletrônica de varredura e indicadores de pH (TASCA, 2012).

Tasca (2012) aponta que os indicadores de pH são mais simples e baratos para execução do ensaio de profundidade. Normalmente, para realizar a leitura e a medição da profundidade de carbonatação através desses indicadores, é necessário diluir o reagente em uma solução e na sequência aspergir sobre a superfície recém fraturada do concreto (KULAKOWSKI, 2002).

Quando a solução entra em contato com a superfície do material, ocorrerá uma mudança de cores entre a região ácida e a região básica, destacando-se da cor natural cinza do concreto (THIERY, 2005). Nas regiões onde o pH é alcalino (pH em torno de 13), em que o CO₂ ainda não atingiu, ocorre a alteração da cor, de acordo com cada reagente, já nas regiões carbonatadas não ocorre alteração de cor (FERREIRA, 2013).

Os indicadores de pH mais usuais nos estudos de carbonatação são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Características dos indicadores de pH

Indicadores	Cores	Ponto de viragem (pH)
Vermelho de cresol	Amarelo - Vermelho	7,2 - 8,8
Fenolftaleína	Incolor - Rosa	8,0 - 9,9
Timolftaleína	Incolor - Azul	9,3 - 10,5
Amarelo de alizarina	Amarelo claro - Amarelo escuro	10,0 - 12,1
Alizarina	Vermelho purpúra	10,1 - 12,1
Azul de Nil	Azul - Vermelho	10,1 - 11,1

Fonte: Pauletti (2009), adaptado pelo autor.

Kazmierczak e Lindenmeyer (1996) citado por Pauletti (2009) apontam que a timolftaleína apresenta profundidades carbonatadas superiores às da fenolftaleína.

Os indicadores mais utilizados para medição da carbonatação na engenharia civil ainda é a fenolftaleína, que, como mostrado, possui ponto de

viragem entre 8 e 9,9 e sabe-se que concretos e argamassas possuem pH na ordem de 12,5. Entretanto não há problema em utilizar-se de outros desses indicadores quando os ensaios forem realizados de forma comparativa (NEVILLE, 1997).

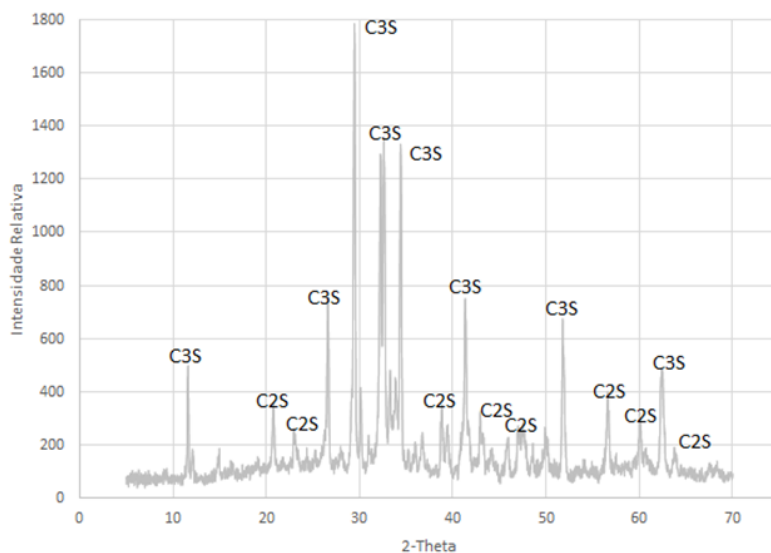
A solução deve ser borrifada na superfície do material assim que ele foi fraturado, evitando o contato da superfície fraturada com o CO₂ do ambiente. Não deve-se serrar, molhar ou deixar material pulverulento na superfície analisada, a fratura deverá ser realizada através de compressão diametral ou percussão (TASCA, 2012).

Tasca (2012) destaca que a leitura da profundidade carbonatada deverá ser realizada através de equipamento com de leitura com precisão de 0,1 mm. Deverá ser tomado pontos para medida e tirar uma média, visto que a carbonatação não é uniforme.

Esse procedimento é normalizado pela RILEM CPC-18 (1998) que descreve o procedimento para o ensaio de medida de carbonatação através da fenolftaleína, o qual será apresentado na metodologia desta pesquisa.

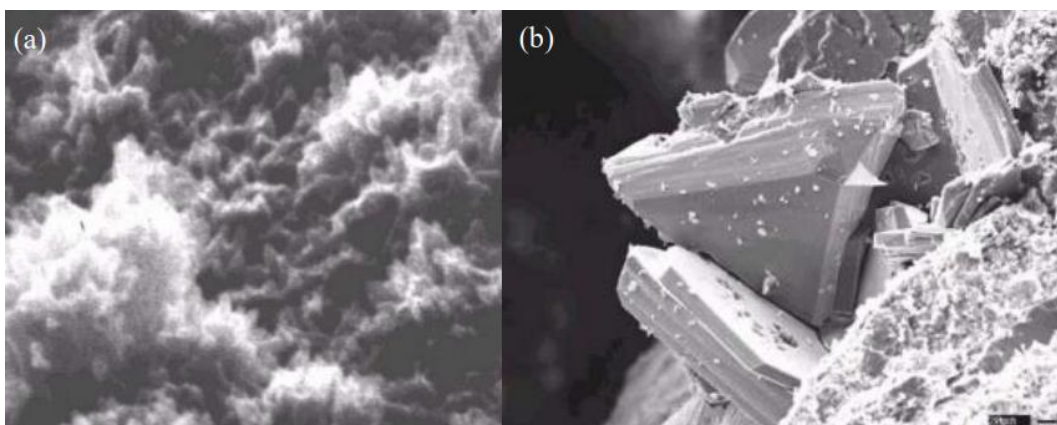
Outros métodos de medição, citados inicialmente, como a difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise térmica diferencial, termogravimetria e a espectroscopia por infravermelho permitem obter-se dados relacionados à caracterização microestrutural e morfológica do material analisado, sendo capaz de apresentar os novos compostos formados depois da amostra passar pelo processo de carbonatação.

Uma das principais técnicas para a caracterização da microestrutura de materiais cristalinos é o DRX, através da interação entre os feixes de raios-X com mesmo comprimento de ondas e mesma ordem dos espaçamentos atômicos com os elétrons dos átomos do material. Esses raios são dispersos em várias direções através desse processo, que são captados por um detector (CALLISTER, 2012 apud GARCIA, 2015). Os resultados desse ensaio são dispostos através de difratogramas (Figura 14), que relaciona o ângulo de difração (Θ) e a intensidade da distância entre os planos que o originou. A identificação dos compostos é realizada por comparação do difratograma da amostra analisada com o banco de dados fornecido pela *International Center for Diffraction Data* (ICDD) (GARCIA, 2015).



**Figura 14 – Exemplo de difratograma de amostra de cimento Portland CPIV-32 RS
Fonte: Cadore (2018).**

O MEV é um tipo de microscópio também utilizado para análise e caracterização de uma amostra. Este pode confirmar os compostos mostrados no DRX através de imagens em alta resolução (GARCIA 2015). A Figura 15 apresenta um exemplo de imagens geradas através do MEV de uma pasta de cimento hidratada sem nenhum teor de adição incorporada.



**Figura 15 – Morfologia do CSH (a) e da Portlandita (b)
Fonte: Lana (2017, p.19).**

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de alcançar os objetivos dessa pesquisa, foram comparados concretos produzidos com cimentos Portland do tipo CP IV-RS e CPV ARI-RS, sendo que o primeiro possui elevado teor de adição mineral em sua composição e o segundo baixo ou nenhum teor, o que possibilitará verificar e comparar a influência das adições minerais na velocidade da carbonatação. Outro fator que foi verificado, capaz de influenciar na velocidade de carbonatação é a porosidade, para isso serão alteradas as relações água/cimento dos concretos utilizados.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland

Foram utilizados para produção dos concretos os cimentos Portland CPIV RS da marca Itambé e o CPV-ARI RS da marca Votorantin, que atendem aos critérios estabelecidos pela NBR 5736 – Cimento Portland pozolânico (ABNT, 1991), NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial (ABNT, 1991) e NBR 5737 – Cimentos Portland resistentes a sulfatos (ABNT, 1992).

Optou-se pela escolha desses dois tipos de cimentos visto que um dos fatores que contribuem com o desenvolvimento da carbonatação, de acordo com a literatura, é o tipo de cimento, por essa razão escolheu-se o CPIV RS devido elevado teor de adições pozolânicas em sua composição que substituem o clínquer e o CPV-ARI RS devido ao baixo ou nenhum teor de adições em sua composição.

A massa específica dos aglomerantes foram determinadas através do ensaio de Le Chatelier, conforme prescrições da NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (ABNT, 2001) e o módulo de finura foi determinado através do ensaio prescrito pela NBR NM 76: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao

ar (Método de Blaine) (ABNT, 1998). As propriedades dos aglomerantes são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades dos aglomerantes

TIPO	Massa Específica (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
CP IV RS	2,885	4043,19
CP V ARI RS	2,901	4095,06

Fonte: Autoria própria (2017).

As Tabelas 6 e 7 apresentam as características químicas, físicas e mecânicas fornecida pelos fabricantes do CPIV-32 RS produzido pela Itambé e do CPV-ARI RS produzido pela Votorantim respectivamente.

Tabela 6 – Caracterização química, física e mecânica do CPIV-32 RS

Propriedades Químicas									
AL ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resíduos insolúveis	Equiv. Alcalino
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
9,88	29,3	3,86	45,16	2,81	2,23	3,43	0,66	25,79	1,15
Propriedades Físicas					Propriedades Mecânicas				
Expansão Quente (mm)	Início Pega (h)	Fim Pega (h)	Consistência Normal (%)	Blaine (cm ² /g)	1 dia MPa	3 dias MPa	7 dias MPa	28 dias MPa	
0,27	04:34	05:19	30	4.158,0	13	25,5	33,4	46,2	

Fonte: Itambé (2017).

Tabela 7 – Caracterização química, física e mecânica do CPV-ARI RS

Propriedades Químicas									
AL ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resíduos insolúveis	Equiv. Alcalino
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
-	-	-	-	5,5	3,1	3,3	-	13,5	-
Propriedades Físicas					Propriedades Mecânicas				
Expansão Quente (mm)	Início Pega (h)	Fim Pega (h)	Consistência Normal (%)	Blaine (cm ² /g)	1 dia MPa	3 dias MPa	7 dias MPa	28 dias MPa	
0,2	03:37	04:34	-	4.919,0	22,0	33,5	39,7	51,0	

Fonte: Votorantim (2017).

3.1.2 Agregado Miúdo

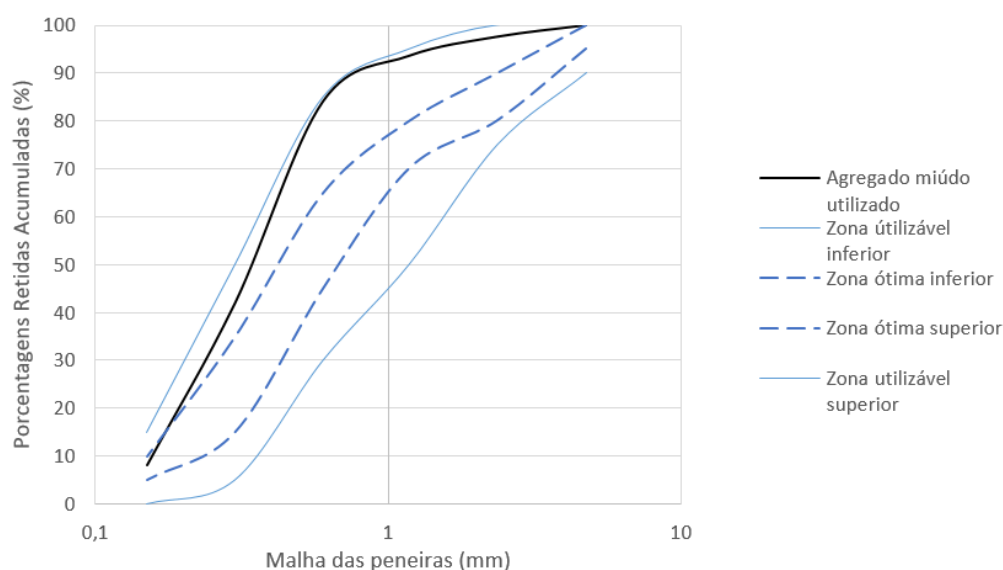
O agregado miúdo utilizado foi a areia natural, disponível no canteiro de obras da UTFPR, previamente seca em estufa e limpa das impurezas orgânicas.

A determinação da composição granulométrica foi realizada através das prescrições da NBR 7217 – Agregados: Determinação da composição granulométrica (ABNT, 1987). Outros dados obtidos relacionados a caracterização do agregado miúdo são apresentados na Tabela 8 e na Figura 16.

Tabela 8 - Caracterização do agregado miúdo

Areia Natural	Resultados	Normas
Massa Específica (g/cm ³)	2,62	NBR NM 52 (2003)
Módulo de Finura	2,73	NBR NM 248 (2003)
Dimensão máxima característica (mm)	2,36	NBR NM 248 (2003)

Fonte: Aatoria própria (2017).



Verifica-se que essa areia é caracterizada como média, visto que apresenta módulo de finura entre 2,20 e 2,90 dentro da faixa de zona ótima.

3.1.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a pedra brita de rocha basáltica, disponível no canteiro de obras da UTFPR, limpa das impurezas orgânicas.

A determinação da composição granulométrica e da massa específica foi realizada através das prescrições da NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2002). Os dados obtidos relacionados a caracterização do agregado graúdo são apresentados na Tabela 9 e na Figura 17.

Tabela 9 - Caracterização do agregado graúdo		
Pedra Brita	Resultado	Normas
Massa Específica (g/cm ³)	2,87	NBR NM 52 (2003)
Módulo de Finura	7,71	NBR NM 248 (2003)
Dimensão máxima característica (mm)	19	NBR NM 248 (2003)

Fonte: Autoria própria (2017).

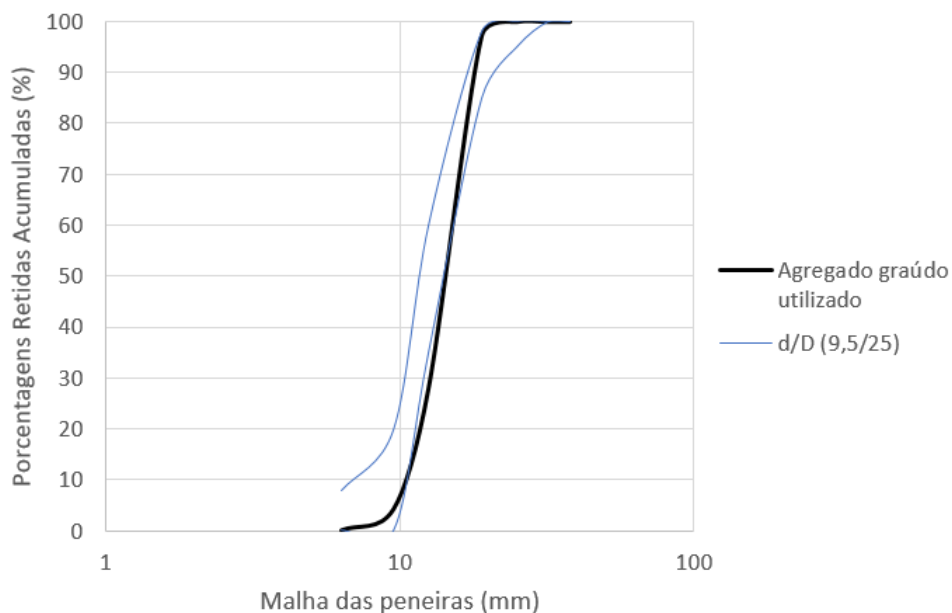


Figura 17 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo

Fonte: Autoria própria (2017).

Tal material, caracteriza-se como brita 2, devido sua dimensão máxima característica e à característica da sua limitação granulométrica d/D prescrita na NBR 7211.

3.1.4 Água

A água utilizada na mistura do concreto é proveniente do abastecimento local do canteiro de obras da UTFPR, sendo pura e livre de impurezas que possam afetar a qualidade do concreto e o resultado dos ensaios.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Composição dos Traços

Foram utilizados 2 traços em 3 composições distintas.

Para posterior comparação dos resultados, foi adotado o mesmo traço utilizado por Cadore (2018) no concreto a base de cimento Portland CP IV, o qual será denominado CPIV-0,5, de 1:2:3:0,5 (aglomerante, agregado miúdo, agregado graúdo e água respectivamente). Para o traço do concreto a base do cimento Portland CP V foi adotado o mesmo traço (CPV-0,5), e por fim para comparação da porosidade foi necessário mais um traço para parâmetro (CPV-0,65) também a base de cimento Portland CP V, entretanto com relação água/cimento maior, 1:2:3:0,65. A Tabela 10 apresenta os traços utilizados.

Tabela 10 - Traços utilizados para composição dos concretos

Nome	Composição	Traço
CPIV-0,5	Cimento Portland CP IV RS	1:2:3:0,5
CPV-0,5	Cimento Portland CP V RS	1:2:3:0,5
CPV-0,65	Cimento Portland CP V RS	1:2:3:0,65

Fonte: Aatoria própria (2017).

3.2.2 Amostragem de corpos de prova

Foram calculados para amostragem total desta pesquisa 60 corpos de prova (Tabela 11), proveniente dos 3 tipos de concretos: CPIV-0,5, CPV-0,5 e CPV-0,65. Os ensaios foram realizados em 4 idades: 28 dias, 3 meses, 6 meses e 9 meses.

Dos corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à compressão, 2 de cada traço e de cada idade foram selecionados para serem utilizados no ensaio de carbonatação após o rompimento à compressão.

Os moldes dos corpos de prova utilizados estão prescritos na NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2015) exceto o molde para a pasta do ensaio de morfologia e microestrutura, que foi realizado em um recipiente plástico descartável de 50 ml.

Tabela 11 – Amostragem e dimensões dos corpos de prova

TRAÇO	IDADE	RESIST. À COMP. AXIAL*	CARBONAT.*	RETRAÇÃO**	MICROESTRUT.***
		AMOSTRAGEM			
CPIV-0,5	28 DIAS	3	1	3	1
	3 MESES	3	1		
	6 MESES	3	1		
	9 MESES	3	1		
CPV-0,5	28 DIAS	3	1	3	1
	3 MESES	3	1		
	6 MESES	3	1		
	9 MESES	3	1		
CPV-0,65	28 DIAS	3	1	3	1
	3 MESES	3	1		
	6 MESES	3	1		
	9 MESES	3	1		
TOTAL POR ENSAIO		36	12	9	3
TOTAL		60			
DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA:					
* Cilíndrico: (10x20) cm					
** Retangular: (7,5x7,5x28,5) cm					
*** Cilíndrico: Recipiente plástico descartável 50 ml					

Fonte: Autoria própria (2018).

3.2.3 Moldagem dos concretos¹

Inicialmente foi realizada a separação dos materiais necessário, limpeza e aplicação de desmoldantes nos 57 corpos de prova que seriam utilizados posteriormente para o concreto.

Os concretos CPIV-0,5, CPV-0,5 e CPV-0,65 foram moldados respeitando os critérios estabelecidos pela NBR 5738 (2015) para moldes cilíndricos e pela NBR 13279 (2005) para moldes prismáticos.

Inicialmente foi realizada a imprimação da betoneira e posteriormente foram adicionados os materiais para mistura conforme a seguinte sequência na betoneira ligada:

- 50% da água, por 30 segundos;
- 100% da brita por 30 segundos;
- 100% do cimento por 1 minuto;
- 100% da areia por 1 minuto;
- 50% da água por 1 minuto;
- Limpeza/raspagem da argamassa aderida à superfície da betoneira desligada por 1 minuto;
- Homogeneização por 5 minutos.

O tempo total de agitação mecânica na betoneira (Figura 18) foi de 10 minutos.



**Figura 18 – Betoneira utilizada (à esquerda) e aparência do CPIV-0,5 fabricado (à direita)
Fonte: Autoria própria (2017).**

Após completar a mistura mecânica através da betoneira foi realizado o ensaio de abatimento do concreto Slump test, conforme NBR-NM 67 para cada um dos traços (Figura 19).



Figura 19 – Slump Test: a) CP V-0,5; b) CP IV-0,5; c) CP V-0,65
Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 12 apresenta os valores encontrados de slump test.

Tabela 12 – Valores de Slump Test

TRAÇO	Slump Test (cm)
CP V - 0,5	5,0
CP IV - 0,5	5,0
CP V - 0,65	24,0

Fonte: Autoria própria (2017).

A partir dessas misturas, foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm e 3 corpos de prova prismáticos de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm para cada um dos 3 traços, totalizando os 57 corpos de prova de concreto (Figura 20).

A superfície superior dos corpos de prova no molde com concreto foi vedada com plástico, a fim de evitar a evaporação da água de hidratação do concreto. Após 24 horas foi realizada a desmoldagem dos corpos de prova e levados ao processo de cura.



Figura 20 – Molde dos corpos de prova
Fonte: Autoria própria (2017).

Foram moldados também pequenos corpos de prova, em copos de plástico de café (50 ml), de pasta de cimento, com mesma relação água/cimento de CPIV-0,5, CPV-0,5 e CPV-0,65, para realização dos ensaios de microestrutura.

3.2.4 Cura

Fez-se a opção pela cura úmida devido à dificuldade que haveria no ensaio se fosse realizada cura submersa, já que a saturação dos poros dificultaria a difusão do CO₂, desfavorecendo o avanço da carbonatação e da simulação das condições reais das estruturas.

Os corpos de prova permaneceram em cura úmida em uma câmara fechada por 28 dias, com umidade relativa de 95% em temperatura ambiente.

A câmara úmida foi adaptada para que todos os corpos de prova permanecessem no mesmo lugar, consistindo em uma caixa d'água de fibrocimento com capacidade de 1000 litros, tendo suas aberturas vedadas por meio de lona e fita adesiva. A lâmina d'água foi substituída por recipientes com água, para que garantisse a taxa de umidade de 95% no interior da câmara (Figura 21). Esta câmara permaneceu ao lado de fora, sob temperaturas do ambiente natural externo à universidade.



Figura 21 – Câmara úmida
Fonte: Autoria própria (2017).

3.2.5 Condicionamento

Após os 28 dias em cura, os corpos de prova foram condicionados em um ambiente externo do estacionamento da UTFPR abrigados parcialmente da chuva (Figura 22).



Figura 22 – Local de condicionamento dos corpos de prova
Fonte: Autoria própria (2017).

3.2.6 Determinação da temperatura e umidade do ambiente

Os dados referentes à umidade e temperatura do ambiente foram obtidos através do dispositivo eletrônico Datalogger AK174, que permaneceu durante o período dos 9 meses da pesquisa junto aos corpos de prova, registrando e armazenando as informações de temperatura e umidade de minuto em minuto.

Em um intervalo de cerca de 15 dias era realizado o descarregamento das informações para o computador, devido capacidade de memória limitada do dispositivo.

3.2.7 Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com as prescrições da NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão a cada idade.

Previamente, foi realizada a retífica nos corpos de prova, e estes foram rompidos à compressão por meio da prensa hidráulica EMIC PC 200 do laboratório de materiais da UTFPR – Campus Pato Branco, que possui capacidade de 2000 kN.

3.2.8 Ensaio de profundidade da carbonatação natural

A fim de se verificar a profundidade de carbonatação, os corpos de prova foram fraturados através do ensaio de compressão diametral (Figura 23).

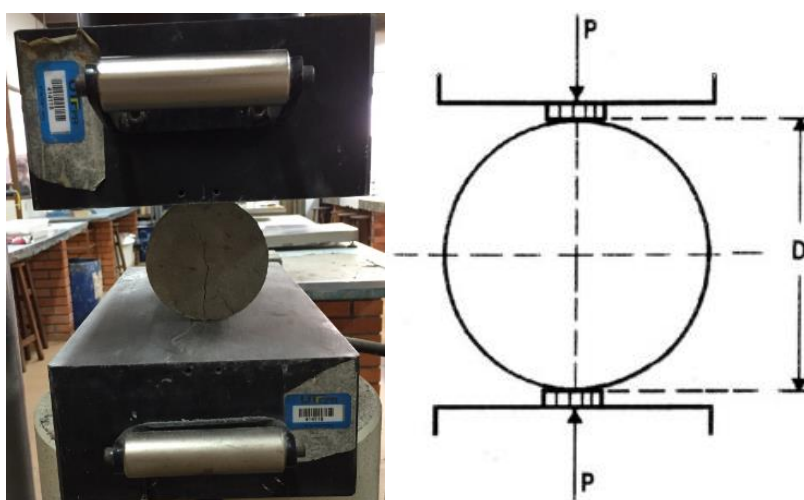


Figura 23 – Ensaio de compressão diametral
Fonte: Autoria própria (2017).

Para leitura da profundidade carbonatada foram utilizadas as prescrições da RILEM – CPC 18 (1988), utilizando-se de uma solução com indicadores de pH de fenolftaleína e timolftaleína (Tabela 13).

Tabela 13 - Metodologia de preparo da solução indicadora de pH	
Indicadores	Preparo da Solução
Fenolftaleína	Dissolver 10g do reagente em 700 cm ³ de etanol e diluir em 300 cm ³ de água destilada.
Timolftaleína	Dissolver 0,4g do reagente em 600 cm ³ de etanol e diluir em 400 cm ³ de água destilada.

Fonte: Adaptado de RILEM (1998 *apud* ISAIA, 2011).

A solução foi aspergida sobre a superfície fraturada do corpo de prova. Na região carbonatada não há mudança na coloração no concreto, já na região

não carbonatada, ocorre a alteração de cor de acordo com o indicador utilizado (Figura 24).

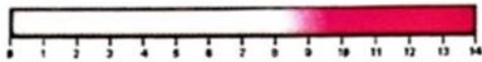

Indicador de pH	Intervalo de mudança de cor
Fenolftaleína	 <p>incolor/vermelho carmim faixa de pH 8,3 – 10,0</p>
Timolftaleína	 <p>incolor/azul faixa de pH 9,3 – 10,5</p>

Figura 24 – Intervalo de mudança de cor entre a região carbonatada e não carbonatada
Fonte: Adaptado de RILEM (1998 *apud* ISAIA, 2011).

Após uma hora, foi realizada a leitura da profundidade de carbonatação através de um paquímetro digital. A Figura 25 apresenta os pontos em que foram realizadas as leituras, que posteriormente foi calculada a média, sabendo-se que a carbonatação não ocorre de modo uniforme. Ferreira (2013) apresenta em seu estudo que não há diferença significativa entre medidas realizadas no período entre 10 minutos e 24 horas após aspergir o indicador sobre a superfície fraturada, o que torna comum e usual a leitura de profundidade de carbonatação nas primeiras horas devido maior praticidade.



Figura 25 – Pontos utilizados para medição de profundidade de carbonatação
Fonte: Autoria própria (2018).

3.2.8.1 Comparação entre ensaio Acelerado e Natural

Foram utilizados os resultados de profundidades de carbonatação obtidos por Cadore (2018) através do ensaio acelerado para comparação com os valores obtidos através do ensaio natural realizado neste estudo. Ambos os concretos são à base de cimento Portland CP IV – RS e relação água/cimento de 0,5 e foram condicionados em cura úmida por 28 dias.

Cadore (2018) condicionou os corpos de prova de concreto em uma câmara de carbonatação com teor de $5 \pm 1\%$ de CO_2 (superior ao encontrado em ambientes naturais, que apresentam concentrações na faixa de 0,03 e 1,2%), umidade relativa do ambiente interno à câmara de carbonatação com teor de $60 \pm 0,5\%$ e temperatura interna à câmara de carbonatação, na faixa de $40 \pm 0,1^\circ\text{C}$.

3.2.9 Ensaio absorção de água por imersão

Para realização desse ensaio, foram utilizados a metade do corpo de prova utilizado no ensaio de profundidade de carbonatação de cada um dos concretos: CPIV-0,5, CPV-0,5 e CPV-0,65. O procedimento de execução foi realizado conforme prescrição da NBR 9778 – Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica (ABNT, 1987).

Esses fragmentos foram colocados em estufa por 48 horas. Na sequência foram removidos da estufa e colocados em repouso por 1 hora em temperatura ambiente. Após esse período, foi realizada a pesagem. Em seguida, os fragmentos foram colocados em um recipiente e submersos em água por mais 48 horas (Figura 26).



Figura 26 – Amostras no recipiente submersas em água

Fonte: Aatoria própria (2018).

Depois desse período, esses fragmentos foram retirados da água e foi secado o excesso de água da superfície com um pano. Os corpos de prova foram pesados novamente e o percentual de água absorvido (AA) da amostra pode ser obtido através da Equação 14.

$$AA = \frac{M_{sat} - M_{seco}}{M_{seco}} \times 100 \quad (\text{EQ. 14})$$

Onde: M_{sat} = massa do corpo de prova saturado;
 M_{seco} = massa do corpo de prova seco em estufa;
AA = porcentagem de absorção de água.

3.2.10 Ensaio de variação dimensional

O ensaio de variação dimensional foi realizado através do relógio comparador (Figura 27), normatizado pela NBR 15261 (2005). Nos primeiros 28 dias, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida duas vezes por semana para leitura de variação dimensional. Após os primeiros 28 dias as leituras foram realizadas cerca de duas vezes por mês.

Os dados de variação dimensional foram obtidos e analisados a partir da metodologia descrita pela NBR 15261(2005).



Figura 27 – Relógio comparador (esquerda) e amostras para variação dimensional e de massa (direita)

Fonte: Aatoria própria (2018).

3.2.11 Ensaio de análise da microestrutura

Para avaliação microestrutural das pastas de cimento CPIV-0,5, CPV-0,5 e CPV-0,65 foi utilizada a difração de raios-X (DRX) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas idades de 28 dias, 3, 6 e 9 meses.

Para realização dessas análises, as amostras das pastas endurecidas foram retiradas do local em que permaneciam condicionadas e na sequência foi realizada a desfragmentação do corpo de prova da pasta de cimento em pequenos pedaços (Figura 28).



Figura 28 – Fragmentos selecionados
Fonte: Aatoria própria (2017).

Foram selecionados fragmentos das amostras das regiões superficiais da pasta, considerando que seria a região que em todas as amostras apresentavam carbonatação. A Figura 29 apresenta a região em cinza que foram selecionados os fragmentos para as análises de microestrutura.

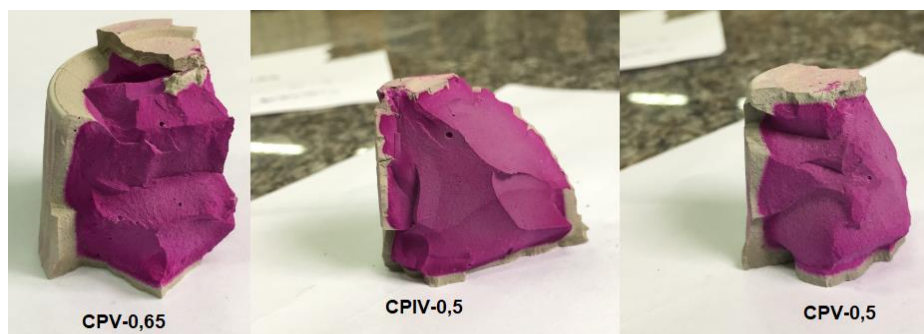


Figura 29 – Região da pasta endurecida selecionada (cinza)
Fonte: Autorial própria (2017).

Posteriormente, foi necessário interromper o processo de hidratação desses pequenos pedaços da pasta endurecida que seriam utilizados nos ensaios.

O procedimento para cessar a hidratação da pasta foi realizado através da troca de fluídos, onde as amostras dos fragmentos foram submersas em acetona (C_3H_6O) por um período de duas horas (Figura 30). Posteriormente, os fragmentos foram retirados da acetona e foi realizada a secagem do excesso de acetona superficial manualmente. Em seguida, a fim de se eliminar a acetona presente no interior dos fragmentos, foi utilizado um sistema formado pelo conjunto filtro de buncher conectado à bomba de vácuo (Figura 31). Posteriormente os fragmentos foram colocados na estufa a $80^{\circ}C$ por cerca de 15 minutos.

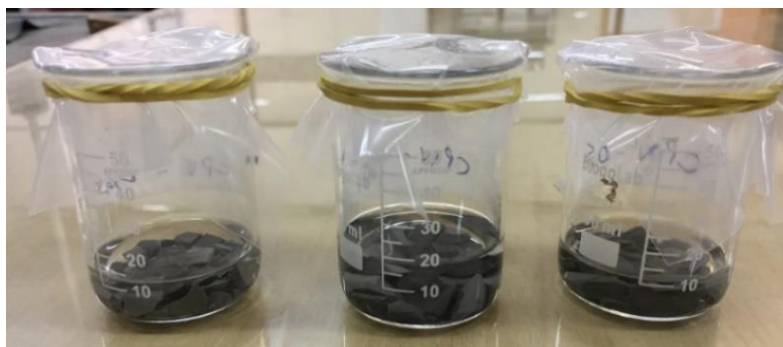


Figura 30 – Amostras submersas em acetona
Fonte: Autorial própria (2017).



Figura 31 – Conjunto filtro de buncher e bomba de vácuo
Fonte: Autorial própria (2017).

Após cessar a hidratação da pasta, parte da amostra fragmentada (Figura 32) foi separada para o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).



Figura 32 – Amostras para MEV
Fonte: Autorial própria (2017).

Para os ensaios de difração de raios-X (DRX) é necessário que as amostras sejam trituradas até atingir um material pulverulento passante na peneira de 150 microns (Figura 33). Esse procedimento de moagem ocorreu de modo manual por meio do cadilho e pistilo. As amostras para os respectivos ensaios são apresentadas na Figura 34.



Figura 33 – Procedimento de moagem
Fonte: Autoria própria (2017).



Figura 34 – Amostras para ensaio de DRX e TG-DTG
Fonte: Autoria própria (2017).

3.2.11.1 Difração de Raios-X (DRX)

O ensaio através da difração de raios-X (DRX) foi realizado na Central de Análises da Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR), Campus Pato Branco, através do equipamento modelo Rigaku Mini Flex 600 que possui um tubo de radiação Cu – K α , (40 kV, 15 mA).

Os parâmetros para o ensaio foram:

- Comprimento de onda de 1,54 Å;
- Ângulos de varredura de 5° – 60° (2 θ);
- Velocidade de varredura: 0,02°/segundo;
- Idades: 28 dias, 3, 6 e 9 meses.

3.2.11.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica que permite a análise morfológica do material analisado. Através dessa análise serão verificadas as modificações na microestrutura das pastas de cimento devido à carbonatação.

A análise foi realizada aos 3 e 9 meses na Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR), Campus Curitiba.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os dados do ensaio relacionados à resistência à compressão axial, obtidos nas 4 idades, são mostrados na Figura 35. Os valores foram obtidos através da média entre 3 corpos de prova.

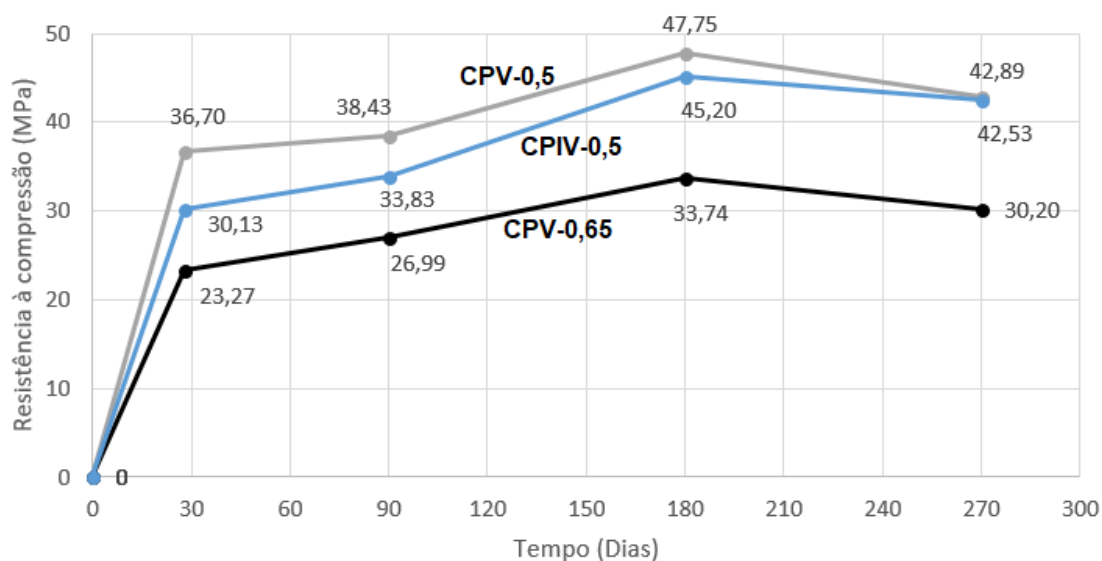


Figura 35 – Resistência à compressão dos concretos.
Fonte: Autorial própria (2018).

Como esperado, os concretos com relação água/cimento superiores, de 0,65, apresentaram em todas as idades resistências inferiores.

Já nos concretos de mesma relação água/cimento, verifica-se que o CPV nas duas primeiras idades apresentou resistências superiores e que ao longo do tempo tendeu a se equiparar com o CPIV. Comportamento este que se assemelhou aos do ensaio de resistência à compressão axial realizados por Pauletti (2004) quando comparados o CPIV (permitido de 15 a 50% de adições pozolânicas) ao CPI-S (permitido de 1 a 5% de adições pozolânicas).

A queda de resistência aos 270 dias pode ter sido ocasionada devido utilização da prensa manual na idade anterior (180 dias), por conta de problemas técnicos ocorridos com a EMIC, não permitindo sua utilização na referida idade.

Salientando que a partir dos resultados das análises de DRX, pode-se verificar que não houve o consumo do CSH pelas reações de carbonatação em

nenhuma das amostras, acarretando neste ganho de resistência ao longo do tempo, visto que ainda esses concretos tendem a apresentar um ganho de resistência sobre sua camada superficial, devido redução dos poros nessa região ocasionados pela precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) no interior destes poros.

O DRX ainda justifica esse ganho de resistência ao longo do tempo na amostra de CPIV-0,5 ao apresentar maiores desenvolvimentos nos picos de CSH ao longo do tempo.

4.2 MEDIDA DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Na sequência apresenta-se as imagens das profundidades de carbonatação nas amostras expostas ao ambiente de degradação natural urbano, situado no estacionamento do Bloco J na UTFPR – Campus Pato Branco, conforme idades analisadas. A Figura 36 representa as amostras com a aplicação da fenolftaleína e a Figura 37 com aplicação da timolftaleína.

Verifica-se que a amostragem dos corpos de prova variou aos 6 e 9 meses. Isso ocorreu porque inicialmente estavam sendo utilizados: 1 corpo de prova que foi confeccionado para análise da carbonatação para cada traço, e posteriormente foi decidido utilizar mais 2 corpos de prova de cada traço, rompidos no ensaio de resistência à compressão axial, no ensaio de profundidade. Entretanto, aos 6 meses, devido a utilização da prensa hidráulica manual, todos os corpos de prova ficaram estilhaçados no ensaio de compressão axial, impossibilitando seu uso. Aos 9 meses todos os corpos de prova do CPIV-0,5 também ficaram inutilizáveis para o ensaio de carbonatação.

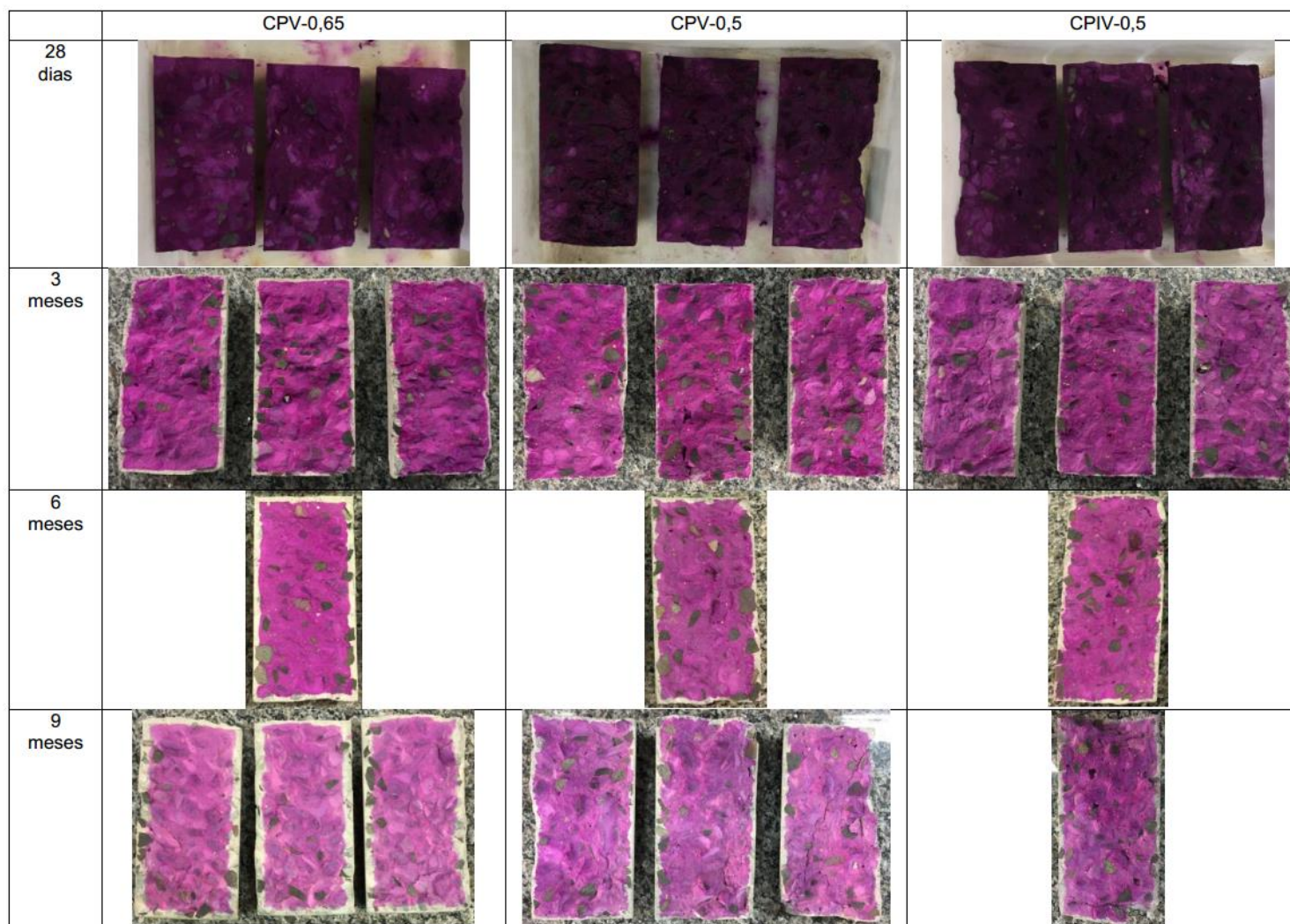


Figura 36 – Aspecto da carbonatação por meio da fenolftaleína
Fonte: Autoria própria (2018).




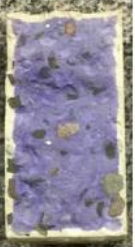





	CPV-0,65	CPV-0,5	CPIV-0,5
28 dias	x	x	x
3 meses			
6 meses			
9 meses			

Figura 37 – Aspecto da carbonatação por meio da timolftaleína
 Fonte: Autoria própria (2018).

As medições de profundidade ocorreram aos 28 dias, 3, 6 e 9 meses como citado anteriormente (28, 90, 180 e 270 dias respectivamente). A média dos resultados de cada um dos três traços estudados são apresentados nas Figuras Figura 38 e Figura 39.

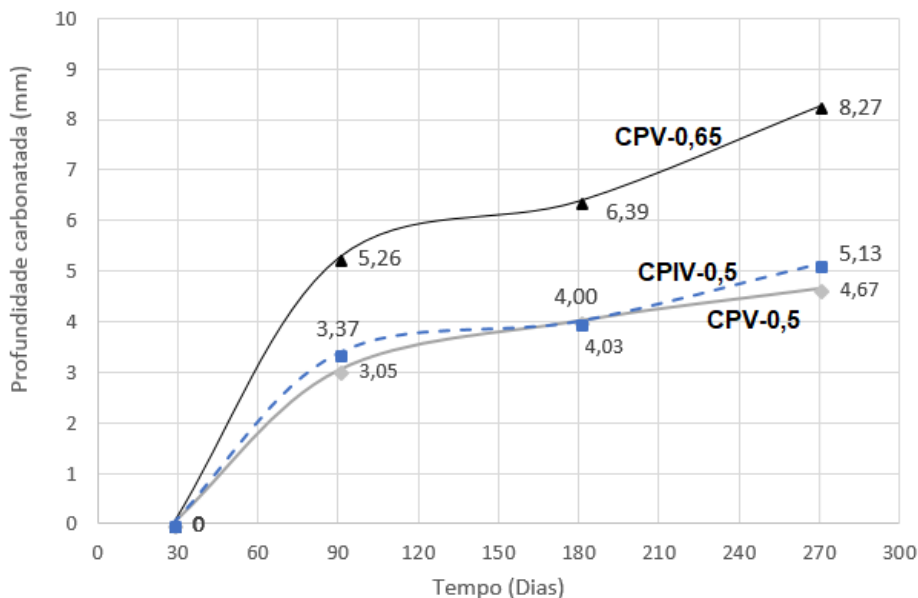


Figura 38 – Profundidade de carbonatação a partir da Fenolftaleína
Fonte: Autoria própria (2018).

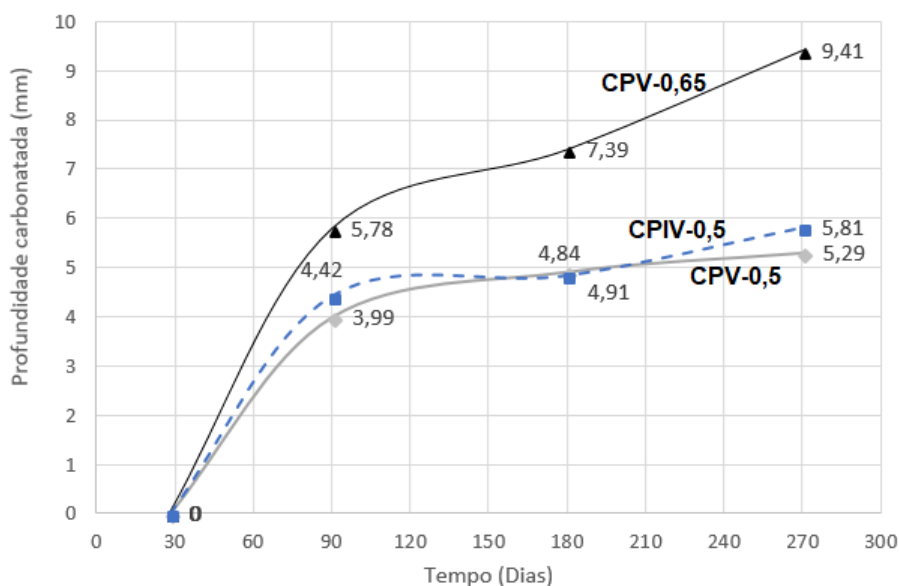


Figura 39 – Profundidade de carbonatação a partir da Timolftaleína
Fonte: Autoria própria (2018).

Verifica-se que para o mesmo tipo de cimento (Cimento Portland CP V – ARI), com uma relação a/c de 0,65 foram obtidos valores expressamente maiores do que para relação a/c de 0,5. Torna-se evidente, e que já era bastante conhecida, a elevada influência que a relação água/cimento possui na

carbonatação, visto que tal fator acarretará no aumento ou diminuição da rede de poros da matriz cimentícia, responsável pela difusão do CO_2 . A diferença de profundidade aos 9 meses entre os concretos CPV-0,65 e CPV-0,5 chegou a 3,6 mm para a fenolftaleína e 4,12 mm para timolftaleína. De modo geral, os concretos CPV-0,65 apresentaram profundidades carbonatadas 43% maiores que o CPV-0,5.

Verificou-se também que os concretos à base de cimentos com maiores teores de adição (CPIV-0,5), de modo geral, apresentaram profundidades carbonatadas semelhantes aos compostos com cimento de menor teor (CPV-0,5) aos 9 meses, entretanto, ligeiramente superiores, chegando a uma diferença de profundidade de 0,46 mm para a fenolftaleína e 0,52 mm para timolftaleína, inferiores à diferença encontrada quando se altera a relação água/cimento, que chegou a ser cerca de 8 vezes maior.

Pauletti (2004) apresenta em sua pesquisa um aumento de profundidade 1,68 vezes ao se utilizar o CPIV (permitido de 15 a 50% de adições pozolânicas) quando comparado ao CPI-S (permitido de 1 a 5% de adições pozolânicas) através dos ensaios acelerados. Dessa forma, esperava-se que concretos com maiores teores de adição apresentassem menor profundidade carbonatada, já que ocasionam o refinamento dos poros, impedindo o CO_2 de se penetrar com maior facilidade.

Isso pode ser justificado pelo efeito da reserva alcalina, já que devido ao consumo de portlandita, ocasionado pelas reações pozolânicas, ocorre uma redução dessa reserva, permitindo o avanço da frente de carbonatação com maior intensidade nos concretos à base de cimento com maior teor de adição (CPIV-0,5) equiparando-se ao CPV-0,5. Ou seja, o tipo de cimento também possui sua influência na velocidade da frente de carbonatação, porém, sem a mesma significância que a relação água/cimento.

Nota-se ainda que em todos os casos a profundidade de carbonatação é mais acentuada nas primeiras idades, tendendo a reduzir a inclinação da curva ao longo do tempo devido à barreira formada pelo carbonato de cálcio, que dificultará a difusão do CO_2 para o interior do concreto.

4.2.1 Influência do indicador de pH

O pH de precipitação do carbonato de cálcio é de 9,4 aproximadamente (HELENE, 1986). Dessa forma, recomenda-se a utilização de indicadores que apontem mudanças de pH entre 8 e 11.

Ao realizar a comparação entre os indicadores, nota-se que a timolftaleína apresentou em média uma profundidade de 0,85 milímetros, equivalente a 15,7% superior à fenolftaleína (Figuras Figura 40, Figura 41 e Figura 42), o que se era esperado já que a timolftaleína apresenta um ponto de viragem ligeiramente superior à fenolftaleína.

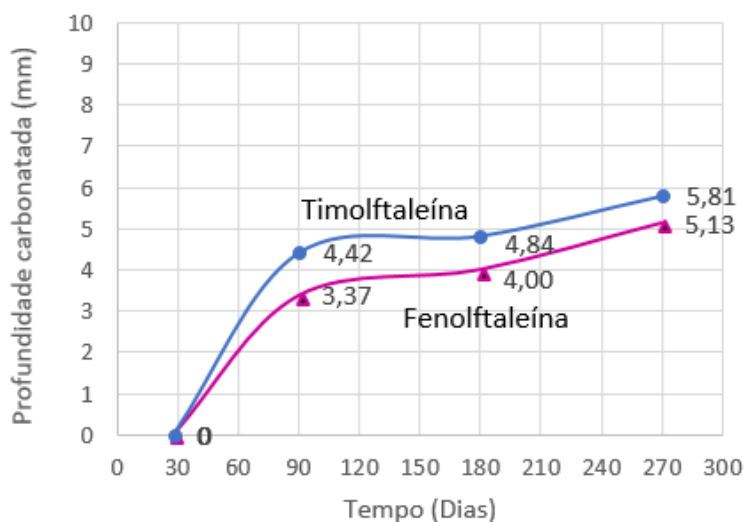


Figura 40 – Comparação entre os indicadores de pH para CPIV-0,5
Fonte: Autoria própria (2018).

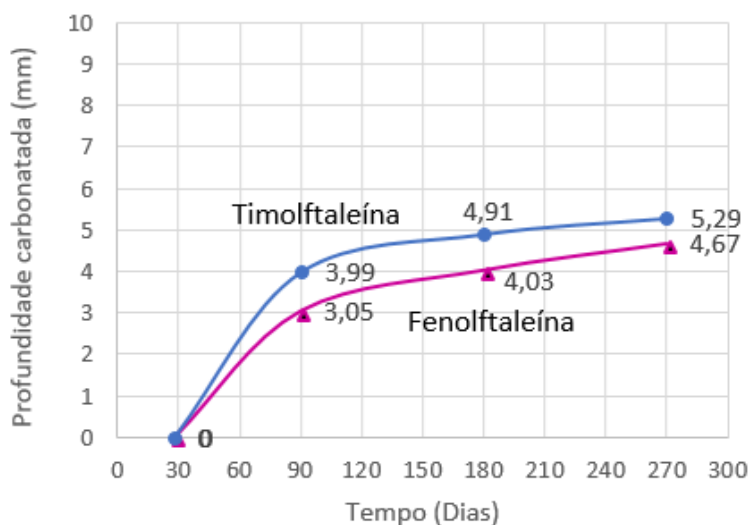


Figura 41 – Comparação entre os indicadores de pH para CPV-0,5
Fonte: Autoria própria (2018).

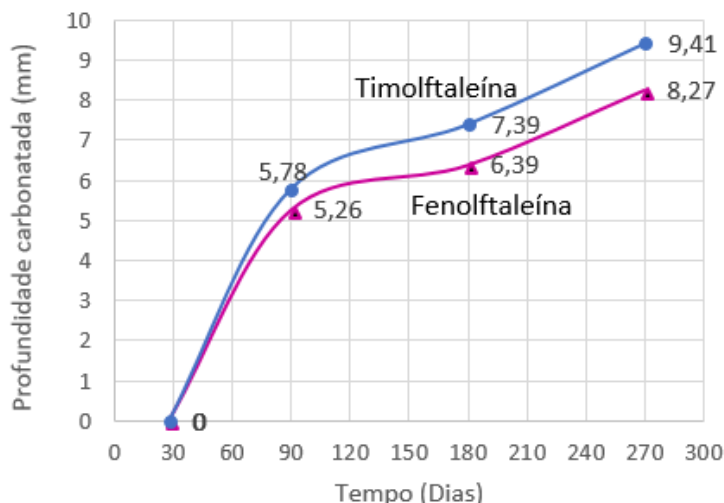


Figura 42 – Comparação entre os indicadores de pH para CPV-0,65
Fonte: Autoria própria (2018).

A película passivadora do aço pode sofrer alterações de estabilidade quando expostas à ambiente com pH entre 11,5 e 11,8. Portanto, verifica-se que a timolftaleína se sobressai, visto que possui um intervalo de mudança de coloração entre 9,3 e 10,5 contra o intervalo de 8,3 e 10 da fenolftaleína. Contudo, ainda tem-se como mais usual para o estudo da carbonatação o emprego da fenolftaleína.

4.2.2 Comparação com processo acelerado

A Figura 43 apresenta os resultados de profundidades de carbonatação obtidos por Cadore (2018) através do ensaio acelerado, comparados aos valores obtidos através do ensaio natural realizado neste estudo.

Verifica-se que para mesma idade (90 dias), foi encontrada uma diferença de mais de 4 milímetros. Traçando uma linha de tendência logarítmica nos dados obtidos e considerando que o comportamento seguirá a equação gerada por esta curva, para alcançar a profundidade encontrada no primeiro mês de ensaio acelerado, de 6,01 mm, a equação aponta que levaria quase 1 ano (364 dias) para o ensaio natural alcançar esta mesma profundidade.

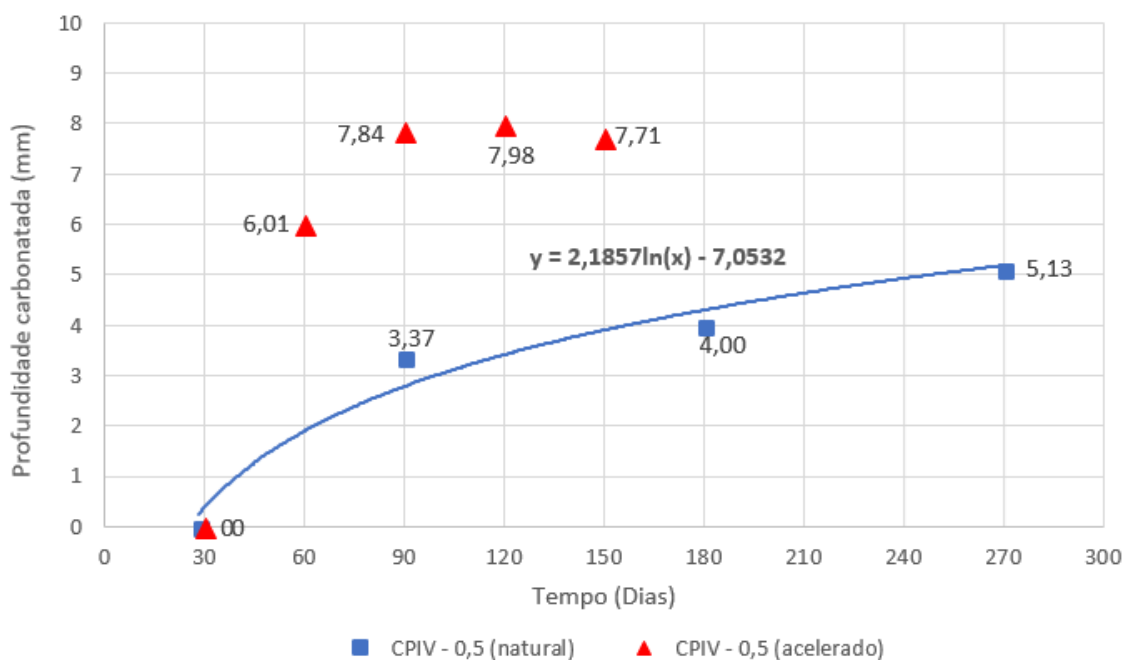


Figura 43 – Profundidade de carbonatação: ensaio acelerado (CADORE, 2018) x natural
Fonte: Autoria própria (2018).

4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os resultados referentes à absorção de água são mostrados na Figura 44. Destaca-se o concreto CPV-0,65 pelo maior teor de absorção de água em todas as idades, o que era esperado visto que possui uma matriz cimentícia altamente porosa em função da elevada relação água/cimento.

Ao se comparar os dois concretos com relação a/c 0,5 percebe-se que o CPIV apresentou em todas as idades uma absorção maior que o CPV, ou seja, o concreto com maior teor de adições apresentou uma maior porosidade que o concreto com menor teor, o que acaba sendo contraditório, já que esperava-se que devido ao alto teor de adições tivesse ocorrido um refinamento dos poros, reduzindo a porosidade através das reações pozolânicas.

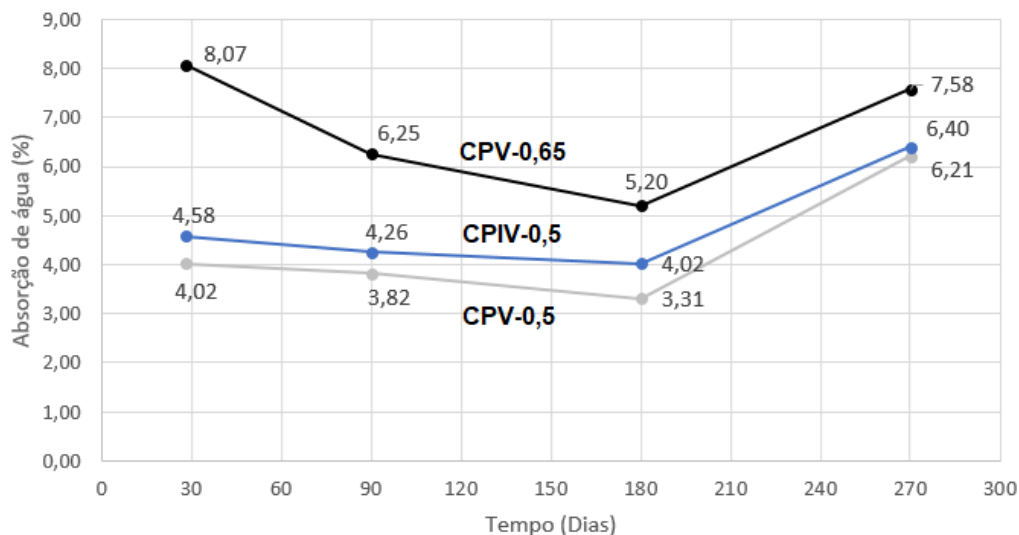


Figura 44 – Absorção de água
Fonte: Autoria própria (2018).

Ambos concretos obtiveram um slump test de 5 cm (Figura 19), entretanto, pode-se perceber, a partir de uma análise visual, que o CP V aparenta uma consistência mais seca que o CP IV. Isso também pôde ser notado durante o manejo para execução dos corpos de prova, sendo que o CP IV possuía uma trabalhabilidade melhor que o CP V.

Uma possível hipótese para explicar tal fenômeno é que parte da água de hidratação necessária tenha sido evaporada durante o processo de mistura na betoneira, reduzindo-se uma pequena parte da relação a/c, que acarreta em uma redução da porosidade, e ao fato de o CPV ter apresentado uma maior finura que ocasionou no consumo de uma maior quantidade de água, já que as amostras de CPV-0,5 apresentaram menor porosidade e maior resistência que as de CPIV-0,5.

As amostras nas 3 primeiras idades permaneceram por 48 horas na estufa e posteriormente 48 horas submersa. O aumento em todos os teores de absorção aos 9 meses, se deu por conta do feriado na data da retirada da estufa que impediu que a amostra fosse retirada, fazendo com que a mesma permanecesse por 96 horas na estufa. Essas amostras permaneceram pelo mesmo tempo submersa na água. Porém o comportamento, de modo geral permaneceu o mesmo: CPV-0,65 com maior absorção e CPV-0,5 com menor.

4.4 VARIAÇÃO DIMENSIONAL E DE MASSA

A Figura 45 apresenta os resultados referentes à variação de massa e da variação dimensional dos três concretos estudados.

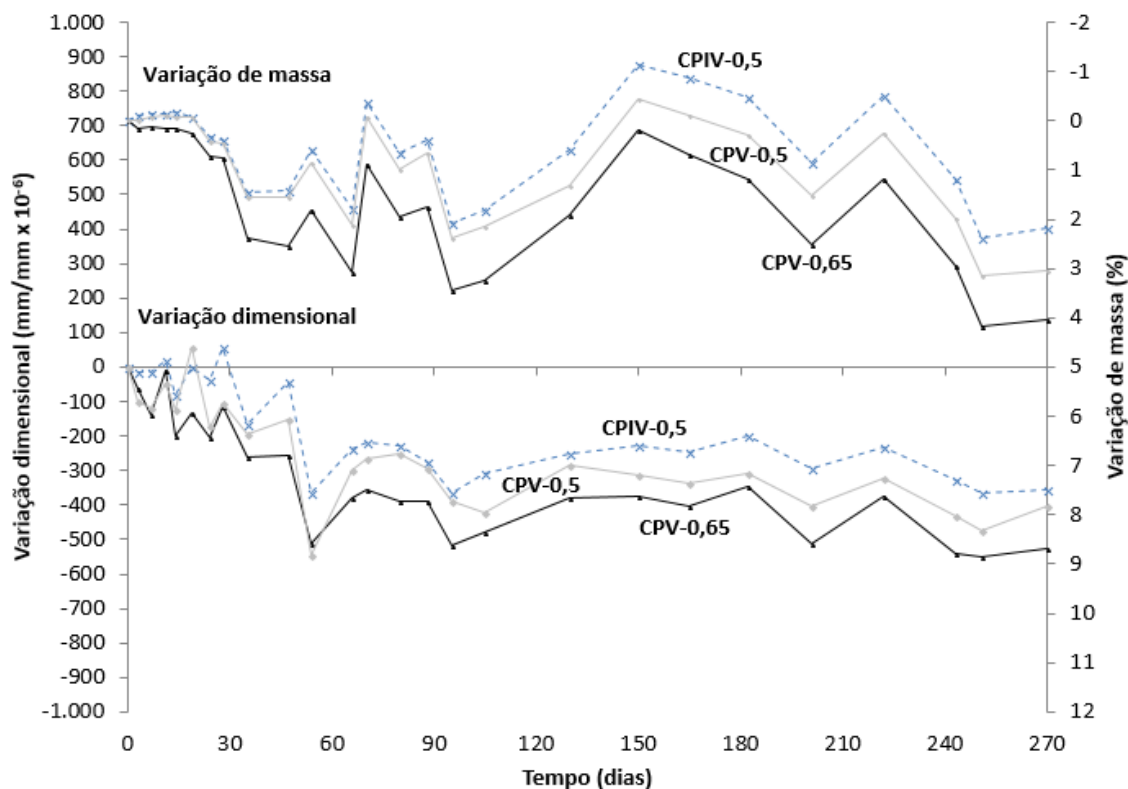


Figura 45 – Variação de massa (acima) e variação dimensional (abaixo)
Fonte: Autoria própria (2018).

Analisando inicialmente as curvas de variação de massa, nota-se que nas primeiras idades e até próximo aos 60 dias, o concreto foi perdendo massa, acarretando numa retração hidráulica, devido à perda de água restante das reações de hidratação. Esta perda de água foi mais evidente dos 28 para os 35 dias, quando os corpos de prova foram retirados da cura úmida e condicionados no ambiente externo, permitindo maior evaporação da água, visto que foi um período de dias quentes.

Se os concretos permanecessem abrigados da chuva, as curvas do gráfico de variação de massa tenderiam a continuar decrescendo até uma certa constância. Entretanto, como estes estavam em contato com o ambiente natural e tinham contato parcial com a chuva, a massa de água que os corpos de prova haviam perdido, são novamente absorvidas pelos mesmos, o que justifica os

picos apresentados no gráfico. Os dados obtidos através do Datalogger confirmam que nos períodos em que foram apresentados os picos, a taxa de umidade relativa do ar havia sido igual a 100%, ou seja, os corpos de prova absorveram água da chuva. Posteriormente em dias mais quentes, essa água tendia a evaporar novamente, fazendo com que a curva voltasse a decair.

De modo geral no período estudado, os concretos à base de CPV-0,65 apresentaram uma maior variação de massa, resultado este esperado, já que foi o que apresentou maior relação água/cimento e respectivamente maior porosidade, atingindo cerca de 4%. Na sequência, os concretos a base de CPV-0,5 apresentaram uma variação de massa de cerca de 3% e por fim os concretos a base de CPIV-0,5 apresentaram a menor variação de massa de pouco mais de 2%, que pode ter sido acarretado pelo fato de as adições pozolânicas gerarem o refinamento dos poros, impedindo que uma maior quantidade de água fosse absorvida.

Quanto à análise de variação dimensional percebe-se que apesar da grande variação nos picos logo nas primeiras semanas que variaram conforme se variou a variação de massa, todos os concretos de modo geral apresentaram uma retração.

Pode-se notar também que à medida que se aumentou a variação de massa, conseqüentemente aumentou a retração, que se mostra com uma evolução mais intensa nas primeiras idades, até próximo aos 60 dias.

A retração acompanhou a variação de massa, sendo os concretos CPV-0,65 apresentando maior variação, na sequência os CPV-0,5. Através desses resultados percebe-se que novamente a relação água/cimento foi o fator mais influente também para retração. Os concretos com maiores teores de adições (CPIV-0,5) foram os que apresentaram menores valores de variação dimensional (retração).

4.5 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

4.5.1 Difração de Raios-X (DRX)

A Figura 46 apresenta os resultados das 4 idades das difrações de raios-X (DRX) das pastas de cimento de cada uma das 3 amostras, e a Figura 47 a intensidade dos picos de maior intensidade ao longo do tempo de cada composto.

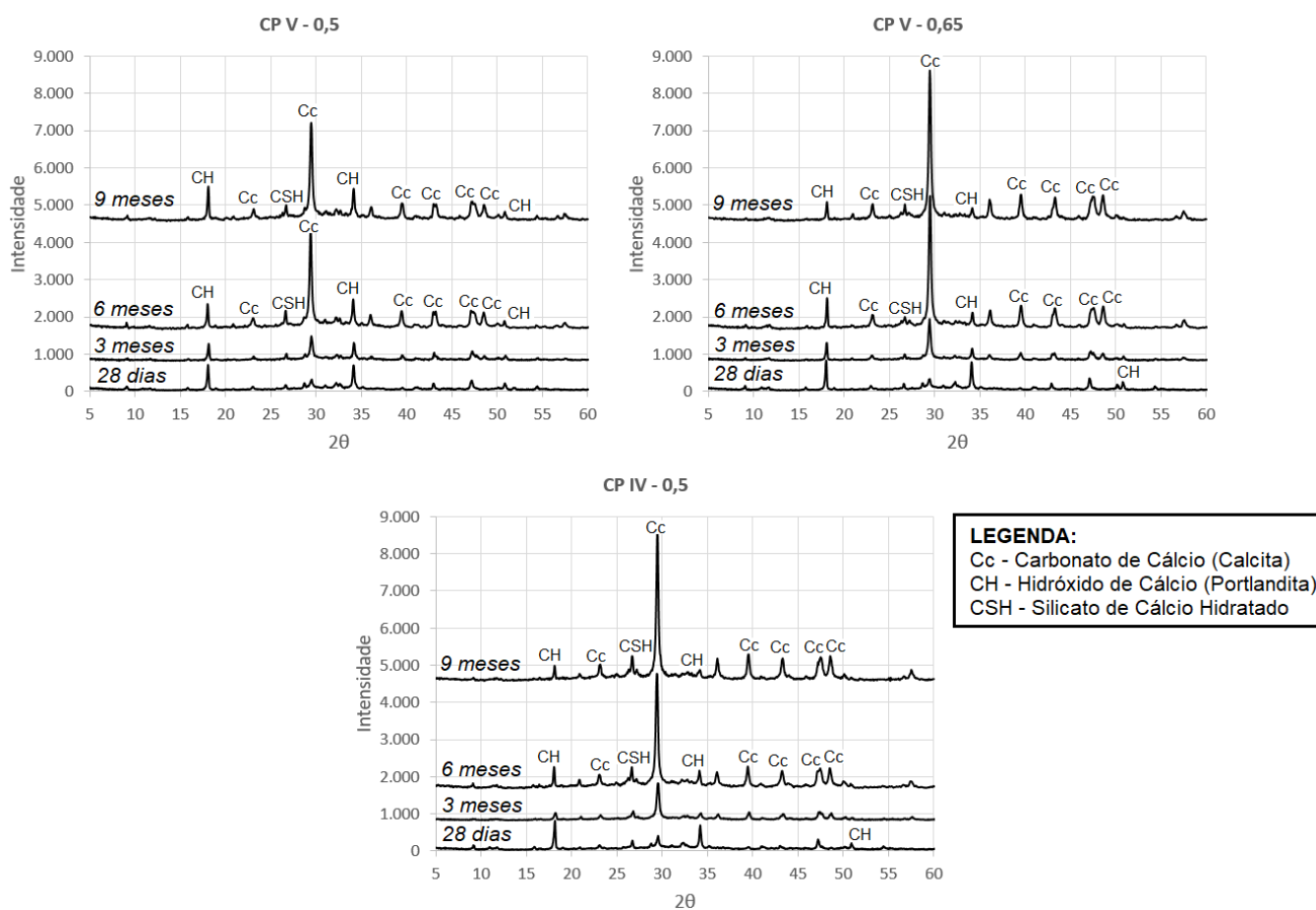


Figura 46 – DRX das amostras ensaiadas
Fonte: Autoria própria (2018).

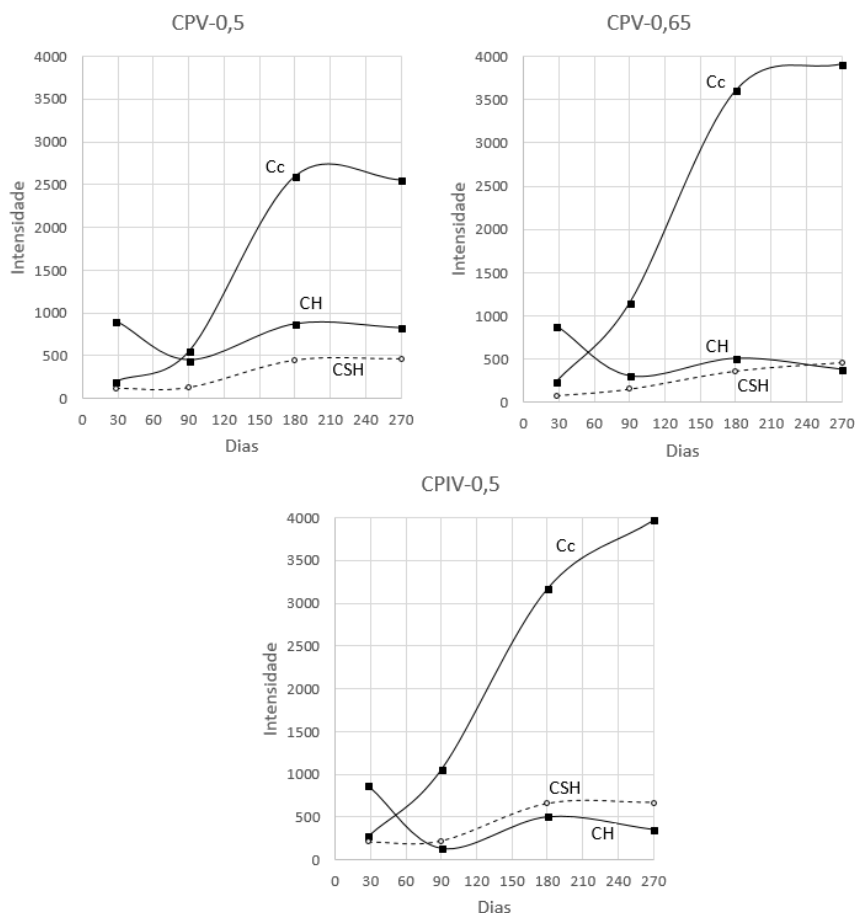


Figura 47 – Intensidade dos picos ao longo do tempo
Fonte: Autoria própria (2018).

Os resultados confirmam os valores obtidos através das medidas de profundidade de carbonatação. É evidente a crescente formação de carbonato de cálcio (Cc) ao longo do tempo em todas as amostras.

A amostra do CPV-0,65 apresentou picos de Cc que foram aumentando significativamente ao longo do tempo, ele torna-se bastante evidente na posição 2θ igual a $29,4$. Pode-se verificar ainda uma singela redução nos picos de hidróxido de cálcio (CH) ao longo do tempo que foi reduzido devido à reação de carbonatação.

A amostra do CPV-0,5 foi a que apresentou menores picos de formação de Cc, o que era esperado, visto que foi a amostra que apresentou menor profundidade carbonatada. Não houve também muita variação na intensidade dos picos de CH que mantiveram em todas as idades quase a mesma intensidade.

Já na amostra do CPIV-0,5 ficou bem evidente a redução dos picos de CH, que foram consumidos durante as reações de carbonatação bem como

pelas reações pozolânicas causadas pelas adições nesse cimento, o que faz com que seja considerada essa uma das hipóteses para justificar a maior profundidade carbonatada sobre o CPV-0,5 devido redução da reserva alcalina. Nota-se também o aumento na intensidade dos picos de Cc em todas as idades, percebe-se ainda, que o pico do CSH na posição 2θ igual a 26,6 foi o que apresentou maiores intensidades aos 9 meses; este aumento pode ser proveniente das reações pozolânicas que acarretam na formação de CSH.

4.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As Figuras Figura 48 a Figura 53 apresentam os resultados obtidos através da MEV para as três amostras, nas idades de 3 e 9 meses.

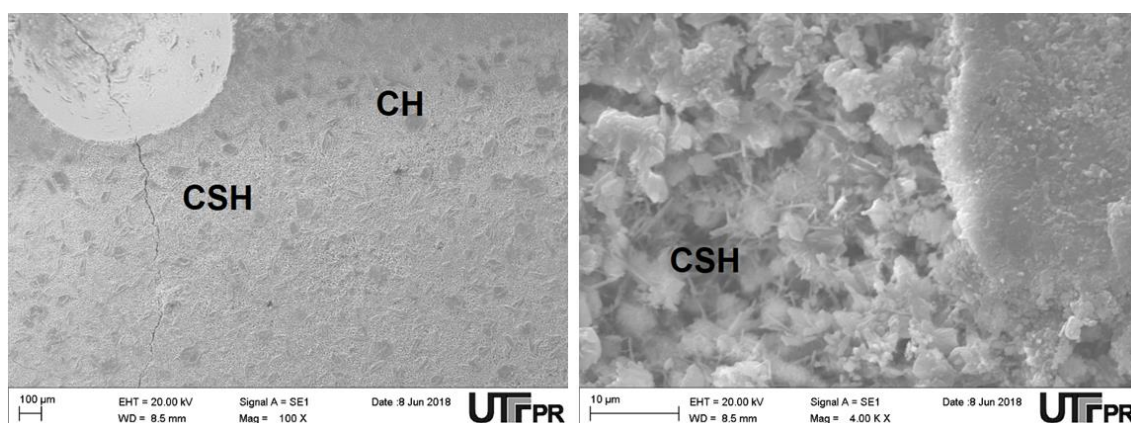


Figura 48 – MEV da amostra CPV-0,5 (3 meses)
Fonte: Autoria própria (2018).

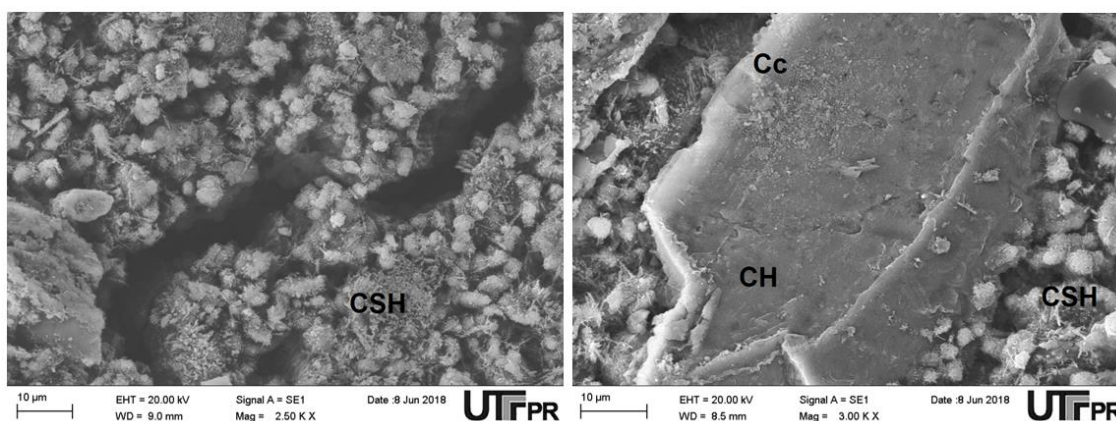


Figura 49 – MEV da amostra CPV-0,5 (9 meses)
Fonte: Autoria própria (2018).

Para as amostras do CPV-0,5 (Figuras Figura 48 e Figura 49) não está tão evidente a formação do carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio,

aparecendo com maior significância apenas o CSH. Isso pode ter sido ocasionado porque o grão da amostra que foi utilizado no ensaio, talvez não fosse de uma região carbonatada.

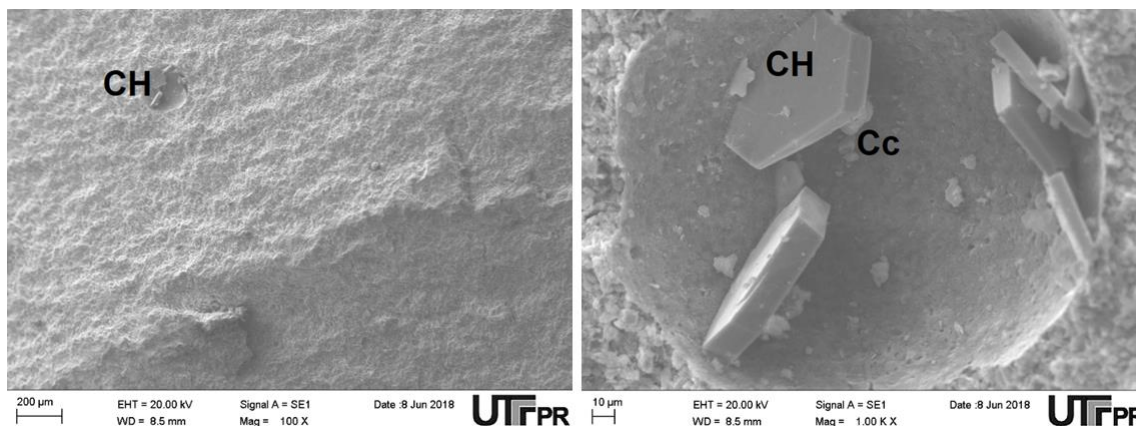


Figura 50 – MEV da amostra CPV-0,65 (3 meses)
Fonte: Autoria própria (2018).

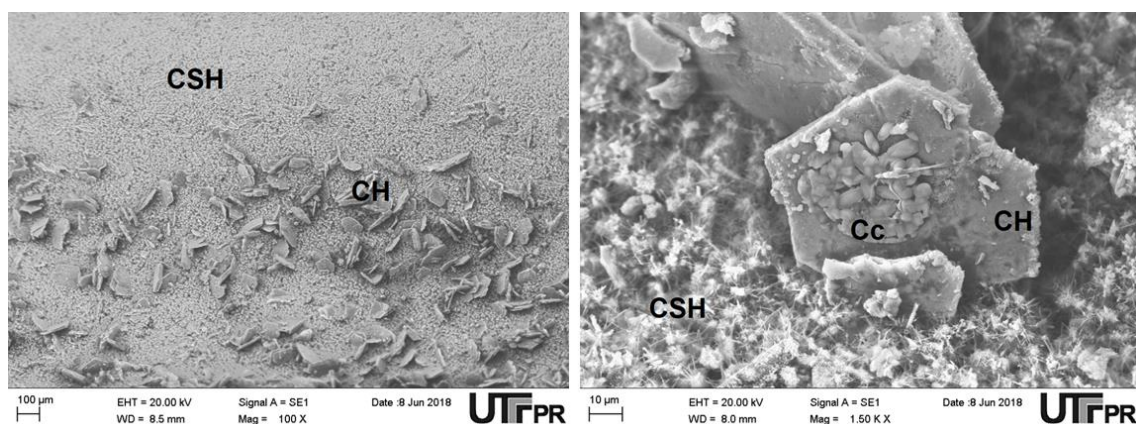


Figura 51 – MEV da amostra CPIV-0,5 (9 meses)
Fonte: Autoria própria (2018).

Já nas amostras do CPV-0,65, que apresentou maior profundidade de carbonatação, é possível verificar claramente a formação de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio aos 3 meses (Figura 50), verificando-se o desenvolvimento da formação do carbonato de cálcio com maior clareza aos 9 meses (Figura 51), justificando os resultados de picos mais elevados no DRX.

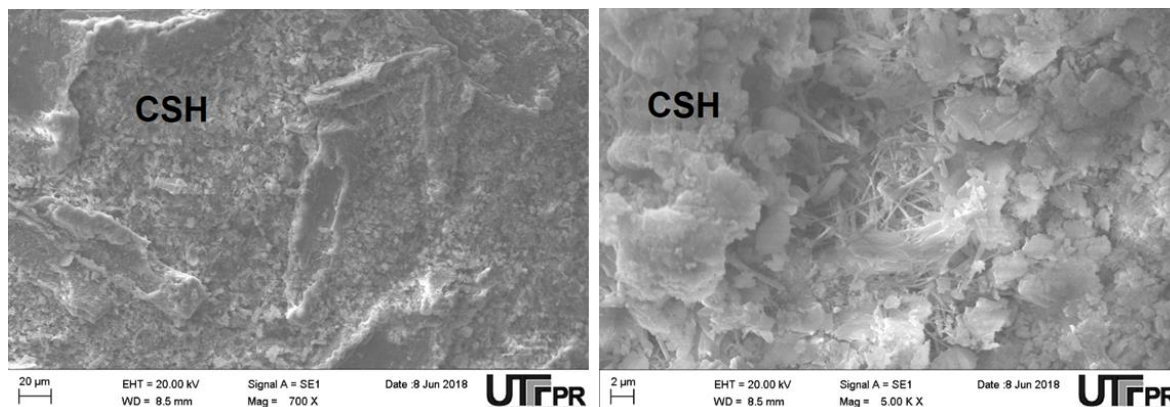


Figura 52 – MEV da amostra CPIV-0,5 (3 meses)
Fonte: Autoria própria (2018).

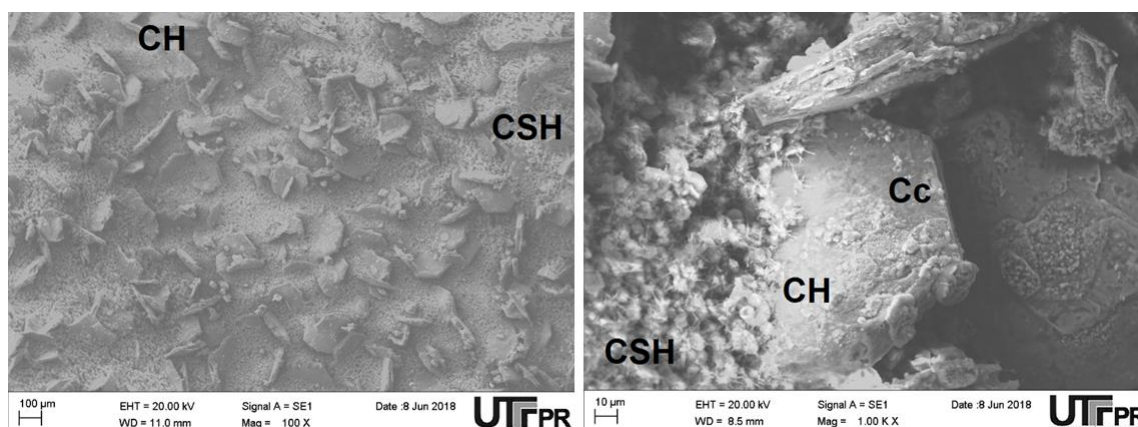


Figura 53 – MEV da amostra CPIV-0,5 (9 meses)
Fonte: Autoria própria (2018).

Por fim, a amostra de CPIV-0,5 (Figuras Figura 52 e Figura 53) apresenta uma estrutura bem mais densa que a de CPV-0,5 (Figuras Figura 48 e Figura 49) nas duas idades, devido ao refinamento dos poros causado pelas adições minerais, entretanto é bem evidente a maior carbonatação na amostra de CPIV-0,5 (Figura 53), já que pode-se verificar aos 9 meses uma elevada quantidade na formação de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio visivelmente superior à amostra de CPV-0,5 (Figura 49).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo dessa pesquisa foi contribuir nos estudos da carbonatação natural do cimento Portland em atmosfera natural, através da verificação da influência de alguns fatores como variação do tipo de cimento, relação água/cimento, influência da retração e da porosidade que contribuem com o avanço da carbonatação. Também foi relacionado os valores encontrados através da carbonatação natural com ensaios acelerados.

Através dos resultados verificou-se que o tipo de cimento não exerceu grande influência para o avanço da frente de carbonatação. O CPIV-0,5 apresentou uma profundidade de carbonatação ligeiramente superior quando comparado ao CPV-0,5, alcançando uma diferença de 0,46 mm (fenolftaleína) e 0,52 mm (timolftaleína) aos 9 meses. Esse comportamento semelhante ocorreu devido à sua composição química, que apesar de haver o refinamento dos poros, também ocorre a redução da reserva alcalina do concreto, consumida pelas reações pozolânicas oriundas das adições, fazendo com que ocorra o avanço às partes internas, visto que se esperava uma profundidade inferior de carbonatação no CPIV devido à barreira formada pelo refinamento dos poros.

O CPV-0,65 apresentou a maior profundidade carbonatada, que era esperado já que foi a amostra que apresentou o maior teor de absorção de água, entendendo-se que também foi a amostra com maior quantidade de poros, quando comparada com as outras duas, ou seja, com base nos resultados, a porosidade pode ser considerado o principal fator contribuinte na velocidade da frente de carbonatação, visto que a porosidade na matriz cimentícia é a responsável pelo avanço e difusão do CO₂. Ao se comparar com concretos a base de CPV-0,5 a diferença na profundidade de carbonatação foi de 3,6 mm para a fenolftaleína e 4,12 mm para a timolftaleína, aos 9 meses.

Verificou-se que os concretos com maiores relações água/cimento (CPV-0,65) apresentaram maior retração, que pode ter influenciado na velocidade de carbonatação já que foi o que apresentou maiores profundidades. Nos concretos com maiores teores de adições (CPIV-0,5) houve uma menor retração, entretanto a profundidade carbonatada foi superior ao de menor teor (CPV-0,5) que pode ter sido ocasionada devido a redução da reserva alcalina.

Através da análise microestrutural pela difração de raios-X (DRX) pode-se observar que em todas as amostras houve uma redução das quantidades de hidróxido de cálcio nas idades mais avançadas, que foram consumidas através das reações de carbonatação, formando carbonato de cálcio, que foi apresentando aumento das quantidades ao longo do tempo. Destaca-se que a amostra de CP IV apresentou maiores picos de CSH a cada idade resultante das reações pozolânicas.

Ao analisar e comparar os resultados obtidos através do ensaio de carbonatação natural e de carbonatação acelerada, é evidente que no ensaio acelerado as profundidades foram consideravelmente maiores que no natural, já que na atmosfera natural o teor de CO₂ pode variar de 0,03 a 1,2% dependendo do ambiente e no ambiente acelerado foi utilizada uma taxa para concentração de CO₂ de 5%. Encontrou-se que, se o desenvolvimento da carbonatação fosse regido pela equação encontrada no ensaio natural, levaria 364 dias para o ensaio natural atingir a profundidade encontrada em 30 dias do ensaio acelerado, que foi de 6,01 mm.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, J.C. **Tensões originadas pela retração em elementos de concreto com deformação restringida considerando-se o efeito da fluência**. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2011.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992.

ANDRADE, J.J.O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. 1997. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 1997.

ARANHA, P.M.S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica**. 1994. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 1994.

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. 2017. **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>> Acesso em: 25 de ago de 2017.

BAKKER, R. F. M. **Initiation period**. In: **Schiessl, P., ed. Corrosion of steel in concrete**. Cap. 3, p.22-55 . London, Chapman and Hall, 1988.

BAROGHEL-BOUNY, V; CUSSIGH, F.; ROUGEAU, P. **L'approche performantielle de la durabilité des bétons**. In: OLLIVIER, J., P.; VICHOT, A. (Eds.) *La durabilité des bétons*. Paris: Presses Ponts et Chaussées, 2008, p. 281-302.

BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção**. 471 p. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 1 v.

BOGUE, R.H. **Chemistry of portland cement**. Reinhold Publishing Corporation, 1947. New York.

CADORE, W.C. **Estudo da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Santa Maria, 2008.

CADORE, D.E. **Durabilidade de concretos à base de cimento álcali ativado: aspectos relacionados à carbonatação.** 2018. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2018.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto.** In: ISAIA, G. E. *Concreto: Ciência e Tecnologia.* 1. Ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011. V. 2. 1984p.

CASCUDO, O., HELENE P.R.L. **Resistência à corrosão no concreto dos tipos de armaduras brasileiras para concreto armado.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/272 – São Paulo: EPUSP, 2001. 20p.

DELLINGHAUSEN, L.M. **Retração total e penetração de cloretos em concretos com cimento Portland branco e escória de alto forno.** 2009. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Santa Maria, 2009.

FERREIRA, M.B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição.** 2013. 197 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás – UFG. Goiânia, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2003.

FIGUEIREDO, E.J.P., MEIRA G.R. **Corrosão das armaduras de concreto.** Boletim Técnico da Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – Mérida: ALCOMPAT, 2013. 30p.

HELENE, P.R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** São Paulo: PINI, IPT, 1986. 45 p.

HEWLETT, P.C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete.** 4 ed. Elsevier Science & Technology Books. 2004. 1057 p.

HO, D., LEWIS, R. **Carbonation of concrete and its prediction.**p.489-504.Cement and Concrete Research. 1987.

HYVERT, Nicolas. **Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton.** 2009. Tese de Doutorado. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.

ISAIA, G.C. **Carbonatação do concreto: uma revisão.** 41 p. Santa Maria, março 1999.

ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M.; GASTALDINI, A. **Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar.** In:

CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43. 2001, Foz de Iguaçu. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001.

ISAIA, G.C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 931 p. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

JUNIOR, A.N. **Captura de CO₂ em materiais cimentícios através de carbonatação acelerada**. 2014. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COOPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2014.

KAZMIERCZAK, C.S; LINDENMEYER, Z. **Comparação entre metodologias utilizadas para a determinação da profundidade de carbonatação em argamassas**. In: International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and quality of concrete structures. Proceedings. Florianópolis. 1996.

KOBUKU, M., NAGATAKI, S. **Carbonation of concrete with fly ash and corrosion of reinforcement in 20 years test**. In: MALHOTRA, V. M (ed.) International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 3rd, Trondheim, 1989. Proceedings... Detroit: American Concrete Institute, 1989, 2 v., v. 1, p. 315-329 (SP-114).

KONDO, R.; DAIMON, M.; AKIBA, T. **Mechanism and Rate of Carbonation in cement past**. Proc. V-ISCC, Part III, p. 402-409, 1968.

KULAKOWSKI, M.P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2002.

MEHTA, P. Kumar. **Durability of concrete--fifty years of progress**. Special Publication, v. 126, p. 1-32, 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. 573 p. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 674 p. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEYER, A. **Investigations on the carbonation of concrete**. In: Proc. of 5 th International Symposium on Cement Chemistry. 1969. p. 394-401.

MUNTEAN, A. et al. **A note on limitations of the use of accelerated concrete-carbonation tests for service-life predictions**. 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedade do concreto**. 828 p. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 448 p. 2 ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013.

NGALA, V. T.; PAGE, C. L. **Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes**. Cement and Concrete Research, v. 27, n. 7, p. 995-1007, 1997.

OSBORNE, G. J. **Carbonation of blastfurnace slag cement concretes**. Durability of building materials, v. 4, n. 1, p. 81-96, 1986.

PAPADAKIS, Vagelis G.; VAYENAS, Costas G.; FARDIS, Michael N. **Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation**. Materials Journal, v. 88, n. 4, p. 363-373, 1991.

PAPADAKIS, V.G.; FARDIS, M.N.; VAYENAS, C.G. **Hydration and carbonation of pozzolanic cements**. Materials Journal, v. 89, n. 2, p. 119-130, 1992.

PARROTT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. 40 p. London: Cement and Concrete Association, Building Research Station, 1987.

PARROT, L.J. **Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete**. Materials and Structures, v.29, n.187, p. 164 - 173, April 1996

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 2004. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2009.

PIRES, P.F. **Estudo da carbonatação avançada em concretos contendo adições minerais**. 2016. 144 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás – UFG. Goiânia, 2016.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 2004. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2004.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2010.

ROY, S. K.; BENG, P.K; NORTHWOOD, D. O. **The carbonation of concrete structures in the tropical environment of Singapore and a comparison with published data for temperate climates**. Magazine of Concrete Research, v. 48, n. 177, p. 293-300, 1996.

SENTLER, L. **Stochastic characterization of carbonation of concrete**. In: **Third International Conference on Durability of Building**. Materials and Components, Technical Research Centre of Finland, Espoo. 1984. p. 569-580.

SILVA, V.M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzidas**. 2007. 306 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 2007.

SILVA, N.G. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. 2011. 322 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2011.

SOUZA, A.R. **Retração em concreto autoadensável: Contribuição de produtos mitigadores**. 2016. 243 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2016.

TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura**. 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Santa Maria, 2012.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2 ed. Telford, 1997. 459 p.

THIERY, M. **Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons– Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique**. Paris: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. These de doctorat, 2005.

VENQUIARUTO, S.D.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. **A influência do teor e da quantidade de adições minerais na carbonatação do concreto**. In: Congresso Brasileiro do Cimento, 43º, Foz do Iguaçu. 2001.

VIEIRA, F.M.P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. 2003. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2003.

ANEXO I

Figura 54 - Metodologias empregadas nos estudos de carbonatação no Brasil

Pesquisador	Ano	Amostras forma/dimensão (mm)	a/agl	Tipo de cura Tempo de cura (dias)	Precondicionamento Tempo/local	UR (%)	T (°C)	CO ₂ (%)	Tempo de exposição (dias)
Nepomuceno	(1992)	prismas 20x55x80	-	úmida/ao ar 1, 7 e 28	70 dias laboratório	entre 50 e 70	20	100	variável
Isaia	(1995)	cilindros 100x100	0,30 a 0,50	úmida 7	28 dias laboratório	-	-	10	28, 56, 84 e 112
Sierra	(1996)	cilíndricos 100x200		submersa 7		maior que 80	24	5	
Vaghetti	(1999)	cilindros 100x100	0,35 a 0,55	úmida 7	21 e 84 laboratório	entre 50 e 80	23	10	28, 56, 84 e 112
Lopes	(1999)	cilindros 100x200	0,38 a 0,48	úmida 7 e 28	22 e 43 laboratório	55	27	100	7, 14, 21, 28 e 35
Alves	(2000)	cilindro 100x70	0,35 a 0,65	úmida 7	21 dias laboratório	80	24	5	28, 56 e 84
Cunha e Helene	(2001)	prismas 279x152x114	0,35 a 0,65	úmida 28	15 dias laboratório	65	23,5	100	2h/2h, a/c=0,35 4h/4h, a/c=0,65
Levy	(2001)	Cubos 100		úmida 14	Lab. Até 182 dias	60±15	29	12	14 e 28
Isaia, Vaghetti, Gastaldini	(2001)	Cilindros 100x100	0,33 a 0,57	Úmida 7	Lab. até completar 28 dias	60 a 70	20 a 26	10	8, 12, 16, 20 semanas
Isaia, Vaghetti, Gastaldini	(2001)	Cilindros 100x100	0,33 a 0,57	Úmida 7	-	40 a 90	12 a 35	natural	0,5, 1 e 2 anos
Venquiaruto	(2002)	cilindros 100x70	0,35 a 0,65	úmida 7	35 dias laboratório/ estufa RILEM				

Fonte: Pauletti (2009).

Continuação

Pesquisador	Ano	Amostras forma/ dimensão (mm)	a/agl	Tipo de cura Tempo de cura (dias)	Precondiciona- mento Tempo/local	UR (%)	T (°C)	CO₂ (%)	Tempo de exposição (dias)
Kulakowski	(2002)	prismas 100x100x300	0,30 a 0,80	úmida amostras embaladas 14	14 dias câmara precond.	70	25	5	35, 56, 91 e 126
Coelho <i>et al.</i>	(2002)	cilindros 100x200	-	úmida 28	35 dias laboratório	entre 60 e 70	26	100	77 e 91
Silva	(2002)	cilindros 50x100	0,45	úmida 7	Sem precond.	60	25	100	7, 14, 28, 63 e 91
Vieira	(2003)	prismas 100x100x60	0,40 a 0,70	úmida 28	7 dias estufa (50°C), 14 dias em sala clim.	70	25	≥50	24 e 96h depois a cada semana até 23 sem.
Kirchheim	(2003)	prismas 60x60x180	0,40 a 0,60	úmida 28	até constância câmara precond.	70	25	100	
Stumpp	(2003)	cilindros 100x70	0,35 a 0,55	úmida 7	RILEM	75	22	5	4, 8, 12 semanas
Sperb	(2003)	cilindros 100x70	0,35 a 0,65	úmida 7	RILEM	75	23	10	4, 8, 12 semanas
Abreu	(2004)	prismas 100x100x60	0,44 a 0,65	úmida 28	32 dias câmara precond.	70	25	5 e <50	63 e 195
Bourguignon	(2004)	cilindros 100x200	0,40 a 0,75	úmida 15	49 dias seca – UR 50%	65	26	95	14 e 28
Figueiredo	(2004)	Testemunhos de estruturas reais				60		100	1h
Dalla Lana	(2005)	cilindros 100x50	0,4 a 0,8	Sacos aniagem 7d Natural 49d	RILEM	75	22	5	4, 8, 12 semanas
Hoppe Filho	(2008)	cilindros 80x150	0,35 a 0,65	úmida 28	RILEM	75	20	5	4, 8, 12, 16 e 20 semanas
Barin	(2008)	cilindros 100x65	0,30 a 0,55	úmida 7	RILEM	75	23	2	3, 6, 9 e 12 semanas

Continuação

Pesquisador	Ano	Amostras forma/dimensão (mm)	a/agl	Tipo de cura Tempo de cura (dias)	Precondicionamento Tempo/local	UR (%)	T (°C)	CO ₂ (%)	Tempo de exposição (dias)
Cadore	(2008)	cilindros 100x50	0,3 a 0,8	Sacos aniagem 7d Natural 90 e 300d	RILEM	75	22	5 natural	4 à 12 semanas 91 e 300 dias
Hoppe	(2008)	cilindros 100x66,7	0,45 a 0,65	úmida 7	RILEM	75	23	5	3, 6, 9 e 12 semanas

Figura 55 - Metodologias empregadas nos estudos de carbonatação no Exterior

Pesquisador	Ano	Amostras forma/dimensão (mm)	a/agl	Tipo de cura Tempo de cura (dias)	Precondicionamento Tempo/local	UR (%)	T (°C)	CO ₂ (%)	Tempo de exposição (dias)
Tuutti	(1982)	-	0,40 e 0,70	submersa 7	6 meses laboratório	80	-	1	90
Ho e Lewis	(1987)	prismas 75x75x300	-	úmida 1, 7, 28, 91 e 365	21 dias laboratório	50	23	4	7, 28, 63 e 112
Fattuhi	(1988)	prismas 50x50x285	-	submersa/ao ar 28		entre 50 e 70	entre 20 e 26	100	-
Dhir <i>et al.</i>	(1989)	cubos 100	-	úmida/ao ar 28	14 dias laboratório	50	20	4	140
Ohga e Nagataki	(1989)	prismas 100x100x300	-	submersa 7, 28 e 91		50	40	7	a cada 7 dias
Papadakis <i>et al.</i>	(1991b)	prismas 100x100x300	0,50 a 0,80	úmida 90	- estufa	35, 45, 55, 65, 70 e 85	22, 30 e 42	50	1, 3, 5, 10, 15 e 20
Branca <i>et al.</i>	(1993)	cubos 100	0,35 a 0,65	úmida 7	-	75	20	30	-

Fonte: Pauletti (2009).

Continuação

Pesquisador	Ano	Amostras forma/ dimensão (mm)	a/agl	Tipo de cura Tempo de cura (dias)	Precondiciona- mento Tempo/local	UR (%)	T (°C)	CO₂ (%)	Tempo de exposição (dias)
Uomoto e Takada	(1993)	Cilindros 100x200	0,50 a 0,70	Submersa 0 a 5	Não fizeram	55	20	0,07, 1, 10	1, 4, 8, 13, 26 semanas
Balayssac <i>et al.</i>	(1995)	cilindros 110x100	-	submersa/ao ar 1, 3 e 28	-	60	20	0,03	-
Rougeau	(1997)	cilíndricos 160x320		úmida 28	2 dias à 40 °C ou 11d, 20°C, 65%UR	65	20	1, 5, 20, 50, 70, 100	7, 14 e 28
Roy <i>et al.</i>	(1999)	prismas 100x100x500	0,55 a 0,75	submersa 7		52, 64, 75, 84 e 92		6	7, 28, 56 e 112
Jiang <i>et al.</i>	(2000)	prismas 100x100x200	-	-		70	20	20	-
Sanjuán e Del Olmo	(2001)	cilindros 75x150	-	submersa 28	-	70	-	5, 20 e 100	-
Lo e Lee	(2002)	cilindros 100x200	0,38 a 0,54	submersa/ao ar 28	-	-	21	2	30, 60 e 90
Thiery	(2005)	Cilindros 50-100x110	0,48 a 0,84	úmida 91	45°C por 30 dias	53	21	50	14 e 28
Khunthongkeaw <i>et al.</i>	(2006)			submersa 28		55	40	4	

APÊNDICE A

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

TRAÇO	AMOSTRAS	28 DIAS	3 MESES	6 MESES	9 MESES
CPV-0,5	CP1	37,43	39,32	49,02	41,95
	CP2	35,03	37,54	44,56	45,67
	CP3	37,65	38,43	49,66	41,05
	MÉDIA CP	36,70	38,43	47,75	42,89
	DESVIO PADRÃO	1,46	0,89	2,77	2,45
	COEF. VARIÂNCIA	3,97%	2,32%	5,81%	5,71%
CPV-0,65	CP4	23,22	27,87	34,38	27,37
	CP5	23,25	24,65	34,38	31,05
	CP6	23,35	28,46	32,47	32,17
	MÉDIA CP	23,27	26,99	33,74	30,20
	DESVIO PADRÃO	0,07	2,05	1,10	2,51
	COEF. VARIÂNCIA	0,29%	7,59%	3,27%	8,31%
CPIV-0,5	CP7	28,44	32,09	44,56	43,38
	CP8	29,34	34,80	45,20	42,72
	CP9	32,62	34,61	45,84	41,48
	MÉDIA CP	30,13	33,83	45,20	42,53
	DESVIO PADRÃO	2,20	1,51	0,64	0,96
	COEF. VARIÂNCIA	7,30%	4,47%	1,41%	2,26%

ABSORSÃO DE ÁGUA

TRAÇO		28 DIAS	3 MESES	6 MESES	9 MESES
CPV-0,5	PESO SECO (g)	628,14	1700,50	1398,20	1861,00
	PESO SATURADO (g)	653,38	1765,50	1444,50	1976,50
	AA	4,02%	3,82%	3,31%	6,21%
CPV-0,65	PESO SECO (g)	575,60	896,00	1582,20	1478,50
	PESO SATURADO (g)	622,04	952,00	1664,50	1590,50
	AA	8,07%	6,25%	5,20%	7,58%
CPIV-0,5	PESO SECO (g)	666,32	1454,50	1440,60	1671,50
	PESO SATURADO (g)	696,87	1516,50	1498,50	1778,50
	AA	4,58%	4,26%	4,02%	6,40%

VARIAÇÃO DIMENSIONAL E DE MASSA

		inicial	3 dias	7 dias	11 dias	14 dias	19 dias	24 dias	28 dias
		18/ago	21/ago	25/ago	29/ago	01/set	06/set	11/set	15/set
CPV - 0,5	B. Padrão	4,001	4,026	4,037	4,013	4,028	4,013	4,039	4,075
	AM1	6,700	6,715	6,712	6,712	6,7	6,707	6,7	6,775
	massa	3982	3985	3988	3988,5	3989,5	3985	3967,5	3966
	diferença	2,699	2,689	2,675	2,699	2,672	2,694	2,661	2,700
	AM2	7,421	7,487	7,497	7,473	7,443	7,435	7,502	7,509
	massa	4016,5	4021,5	4023,5	4023	4023	4019,5	4003,5	4000,5
	diferença	3,420	3,461	3,460	3,460	3,415	3,422	3,463	3,434
	AM3	4,601	4,583	4,607	4,592	4,586	4,617	4,601	4,711
	diferença	0,600	0,557	0,570	0,579	0,558	0,604	0,562	0,636
CPV - 0,65	AM4	6,318	6,324	6,334	6,325	6,316	6,316	6,305	6,391
	massa	3838,5	3830,5	3833,5	3832,5	3832,5	3827,5	3811	3808,5
	diferença	2,317	2,298	2,297	2,312	2,288	2,303	2,266	2,316
	AM5	7,923	8,019	7,990	8,014	7,930	7,928	7,961	7,975
	massa	3759	3754,5	3753,5	3751,5	3750,5	3748,5	3732,5	3730,5
	diferença	3,922	3,993	3,953	4,001	3,902	3,915	3,922	3,900
	AM6	6,635	6,554	6,539	6,563	6,533	6,549	6,543	6,629
diferença	2,634	2,528	2,502	2,550	2,505	2,536	2,504	2,554	
CPV - 0,5	AM7	8,394	8,391	8,392	8,404	8,365	8,463	8,382	8,428
	massa	3960,6	3961	3964,5	3964,5	3963,5	3963,5	3943,5	3942,5
	diferença	4,393	4,365	8,392	8,404	8,365	8,463	8,382	8,428
	AM8	5,519	5,514	5,517	5,502	5,514	5,529	5,497	5,550
	massa	4006,5	4005,5	4007,5	4008	4007,5	4008	3988	3989
	diferença	1,518	1,488	5,517	5,502	5,514	5,529	5,497	5,550
	AM9	6,319	6,314	6,326	6,320	6,325	6,327	6,312	6,384
diferença	2,318	2,288	2,289	2,307	2,297	2,314	2,273	2,309	

		35 dias	47 dias	54 dias	66 dias	70 dias	80 dias	88 dias	95 dias
		22/set	04/out	11/out	23/out	27/out	06/nov	14/nov	21/nov
CPIV - 0,5	B. Padrão	4,08	4,048	4,035	4,065	4,048	4,046	4,036	4,017
	AM1	6,722	6,725	6,594	6,688	6,681	6,677	6,648	6,61
	massa	3927,5	3929,5	3961	3911,5	3997	3958	3968	3900,5
	diferença	2,642	2,677	2,559	2,623	2,633	2,631	2,612	2,593
	AM2	7,462	7,468	7,412	7,419	7,401	7,407	7,372	7,326
	massa	3955,5	3958	3990,5	3943,5	4030,5	3989	4000	3932,5
	diferença	3,382	3,420	3,377	3,354	3,353	3,361	3,336	3,309
	AM3	4,628	4,631	4,494	4,595	4,586	4,571	4,560	4,510
	massa	3997,5	3999	4030,5	3984	4071,5	4028,5	4040,5	3972
diferença	0,548	0,583	0,459	0,530	0,538	0,525	0,524	0,493	
CPV - 0,65	AM4	6,343	6,288	6,199	6,295	6,288	6,275	6,266	6,212
	massa	3742,5	3742	3770,5	3724,5	3807	3766	3774,5	3710
	diferença	2,263	2,240	2,164	2,230	2,240	2,229	2,230	2,195
	AM5	7,968	7,931	7,890	7,923	7,889	7,883	7,873	7,812
	massa	3668	3660	3686,5	3641	3721,5	3681	3689,5	3626
	diferença	3,888	3,883	3,855	3,858	3,841	3,837	3,837	3,795
	AM6	6,569	6,568	6,431	6,510	6,520	6,506	6,493	6,439
	massa	3896,5	3888,5	3917,5	3866,5	3952	3910	3919	3852,5
diferença	2,489	2,520	2,396	2,445	2,472	2,460	2,457	2,422	
CPV - 0,5	AM7	8,413	8,390	8,26	8,346	8,352	8,344	8,327	8,298
	massa	3896	3897,5	3925,5	3874,5	3961	3919,5	3931,5	3864,5
	diferença	8,413	8,390	8,260	8,346	8,352	8,344	8,327	8,298
	AM8	5,547	5,531	5,396	5,491	5,489	5,505	5,469	5,410
	massa	3948,5	3944	3973	3922	4007	3965	3978,5	3910,5
	diferença	5,547	5,531	5,396	5,491	5,489	5,505	5,469	5,410
	AM9	6,333	6,317	6,192	6,321	6,296	6,293	6,276	6,223
	massa	3922,5	3925	3953	3904,5	3989,5	3949	3962	3894,5
diferença	2,253	2,269	2,157	2,256	2,248	2,247	2,240	2,206	

		105 dias	130 dias	150 dias	165 dias	182 dias	201 dias	222 dias
		01/dez	26/dez	15/jan	30/jan	16/fev	08/mar	29/mar
CPV - 0,5	B. Padrão	4,012	4,005	4,007	4,008	4,045	4,013	4,027
	AM1	6,61	6,629	6,622	6,62	6,681	6,613	6,642
	massa	3912	3958	4026,5	4013	3997	3947	4001
	diferença	2,598	2,624	2,615	2,612	2,636	2,600	2,615
	AM2	7,351	7,367	7,386	7,361	7,402	7,353	7,383
	massa	3943,5	3991,5	4061	4053	4037	3982,5	4036,5
	diferença	3,339	3,362	3,379	3,353	3,357	3,340	3,356
	AM3	4,519	4,513	4,528	4,542	4,591	4,531	4,568
	diferença	0,507	0,508	0,521	0,534	0,546	0,518	0,541
CPV - 0,65	AM4	6,219	6,281	6,228	6,218	6,286	6,204	6,249
	massa	3720	3774	3833,5	3814	3798,5	3747,5	3799,5
	diferença	2,207	2,276	2,221	2,210	2,241	2,191	2,222
	AM5	7,826	7,858	7,870	7,864	7,897	7,814	7,883
	massa	3635	3686,5	3748,5	3729,5	3709	3659,5	3709,5
	diferença	3,814	3,853	3,863	3,856	3,852	3,801	3,856
	AM6	6,434	6,410	6,460	6,455	6,516	6,434	6,488
	diferença	2,422	2,405	2,453	2,447	2,471	2,421	2,461
CPV - 0,5	AM7	8,264	8,241	8,304	8,287	8,324	8,274	8,315
	massa	3874	3911,5	3979,5	3964,5	3948	3899	3950
	diferença	8,264	8,241	8,304	8,287	8,324	8,274	8,315
	AM8	5,420	5,494	5,426	5,429	5,471	5,412	5,449
	massa	3920	3949,5	4019	4006,5	3991	3941,5	3991,5
	diferença	5,420	5,494	5,426	5,429	5,471	5,412	5,449
	AM9	6,204	6,254	6,239	6,237	6,292	6,221	6,258
	diferença	2,192	2,249	2,232	2,229	2,247	2,208	2,231

		243 dias	251 dias	270 dias
		19/abr	27/abr	16/mai
CPV - 0,5	B. Padrão	4,029	4,026	4,022
	AM1	6,615	6,599	6,589
	massa	3934,5	3888,5	3898,5
	diferença	2,586	2,573	2,567
	AM2	7,349	7,342	7,355
	massa	3968	3921,5	3931,5
	diferença	3,320	3,316	3,333
	AM3	4,551	4,532	4,524
	massa	4006	3960	3968,5
diferença	0,522	0,506	0,502	
CPV - 0,65	AM4	6,211	6,191	6,192
	massa	3732,5	3689,5	3696,5
	diferença	2,182	2,165	2,170
	AM5	7,825	7,846	7,849
	massa	3641,5	3599	3606,5
	diferença	3,796	3,820	3,827
	AM6	6,441	6,420	6,428
	massa	3867,5	3823,5	3830
diferença	2,412	2,394	2,406	
CPV - 0,5	AM7	8,289	8,261	8,312
	massa	3881	3837	3844
	diferença	8,289	8,261	8,312
	AM8	5,415	5,408	5,413
	massa	3923,5	3880	3884,5
	diferença	5,415	5,408	5,413
	AM9	6,224	6,213	6,211
	massa	3910,5	3867	3869
diferença	2,195	2,187	2,189	