



**VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO DO
CONCRETO NA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS
ULTRASSÔNICAS**

SÃO PAULO
2018



BRENO PIMENTA DELLING

DANIEL MARIANO CUANI

**VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO DO
CONCRETO NA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS
ULTRASSÔNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em Patologia das Obras Cíveis, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Cíveis.

Orientador: Msc. Luis César Siqueira de Luca.

SÃO PAULO
2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao Eng. MsC. Flávio Munhoz (ABCP), por tornar este experimento possível, pela parceria científica, auxílio técnico e desenvolvimento conjunto nos ensaios desenvolvidos nessa pesquisa.

Ao Prof. Msc. Luis César Siqueira de Luca, pela excelente orientação técnica, apoio e disponibilidade.

A Eng. Cynthia Victoria Brock Maida, pelo apoio, parceria e valiosas indicações.

Aos Pais Valquiria Mendes Mariano Cuani e José Manoel Cuani, que sempre encorajaram a superar os obstáculos da vida e são exemplos de seres humanos.

Aos avós Otalício Mariano Filho (in memorian), Magaly Mendes Mariano (in memorian), Silvio Cuani (in memorian) e Helena Cuani (in memorian) pelos ensinamentos, passados diretamente os através dos seus filhos, e pelas lembranças, que os farão sempre vivos.

Ao irmão Lucas Cuani, o melhor amigo que alguém poderia ter.

Aos mestres Marcela Barros de Souza Sollero e Rodrigo Tadeu dos Santos, por serem profissionais da mais alta qualidade, por serem excelentes e incansáveis guias na extensa trilha que é a engenharia civil, e acima de tudo, por serem estimados amigos.

A Ana Maria Sandoval de Medeiros, por me mostrar uma felicidade que eu desconhecia.

RESUMO

O gás CO₂ é um dos grandes agentes de degradação das estruturas de concreto. Estas, em contato com este gás, estão sujeitas ao fenômeno da carbonatação, que reduz a alcalinidade do concreto e desestabiliza a camada protetora do aço, tornando-a passível de corrosão. Dentre os mais diversos tipos de ensaios não destrutivos "END" para detectar anomalias, destaca-se a ultrassonografia do concreto. Técnicas não destrutivas baseadas na propagação de ondas de ultrassom vêm sendo cada vez mais utilizadas para avaliação da homogeneidade do concreto em peças estruturais. Neste contexto, este trabalho possui como objetivo verificar a influência da carbonatação do concreto na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas do mesmo. Por meio de um programa experimental foram moldados quinze corpos de prova de concreto de mesmo traço (1:1,08:1,92), variando apenas o fator água/cimento, divididos em três grupos: a/c 0,45, a/c 0,55 e a/c 0,65. Os corpos de prova foram submetidos à câmara de carbonatação acelerada e posteriormente ao ensaio de ultrassom conforme o avanço da carbonatação no concreto. Para a análise, fatiaram-se os corpos de prova com espessura aproximada de 3 cm para posterior aspersão do indicador químico fenolftaleína diluída na face do concreto, possibilitando a visualização da região carbonatada. Os resultados obtidos possibilitaram observar uma variação na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas através do concreto carbonatado. Observou-se também que houveram maiores variações na velocidade da onda ultrassônica nos corpos de prova com maior fator água/cimento.

Palavras chave: concreto, carbonatação, ultrassom, patologia.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Concentração de CO ₂ na atmosfera.	9
Figura 2 - Esquematização do Fenômeno da Carbonatação.	16
Figura 3 - Representação do Avanço da Frente de Carbonatação.....	17
Figura 4 - Representação esquemática da difusão do CO ₂	20
Figura 5 - Correlação entre o coeficiente de carbonatação natural e o teor de hidróxido de cálcio remanescente para nível de resistência de 70MPa.	23
Figura 6 - Tipos de Transmissão no Ensaio de Ultrassom.....	27
Figura 7 - Influência do Tipo de Agregado na Relação entre V e Resistência à Compressão do Concreto.....	31
Figura 8 - Relações entre V e Resistência à Compressão de Concretos com Composições Diferentes e Ensaados em Diferentes Idades.....	32
Figura 9 - Relação entre V e Idade, Resistência à Compressão e Idade para Concretos com Teores e Tipos de Cimento e Temperatura de Cura Diferentes..	34
Figura 10 - Influência de Barras Transversais ao Percorso da Onda.	36
Figura 11 - Influência de Barras Transversais ao Percorso da Onda.	37
Figura 12 – Evolução da Frente de Carbonatação. 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a semana, A/C 0,45.	39
Figura 13 – Evolução da Frente de Carbonatação. 4 ^a , 5 ^a e 6 ^a semana, A/C 0,45.	40
Figura 14 – Evolução da Frente de Carbonatação. 7 ^a semana, A/C 0,45.....	40
Figura 15 – Evolução da Frente de Carbonatação. 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a semana, A/C 0,55.	41
Figura 16 – Evolução da Frente de Carbonatação. 4 ^a , 5 ^a e 6 ^a semana, A/C 0,55.	41
Figura 17 – Evolução da Frente de Carbonatação. 7 ^a semana, A/C 0,55.....	42
Figura 18 – Evolução da Frente de Carbonatação. 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a semana, A/C 0,65.	42
Figura 19 – Evolução da Frente de Carbonatação. 4 ^a , 5 ^a e 6 ^a semana, A/C 0,65.	43
Figura 20 – Evolução da Frente de Carbonatação. 7 ^a Semana, A/C 0,65.	43

Figura 21 – Evolução da Frente de Carbonatação.....	46
Figura 22 – Velocidade do pulso ultrassônico ao longo do ensaio de carbonatação - A/C 0,45.	50
Figura 23 – Velocidade do pulso ultrassônico ao longo do ensaio de carbonatação - A/C 0,55.	50
Figura 24 – Velocidade do pulso ultrassônico ao longo do ensaio de carbonatação - A/C 0,65.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correlação entre a velocidade de propagação do pulso ultrassônico com a qualidade do concreto.	28
Tabela 2 – Profundidade de carbonatação dos corpos de provas durante período de ensaio	45
Tabela 3 – Pesagem dos corpos de provas durante período de ensaio	47
Tabela 4 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas – Valores de referencia	48
Tabela 5 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas ao longo do ensaio de carbonatação	49
Tabela 6 – Qualidade do concreto quanto à compacidade e homogeneidade	52

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	9
1.1.	PROBLEMA DE PESQUISA.....	10
1.2.	OBJETIVOS	11
1.2.1.	Objetivo Geral	11
1.2.2.	Objetivos Específicos	11
1.3.	HIPÓTESE.....	11
1.4.	JUSTIFICATIVAS	11
1.4.1.	Tecnológicas.....	12
1.4.2.	Econômicas	12
1.4.3.	Sociais	13
1.4.4.	Ecológicas	13
1.5.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	14
1.6.	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	14
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1.	CARBONATAÇÃO	15
2.2.	FATORES QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO	19
2.2.1.	Concentração de CO ₂	19
2.2.2.	Umidade Relativa do Ar.....	20
2.2.3.	Temperatura do Meio	21
2.2.4.	Tipo do Cimento.....	21
2.2.5.	Porosidade	22
2.2.6.	Teor de Hidróxido de Cálcio	23
2.2.7.	Processo de Cura	24
2.3.	MÉTODO DO ULTRASSOM.....	24
2.3.1.	Descrição do Método.....	25
2.3.2.	Aplicações	28
2.3.3.	Acurácia	29
2.3.4.	Fatores que Influenciam os Resultados	30
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
3.1.	MATERIAIS	38
3.1.1.	Tipo do Cimento e Agregado	38
3.1.2.	Moldagem e Traço do Concreto	38
3.2.	CARBONATAÇÃO ACELERADA	39
3.3.	TESTE DE ULTRASSOM	43

4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
4.1.	ENSAIO COLORIMÉTRICO PARA DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA CARBONATADA DO CONCRETO	45
4.2.	PERDA DE MASSA DOS CORPOS DE PROVA	46
4.3.	ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE ULTRASSÔNICA ATRAVEZ DO CONCRETO.....	48
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
5.2.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

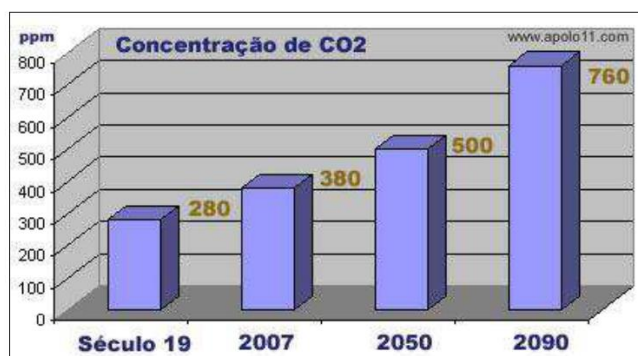
1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais difundido no setor da construção civil, devido às suas características benéficas na execução de obras. Dentre essas, destaca-se a durabilidade, uma vez que é responsável pela elevada vida útil das estruturas. A durabilidade do concreto está relacionada a diversos fatores: desde a composição da microestrutura até as condições ambientais de exposição. A matriz cimentícia e o aço presentes nas estruturas de concreto armado ou protendido sofrem com as ações físicas e químicas provocadas pelo meio ambiente, podendo desencadear, dentre outras manifestações patológicas: o processo de corrosão nas armaduras, ocasionado, principalmente, pela penetração de cloretos e, conforme se trata em especial neste trabalho, também pela penetração do anidrido carbônico (CO_2), (TASCA, 2014).

O gás carbônico se origina da queima de combustíveis fósseis, sobretudo, por causa dos setores de transporte e industrial. Na construção civil, a indústria cimenteira se destaca pela elevada emissão do gás em sua produção (UNEP, 2012).

De acordo com Tasca (2014), o gás CO_2 é um dos grandes agentes de degradação das estruturas de concreto, sendo prejudicial à construção civil. Esse problema tem se agravado pelo aumento do teor de CO_2 na atmosfera, que vem crescendo em escala exponencial, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Concentração de CO_2 na atmosfera.



Fonte: (<https://www.apolo11.com/relogiocarbonico.php>).

Dentre as mais diversas anomalias no concreto, destaca-se o fenômeno da carbonatação, que por sua vez, consiste no processo físico-químico entre o gás carbônico (CO_2) presente na atmosfera e compostos da pasta de cimento presentes no concreto. O resultado deste processo é a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) e a constituição de uma camada no concreto que passa do pH alcalino para neutro, suscetível a corrosão da armadura (PARROT, 1987; NEVILLE, 1997).

A tendência mundial de ampliação das emissões de CO_2 na atmosfera traz consequências diretas às estruturas de concreto construídas em ambiente urbano, pois a profundidade carbonatada aumenta com a elevação da concentração desse gás no ambiente (PARROT, 1987; NEVILLE, 1997).

Diante desse cenário, dentre os mais variados meios de diagnóstico patológicos do concreto, há o método do ultrassom, baseado no princípio que a velocidade da onda ultrassônica no concreto depende das propriedades do material testado (BUNGEY, 1989).

A ideia de que o ensaio de ultrassonografia é um eficiente procedimento para a determinação da integridade física e homogeneidade do concreto de cimento Portland é unânime no meio científico (COSTA, 2004). Neste contexto o presente trabalho objetivou verificar, através de um programa experimental, o grau de influência da profundidade da frente de carbonatação do concreto sobre a velocidade da onda ultrassônica.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas através do concreto pode ser influenciada pelo fenômeno da carbonatação?

1.2. OBJETIVOS

Neste item apresentam-se o objetivo geral e os específicos da pesquisa a ser desenvolvida.

1.2.1. Objetivo Geral

Verificar a influência do fenômeno da carbonatação na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no concreto.

1.2.2. Objetivos Específicos

Comparar a profundidade de carbonatação de concretos com diferentes relações água/cimento.

Comparar a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas através de concretos com diferentes relações água/cimento.

Verificar a influência da perda de água dos corpos de prova na velocidade de propagação de ondas.

1.3. HIPÓTESE

Pressupõe-se que a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas através do concreto seja alterada com a presença de carbonato de cálcio em seus poros.

1.4. JUSTIFICATIVAS

Neste item apresentam-se as justificativas para a pesquisa, a saber: tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas.

1.4.1. Tecnológicas

No último século, o concreto foi um dos materiais mais utilizados no nosso país e continuará sendo por um bom período. Desde o seu aparecimento que ele é utilizado com o propósito de fornecer à construção a necessária resistência, economia e facilidade de execução, inexistindo uma preocupação maior com sua durabilidade (COSTA, 2004).

Com a tecnologia em constante avanço, os equipamentos para realização de ensaios não-destrutivos em concreto armado têm sido cada vez mais utilizados na obtenção do diagnóstico estrutural.

1.4.2. Econômicas

A indústria da construção civil contribui com aproximadamente 10% do valor do PIB brasileiro e é considerada como referência na política de crescimento na oferta de emprego, por contratar pessoal de diversos graus de escolaridade e capacitação profissional. O trabalhador deste setor geralmente apresenta baixa qualificação, necessitando sempre de um acompanhamento permanente (COSTA, 2004).

O diagnóstico de uma estrutura depende da obtenção de resultados de ensaios, sejam destrutivos, não destrutivos, *in loco* ou laboratoriais. Ensaios laboratoriais necessitam de retiradas de amostras e tempo para que estas sejam devidamente ensaiadas. Ensaios *in loco* geram uma economia de tempo e dinheiro, uma vez que os resultados são gerados instantaneamente e não necessitam de uma estrutura laboratorial complexa.

Os dados obtidos precisam de uma alta taxa de confiabilidade, para que a estrutura seja diagnosticada corretamente, gerando terapias precisas e menos gastos com produtos paliativos.

1.4.3. Sociais

O diagnóstico correto de um problema estrutural é de extrema importância para os usuários da edificação. Afim de evitar a leitura errônea do ultrassom gerando um alto risco para os usuários, este trabalho irá contribuir para a segurança do diagnostico utilizando o ultrassom.

O diagnóstico correto leva à uma recuperação eficiente. Caso resultados de ensaios apresentem valores discordantes com a realidade da estrutura, medidas de prevenção/recuperação podem ser tomadas de forma errônea, não sanando o problema da edificação, além de gerar uma falsa sensação de segurança.

1.4.4. Ecológicas

A tendência do mundo moderno é ter uma visão ecologicamente correta e sustentável. Logo, um projeto só é viável se atender a esses requisitos.

Na construção civil, onde se trabalha com grandes volumes de materiais, cada detalhe conta para que não haja retrabalho ou desperdício.

Reparos estruturais têm de ser precisos, uma vez que cada tipo de anomalia requer tratamentos específicos. Para cada tratamento existem materiais que atendem as especificações. Materiais indevidamente indicados acabam não tendo uma boa vida útil, uma vez que sua finalidade não casa com a finalidade a que foi utilizado. Os estudos da estrutura, com inspeções visuais e ensaios, levam a um correto diagnóstico e a terapias condizentes com a manifestação patológica apresentada. Assim, a indicação do produto de reparo será precisa e a recuperação será eficiente e terá uma longa vida útil.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O procedimento metodológico utilizado nessa pesquisa foi o programa experimental onde, através da moldagem de corpos de prova com deferentes relações água/cimento, foi feita a carbonatação do concreto e a mensuração da velocidade da propagação da onda ultrassônica, e assim, verificada a influência da carbonatação no ensaio e ultrassom

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O **Capítulo 1** apresenta o problema de pesquisa e seus objetivos, bem como delinea as principais justificativas para a realização deste estudo e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

O **Capítulo 2** apresenta a fundamentação teórica e discorre o panorama geral da carbonatação no concreto e o ensaio de ultrassom.

O **Capítulo 3** trata sobre os ensaios laboratoriais realizados neste trabalho, apresentando a descrição de cada ensaio, juntamente com cada etapa de execução.

O **Capítulo 4** apresenta a análise dos resultados obtidos através dos ensaios, correlacionando os valores de profundidade da frente de carbonatação com os valores de propagação de ondas ultrassônicas através dos corpos de provas carbonatados ao longo do período em que estes foram ensaiados.

O **Capítulo 5** apresenta as considerações finais acerca da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

Foram abordados, nesse capítulo, os parâmetros, justificativas e objetivos do estudo.

No capítulo seguinte, será abordada a bibliográfica que embasará o trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo anterior descreveu sobre a temática do estudo em questão, introduzindo o tema e explicando os objetivos.

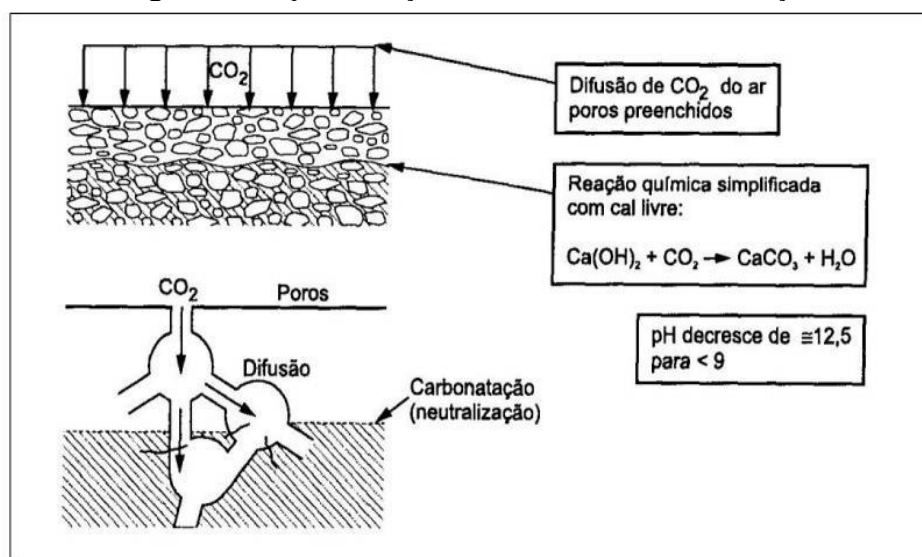
Neste capítulo são apresentados estudos relacionados ao trabalho com base em literatura abrangente do assunto.

2.1. CARBONATAÇÃO

Carbonatação é um fenômeno físico-químico onde, a partir da reação de gases ácidos, presentes no ambiente, com os produtos alcalinos do concreto, provenientes da reação de hidratação do cimento, ocorre a formação de produtos com pH de precipitação inferior a 9. Os principais gases ácidos que levam à carbonatação e que podem ser encontrados no ar atmosférico, principalmente em ambientes urbanos, são o gás sulfídrico (H_2S), o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás carbônico (CO_2), este último encontrado comumente no meio ambiente, em maior ou menor concentração (NUNES, 2014). Apesar de a carbonatação progredir lentamente da superfície para o interior da estrutura, segundo Cascudo (1997), contribui decisivamente para a redução do pH e a despassivação da armadura, podendo ocasionar o processo de corrosão da estrutura.

O principal efeito da carbonatação segundo Mehta e Monteiro (2008) é a redução da alcalinidade do concreto, ou seja, seu pH que originalmente se encontra acima de 12,5 reduz -se para valores inferiores a 8,5, sendo o hidróxido de cálcio transformado carbonato de cálcio. A Figura 2 apresenta esquematicamente o processo da carbonatação que ocorre a partir da superfície, dividindo o processo em duas zonas mais ou menos distintas, uma possui pH superior a 12 e outra inferior a 9 e uma terceira intermediária denominada de zona de neutralização.

Figura 2 - Esquemática do Fenômeno da Carbonatação.



Fonte: (BACKER, 1988 adaptado por CASCUDO 2005).

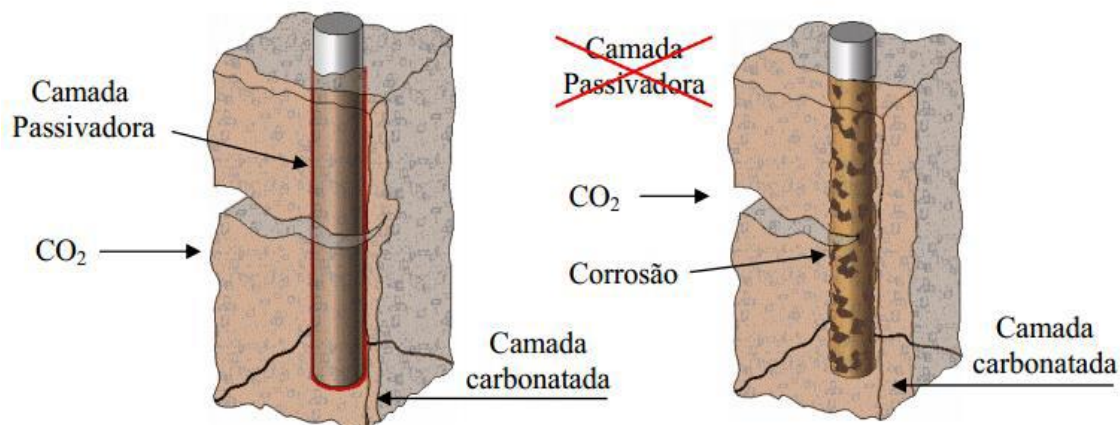
Segundo Silva (2007) a intensidade da umidade é fundamental para a ocorrência da carbonatação, porque não ocorrerá carbonatação em altas ou baixas intensidades de umidade. A incidência da chuva dificulta o avanço da frente de carbonatação porque o dióxido de carbono é impedido de se difundir devido à saturação dos poros, enquanto no período de estiagem, o processo de carbonatação é normal.

De acordo com Verbeck apud ACI 201.2R1 (1992) e Roy et al. (1999) a melhor taxa de umidade para ocorrer a carbonatação é entre 50% e 75%. Para umidade relativa abaixo de 25% a carbonatação é considerada insignificante e quando superior a 75%, a umidade presente nos poros restringe a penetração do dióxido de carbono.

A redução da alcalinidade através do consumo de hidróxido de cálcio na solução dos poros do concreto traz como consequência, se atingida, a despassivação da armadura, que deixa o aço desprotegido e suscetível a corrosão, pois a medida que o consumo de Ca(OH)_2 livre e de outros álcalis ou compostos de cálcio aumenta, avança a frente de carbonatação (MAZZA, 2015).

A Figura 3 mostra o avanço da frente de carbonatação até atingir a armadura podendo deflagrar o processo de corrosão devido a sua despassivação.

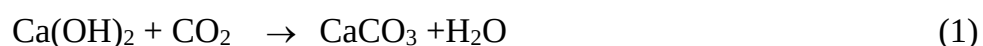
Figura 3 - Representação do Avanço da Frente de Carbonatação.



Fonte: (TULA, 2000).

Na reação de carbonatação são consumidos os compostos essencialmente alcalinos da pasta hidratada de cimento como o hidróxido de potássio (KOH), o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (KULAKOWSKI, 2002). Contudo, os silicatos alcalinos também são passíveis de carbonatação, segundo Schröder e Smolczyk (1969).

A principal reação de carbonatação no concreto ocorre entre o gás carbônico e o hidróxido de cálcio, conforme é apresentado na Equação 1.



A carbonatação é controlada pela difusão do CO_2 nos poros da matriz de concreto. A difusão de gases em meio aquoso é bem mais lenta do que a difusão no ar. Logo, em poros saturados, a difusão de CO_2 é desprezível. Por outro lado, em poros com umidade relativa baixa ($\leq 50\%$) não existe eletrólito suficiente para que a reação ocorra (Kulakowski, 2002).

O processo físico-químico que leva à carbonatação do concreto envolve as seguintes etapas (Papadakis et al., 1991):

- O hidróxido de cálcio, formado nas reações de hidratação do cimento, é dissolvido pela água presente na solução dos poros, segundo a Equação 2.



- O gás carbônico penetra no concreto e se transporta por difusão através da fase gasosa dos poros da matriz, e se dissolve na solução aquosa, conforme a Equação 3 e a Equação 4:



- O gás carbônico dissolvido reage com o Ca(OH)_2 dissolvido, bem como com os outros produtos carbonatáveis da pasta de cimento, conforme a Equação 5, formando os carbonatos:



Os produtos oriundos da reação do CO_2 , bem como os produtos de hidratação, alteram a estrutura de poros da pasta de cimento. O vapor d'água contido nos poros condensa e entra em equilíbrio com as condições do ambiente no qual o concreto está exposto (Kulakowski, 2002).

A colmatagem dos poros irá influenciar diretamente na velocidade de avanço da frente de carbonatação, bem como as variações de umidade e temperatura do meio ambiente. A carbonatação detectada no concreto pode ser dividida em três áreas a partir da superfície de exposição, sendo elas a região carbonatada, a região em processo de carbonatação e a região não carbonatada, sendo que a região não carbonatada apresenta um pH acima de 12 e a região carbonatada apresenta um pH abaixo de 9 (KULAKOWSKI, 2002).

Segundo Bakker (1988), seguindo os princípios da termodinâmica e considerando uma situação de equilíbrio ideal, teoricamente o concreto poderia ser completamente carbonatado. Contudo, o processo de carbonatação no concreto está sujeito a uma barreira física, constituída pela rede de poros, modificada ao longo do tempo em função da precipitação de carbonatos, e assim a carbonatação, ou o avanço da frente carbonatação, ocorre sob uma velocidade decrescente (NEVILLE, 1997), desenvolvendo-se sob uma determinada taxa, que sofre a influência de diversos fatores.

2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO

A velocidade de penetração da frente de carbonatação é determinada por fatores que estão diretamente vinculados às condições de exposição e às características do concreto. Estes fatores são abordados na sequência.

2.2.1. Concentração de CO₂

A velocidade de carbonatação está ligada diretamente com a concentração de CO₂ no meio ambiente o que, segundo Parrot (1987), pode influenciar significativamente na profundidade carbonatada devido ao aumento, nos últimos anos, da concentração deste gás na atmosfera.

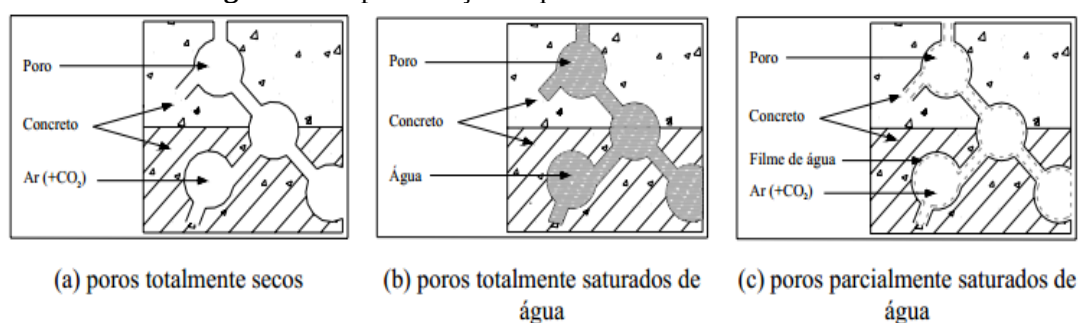
De acordo com Silva (2007) inicialmente, o dióxido de carbono não se difunde ao interior do concreto porque a tendência é de se combinar, ainda na superfície, com os álcalis e o hidróxido de cálcio. Posteriormente, a tendência é de o CO₂ penetrar mais profundamente no concreto, dando continuidade ao processo de carbonatação. Vale ressaltar que o avanço da frente de carbonatação está diretamente relacionado à facilidade que o CO₂ encontra para difundir-se.

Segundo Helene (1993), a concentração de CO₂ no ar pode ser de 0,03 a 0,05% em atmosferas rurais, 0,10 a 1,20% em locais de tráfego pesado e

em ambientes viciados (silos de certos materiais a granel, por exemplo) a concentração pode chegar a 1,8%.

De acordo com Bakker (1988) a difusão do CO_2 pode ocorrer conforme a Figura 4, onde: (a) ocorre a difusão do CO_2 , porém não ocorre a carbonatação pela ausência da água; (b) a reduzida taxa da difusão do CO_2 na água (saturação dos poros) faz com que praticamente não ocorra a carbonatação; (c) a difusão do CO_2 é maior, pois os poros parcialmente saturados de água permitem as reações de carbonatação. Neste último caso, a difusão é mais acentuada devido as tensões superficiais entre a parede sólida e as moléculas solubilizadas de CO_2 (ISAIA, 1999).

Figura 4 - Representação esquemática da difusão do CO_2 .



Fonte: (BAKKER, 1988 adaptado por POSSAN 2010).

2.2.2. Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa do ambiente determina o grau de saturação dos poros do concreto. A difusão do CO_2 em meio líquido é mais lenta do que em meio gasoso, na ordem de 10^4 vezes menor. Ou seja, em concretos saturados a penetração de CO_2 praticamente para. Por outro lado, em um concreto seco não existe um meio aquoso, ou um eletrólito, para que ocorra a eletrólise, isto é, a dissolução do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e do CO_2 gasoso a fim de que ocorra a reação de carbonatação propriamente dita (KULAKOWSKI, 2002).

As maiores velocidades de carbonatação ocorrem em umidade relativa entre 60 e 85% (Helene, 1993). Em estudo realizado por Wolf e Dal Molin

(1989), onde corpos de prova de concreto de diversos tipos de cimento e relações água/cimento variando de 0,4 a 1,00 foram submetidos a umidades relativas de 30, 50, 70 e 90%, as maiores profundidades de carbonatação foram encontradas para 70% de umidade relativa.

2.2.3. Temperatura do Meio

De acordo com John (1993), em média, um aumento de 10°C na temperatura pode dobrar a taxa de uma reação química. Em um estudo citado por Roy et al. (1996), analisando a profundidade de carbonatação para concretos com o mesmo nível de resistência à compressão e para diferentes localidades, verificou-se que em Singapura onde a temperatura média é de aproximadamente 28°C as profundidades de carbonatação foram 70% superiores às do Reino Unido e Europa em geral, onde a temperatura média é de 8 a 9°C.

Neville (1997), compartilha da ideia de que pequenas variações de temperatura não são significativas para a concentração de CO₂ e que estas exercem pouca influência no processo de carbonatação do concreto.

Em ensaios acelerados de carbonatação o efeito da temperatura parece não ser significativo quando o experimento é conduzido sob temperaturas habituais, conforme dados obtidos por Papadakis et al. (1991). LOO et al. (1994), estudando a carbonatação com temperaturas variando entre 20 e 40°C, concluíram que a temperatura não se apresenta tão significativa para a profundidade de carbonatação quanto a concentração de CO₂.

2.2.4. Tipo do Cimento

O avanço da frente de carbonatação é proporcional à alcalinidade total disponível na pasta, relacionada à composição química do cimento. O cimento Portland comum possui maior reserva alcalina que os cimentos com adições minerais, porque é maior a concentração de hidróxidos alcalinos na solução dos

poros do primeiro, o que propicia mais lenta difusão de dióxido de carbono. Isso se deve ao fato de o ácido carbônico reagir com o CH presente para, então, prosseguir a difusão para o interior do concreto, Matsutato et al. (1992) e Silva (2002).

Helene (1997) propõe que se for utilizado cimento Portland com adições de escória de alto forno ou pozolanas a espessura do cobrimento deve ser aumentada de 10% a 20% respectivamente. Segundo Helene (2004), para reduzir a profundidade de carbonatação são preferíveis o uso dos cimentos tipo CP I e CP V sem adições.

Bakharev et al. (2001) verificaram que concretos sem adição de escória são menos vulneráveis à carbonatação porque contêm maior quantidade de cálcio, advindos do C3S, C2S, CH e C-S-H.

Silva (2007) conclui que, a utilização de altos teores de adições minerais, em substituição ao cimento Portland, consome o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação e propicia maior velocidade de carbonatação.

2.2.5. Porosidade

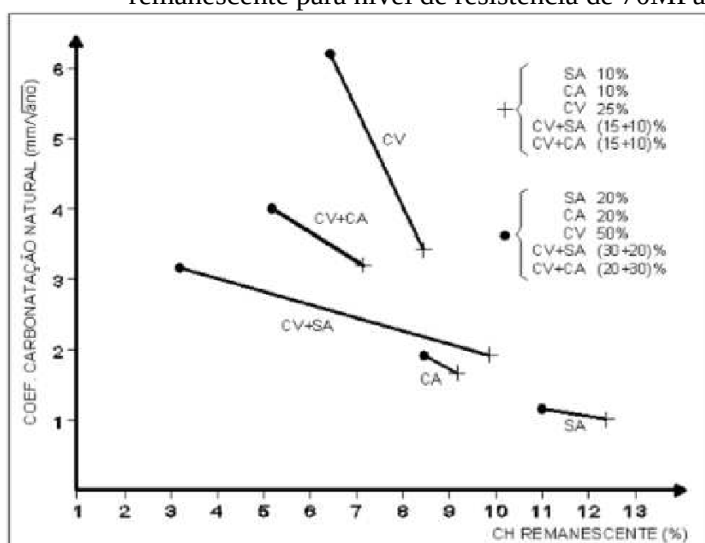
A porosidade capilar também apresenta grande importância na carbonatação. Helene (1993) relata que “está provado que via de regra um aumento na porosidade do concreto conduz a um aumento da permeabilidade e difusibilidade dos gases no concreto”. Mehta e Monteiro (1994) e Bauer (1995) relatam que a relação água/aglomerante influencia a profundidade de carbonatação do concreto, visto que esta está diretamente ligada à porosidade da pasta de cimento hidratada, sendo que, quanto maior o volume de poros, maior será a facilidade do acesso de CO₂ no interior do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (1994) na pasta de cimento hidratada, o fluxo de água ocorre entre os poros capilares interconectados e essa interconexão é diretamente ligada à relação água/cimento e ao grau de hidratação do cimento.

2.2.6. Teor de Hidróxido de Cálcio

O teor de hidróxido de cálcio (CH) tem fundamental importância na velocidade de carbonatação. Quanto maior o teor de CH na composição do concreto, maior será a reserva alcalina disponível, e com isso, mais lenta será a velocidade da frente de carbonatação devido ao maior teor de CH a ser consumido pelas reações de carbonatação, Kulakowski (2002).

Em pesquisa realizada com misturas binárias e ternárias de sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz, Isaia, Vagueti e Gastaldini (1998) observaram que o teor de CH remanescente foi menor quanto maior os teores de substituição de cimento por estas adições conforme Figura 5.

Figura 5 - Correlação entre o coeficiente de carbonatação natural e o teor de hidróxido de cálcio remanescente para nível de resistência de 70MPa.



Fonte: (ISAIA, VAGUETTI & GASTALDINI, 1998).

Vagueti (1999), constata tal correlação onde, para as mesmas misturas utilizadas em pesquisa anterior com Isaia e Gastaldini (1998), a mistura de referência (100% de cimento Portland) apresentou o menor coeficiente de carbonatação devido a maior reserva de CH presente na mistura.

Para Neville (1997), a redução do pH da solução dos poros, devido ao consumo do CH pelas reações pozolânicas, faz com que a película passivadora

do aço seja removida, podendo levar ao início do processo da corrosão das armaduras.

2.2.7. Processo de Cura

As condições de cura, principalmente o tempo de cura úmida influencia diretamente na durabilidade do concreto, pois segundo Helene et al. (1995), esta afeta as condições de hidratação da pasta nos primeiros milímetros superficiais.

Segundo Figueiredo et al. (1993) quanto maior for o tempo de cura úmida mais compacta será a microestrutura e conseqüentemente menor a sua profundidade de carbonatação. Isto ocorre devido ao maior grau de hidratação do cimento que diminui a porosidade e a permeabilidade do concreto superficial devido à redução da conectividade da rede de poros.

2.3. MÉTODO DO ULTRASSOM

As primeiras publicações sobre medições de velocidade de pulsos mecanicamente gerados apareceram nos Estados Unidos em meados de 1940. Constatou-se que a velocidade depende das propriedades elásticas do material e quase não depende da sua geometria (Bungey, 1989).

Mais tarde, em meados da 2ª Guerra Mundial, o estudo da propagação das ondas ultrassônicas foi acelerado simultaneamente no Canadá e na Inglaterra. MENEGHETTI (1999), Leslie e Cheesman desenvolveram, no Canadá, um aparelho denominado cinescópio, enquanto na Inglaterra, Jones (1953), desenvolveu o ensaio de velocidade de pulso ultra-sônico. (COSTA, 2004).

De acordo com Chung e Law (1983), nos anos 60 foi desenvolvido um equipamento portátil, operado com bateria e com o tempo de trânsito num mostrador digital.

Somente no início dos anos 70, com o surgimento do PUNDIT (Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester), viabilizou-se a utilização do ultrassom em estruturas de concreto, por tratar-se de aparelho portátil, de pouco peso, bateria própria e com a apresentação do tempo de propagação da onda ultrassônica em mostrador digital. Por utilizar frequências próximas de 50 kHz, o PUNDIT pode ser utilizado em peças de concreto com comprimento de até 20 metros, aproximadamente (HAMASSAKI, 1986; REPETTE, 1991; MENEGHETTI, 1999).

2.3.1. Descrição do Método

O ensaio consiste na medição, por meio eletrônico, do tempo de propagação de ondas ultrassônicas através do concreto, entre o emissor e o receptor. O comprimento percorrido entre os transdutores dividido pelo tempo de propagação, resulta na velocidade média de propagação da onda ultrassônica conforme a Equação 6 (NBR 8802, 1994).

$$V = \frac{L}{t} \quad (6)$$

Onde:

L = distância entre transdutores (m);

t = tempo de percurso das ondas (s).

De acordo com Bungey (1989), a velocidade de ondas ultrassônicas transitando em um material sólido depende da densidade e das propriedades elásticas desse material, como pode ser visto nas equações 7 e 8.

$$v = \sqrt{\frac{KE_d}{\rho}} \quad (7)$$

$$k = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}$$

Sendo:

(8)

Onde:

v = velocidade da onda , km/s

E_d = módulo de elasticidade dinâmico, kN/mm²

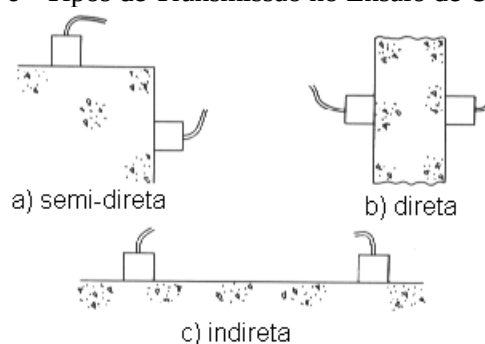
ρ = massa específica, kg/m³

ν = coeficiente de Poisson dinâmico

A velocidade da onda depende principalmente dos seguintes fatores: coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e massa específica do concreto, e também da presença de armadura (Bungey, 1989, Popovics et al,1995).

De acordo com Malhotra (1984), o método baseia-se no fato de que a velocidade de propagação das ondas é influenciada pela qualidade do concreto. O ensaio consiste na medição, por meio eletrônico, do tempo de propagação de ondas ultrassônicas através do concreto, entre o emissor e o receptor. O comprimento percorrido entre os transdutores dividido pelo tempo de propagação, resultando na velocidade média de propagação da onda.

No Brasil a NBR 8802 (2013) prescreve o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto. Esta norma indica três modos possíveis de transmissão, de acordo com o posicionamento dos transdutores, conforme a Figura 6.

Figura 6 - Tipos de Transmissão no Ensaio de Ultrassom.

Fonte: (Bungey,1989).

De acordo com Medeiros (2007), o modo de transmissão direta é o mais satisfatório, pois é neste que a máxima energia é transmitida. Este modo é bastante utilizado para correlação com resistência à compressão, obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, porém necessita de duas faces para detecção de falhas internas e avaliação de qualidade do concreto.

O modo de transmissão semi-direta é menos utilizado, porém é muito útil quando se pretende evitar regiões de concentração de armaduras como cantos de pilares e vigas (MEDEIROS, 2007).

O modo de transmissão indireta é o menos recomendado, pois a intensidade do sinal recebido é significativamente menor do que a recebida no modo direto. Este modo é utilizado quando se tem acesso a apenas uma face do corpo-de-prova ou componente estrutural, como no caso de lajes, pavimentos de concreto ou barragens (MEDEIROS, 2007).

Yaman et al (2001) citam que no campo nem sempre é possível o acesso a superfícies opostas, por exemplo em pavimento e pontes, e torna-se necessário o ensaio de transmissão indireta.

Esse ensaio tem como principais aplicações verificação da homogeneidade do concreto, detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições, monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio (ataque químico) principalmente pela ação de sulfatos. A tabela 1

apresenta a correlação entre a qualidade do concreto quanto à esses parâmetros e a velocidade de propagação da onda através do concreto.

Tabela 1 – Correlação entre a velocidade de propagação do pulso ultrassônico com a qualidade do concreto.

Velocidade da onda (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Ótima
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V < 2000$	Ruim

Fonte: (NBR 8802:2013).

A boa ligação entre o concreto e o transdutor é um ponto crítico do método, assim como a interpretação dos resultados, que pode ser difícil. (Malhotra,1984, Sturup et al,1984, ACI-364,1993).

Segundo Phoon et al (1999), não há uma correlação única para a relação entre velocidade da onda e a resistência devido à influência de vários fatores como as propriedades e proporções dos materiais que compõem o concreto, idade e teor de umidade.

2.3.2. Aplicações

O método possibilita estimar a uniformidade e a resistência à compressão (quando correlacionada previamente) do concreto. Também pode ser usado para investigar danos provocados pelo fogo, congelamento e agentes químicos (Chung e Law, 1983, Selleck et al, 1998).

As descontinuidades (vazios) no interior do concreto podem ser detectadas devido às diferenças da velocidade de propagação das ondas (ACI-364,1993).

As curvas de correlação entre velocidade da onda e resistência do concreto obtidas nas idades iniciais (3 dias) não se aplicam para idades mais avançadas (28 dias, 91 dias). Para uma dada composição de concreto, quando a resistência à compressão aumenta com a idade, há um pequeno aumento da velocidade, porém não na mesma proporção. Desta forma, ao atingir-se uma determinada idade, a velocidade não é mais sensível ao aumento de resistência (ACI 228, 1989).

2.3.3. Acurácia

Dos ensaios “*in situ*”, o método do ultrassom é um dos que apresentam as menores variações. O coeficiente de variação para o ensaio realizado em laboratório é da ordem de 2% (Malhotra, 1984).

Segundo Facaoaru (1984), a acurácia da estimativa de resistência pelo método do ultrassom é a seguinte:

- a) 12 a 16% - Quando estão disponíveis corpos de prova ou testemunhos e se conhece a composição do concreto,
- b) 14 a 18% - Quando estão disponíveis apenas corpos de prova ou testemunhos,
- c) 18 a 25 % - Quando se conhece apenas a composição do concreto,
- d) Acima de 30 % - quando não estão disponíveis corpos de prova ou testemunhos e nem se conhece a composição do concreto, dependendo apenas da experiência do profissional e da existência de dados auxiliares.

Segundo Popovics (2001) a estimativa da resistência á compressão por meio do ensaio de ultrassom apresenta uma acurácia de +20% quando obtida em laboratório, e que no campo esse erro pode ser bem maior.

2.3.4. Fatores que Influenciam os Resultados

Segundo o Manual da Pundit (1994), assim como diversos pesquisadores (Almeida, 1993, Swamy e Al-Hamed, 1994, Sturup et al, 1994, Focaoaru, 1994, Phoon et al, 1999, Meneghetti, 1999), a estimativa da resistência pode ser influenciada principalmente pelo tipo de agregado, relação agregado/cimento, idade do concreto, dimensão e graduação dos agregados e condições de cura.

2.3.4.1. Condições de Superfície

De acordo com as normas técnicas internacionais, a superfície do concreto deve ser lisa para garantir o perfeito acoplamento dos transdutores ao mesmo. E também se deve evitar as superfícies que receberam acabamento, pois o concreto nesta superfície pode não ser representativo daquele do restante da peça.

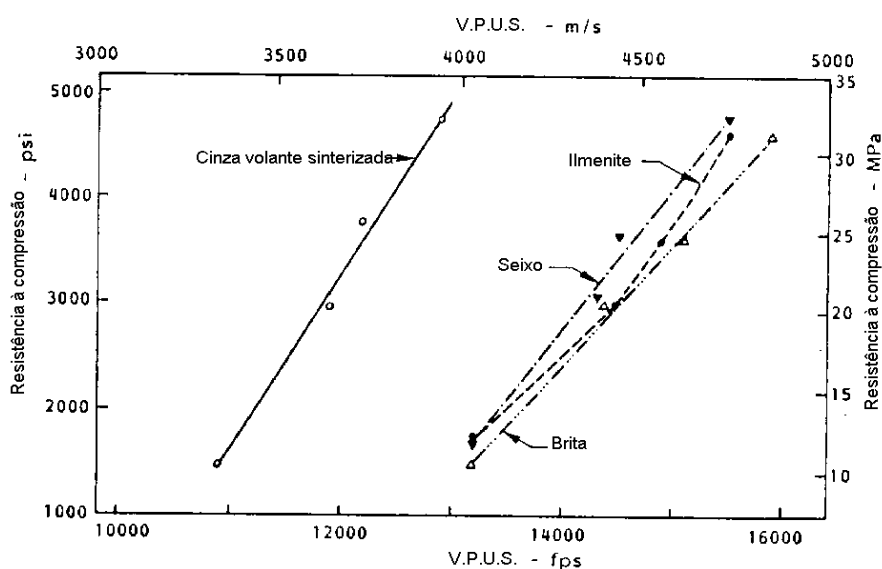
Para o caso de superfícies curvas, há alternativa de usar transdutores com contato pontual; no entanto, o nível de energia destes são menores, e ainda existem restrições quanto à distância entre os transdutores além da qual os pulsos não são mais recebidos (CHUNG E LAW, 1983).

2.3.4.2. Tipo e Quantidade do Agregado Graúdo

Sturup et al (1984) investigaram a relação entre velocidade e resistência à compressão para concretos com os seguintes tipos de agregados: brita e seixo (agregados convencionais), cinza volante sinterizada (agregado leve)

e ilmenita (agregado pesado). Verificou-se que, para uma determinada resistência à compressão, a diferença entre a velocidade de propagação de onda nos dois concretos convencionais e no concreto pesado foi pequena, mas para o concreto leve a diferença entre as velocidades de propagação foi maior (Figura 6). Nesta investigação não foi considerada a influência da proporção de agregado graúdo na composição do concreto.

Figura 7 - Influência do Tipo de Agregado na Relação entre V e Resistência à Compressão do Concreto.



Fonte: (Sturup et al ,1984).

Esses autores observaram ainda que, para um determinado nível de resistência, a velocidade de propagação da onda é maior no concreto do que na argamassa, que por sua vez é maior do que na pasta.

Chung e Law (1983) citam que, em geral, os agregados graúdos e miúdos têm módulo de elasticidade e velocidade de propagação da onda maiores do que o da pasta de cimento. Assim, o concreto com agregados de massas específicas maiores ou com maiores quantidades de agregado apresentam maior velocidade.

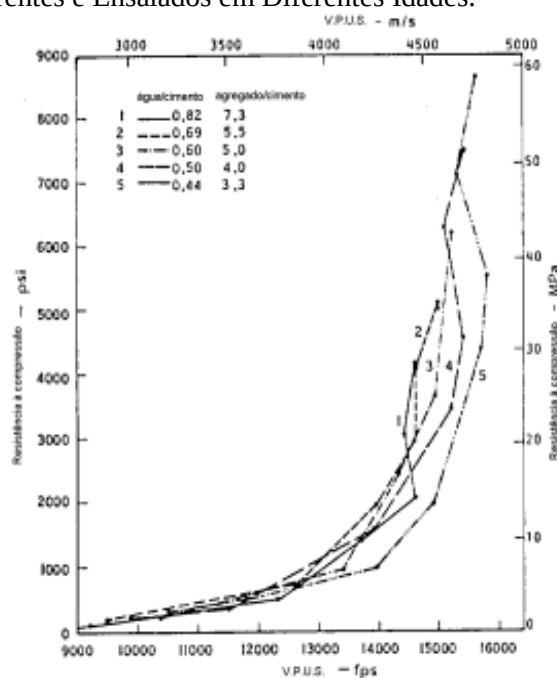
Nogueira e Willam (2001) compararam cinco composições: concreto com agregado de $D_{máx}$ de 12,5 mm, concreto com agregado de $D_{máx}$ de

9,5mm, concreto com agregado de $D_{\text{máx}}$ de 4,75mm, argamassa e pasta de cimento. Manteve-se constante a relação água/cimento de 0,55 para os concretos e de 0,50 para argamassa e a pasta de cimento. O maior valor de velocidade de propagação da onda foi obtido para o concreto com agregado de $D_{\text{máx}}$ de 12,5 mm, enquanto que a maior resistência à compressão foi do concreto com agregado $D_{\text{máx}}$ de 9,5mm, e explicou-se que esta diferença provavelmente está relacionada à distribuição granulométrica da composição, já que não foi alterada a relação água/cimento.

2.3.4.3. Proporção de Mistura

Para cinco concretos com materiais similares, porém com diferentes relações água/cimento e agregado/cimento, Sturup et al (1984) observaram nas idades de 12 horas a 91 dias, que, para uma determinada velocidade, a resistência diminui quando a relação água/cimento diminui, ou quando o teor de cimento aumenta. Os resultados encontram-se na Figura 8.

Figura 8 - Relações entre V e Resistência à Compressão de Concretos com Composições Diferentes e Ensaiaados em Diferentes Idades.



Fonte: (Sturup et al, 1984).

Elvery e Ibrahim (1976), ao investigarem a influência da relação agregado/cimento, constataram que as variações na quantidade de agregado têm uma influência significativa na correlação f_c e V . Segundo os autores, isto ocorre devido ao agregado ter maior módulo de elasticidade do que o da pasta de cimento. Assim, pode-se esperar que, ao aumentar a fração do volume de agregado no concreto, mantendo-se os demais parâmetros constantes, a velocidade seja maior.

Ao analisar a influência da relação água/cimento, Elvery e Ibrahim (1976) mantiveram constante a relação agregado/cimento, e observaram que a correlação entre f_c e V independe da variação da relação água/cimento.

Chung e Law (1983) relatam que a correlação entre f_c e V varia principalmente com o tipo e a proporção dos agregados na composição do concreto. Os autores citam que o tempo de trânsito dos pulsos no concreto é igual à soma dos tempos de trânsito no agregado graúdo, no agregado miúdo e na pasta de cimento.

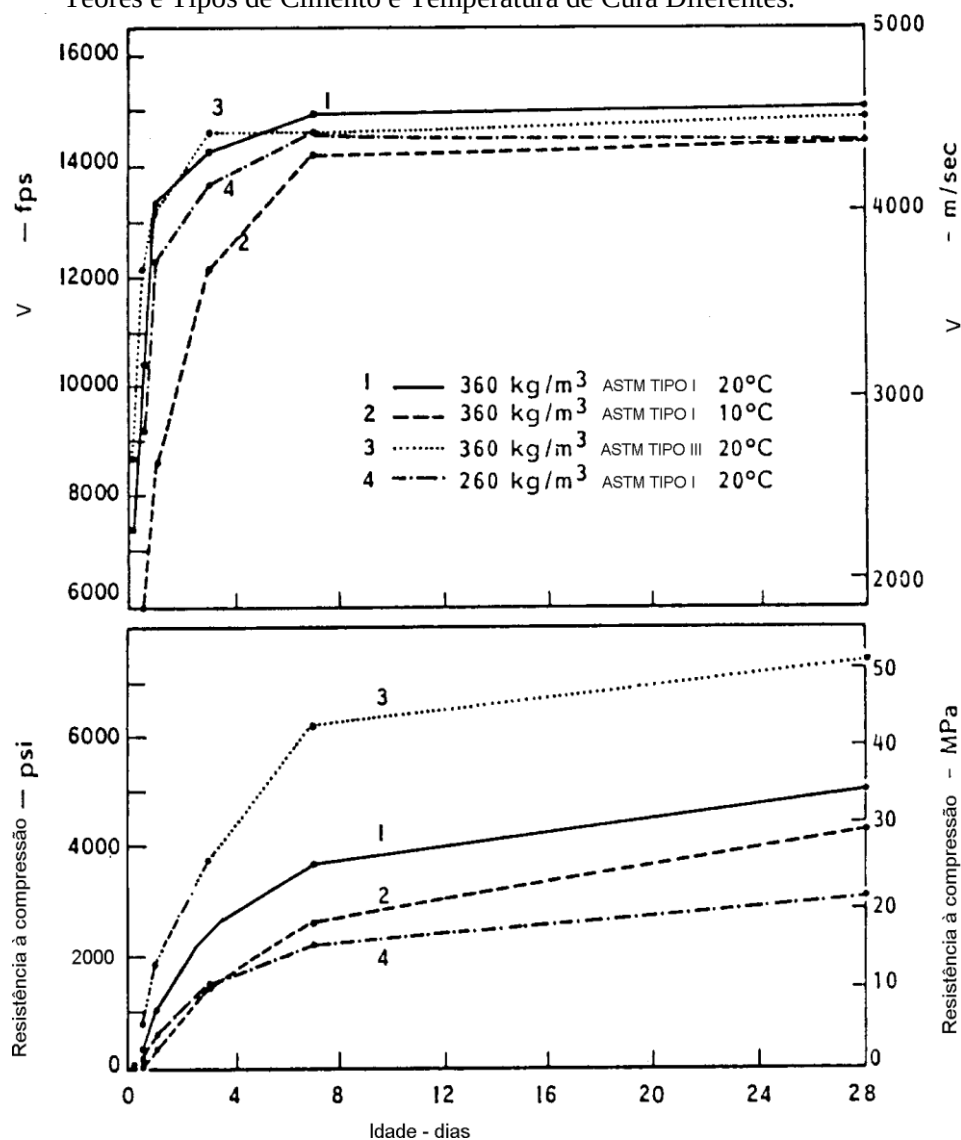
Nogueira e Willam (2001) relatam que a relação água/cimento não influencia significativamente a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, pois esta relaciona-se principalmente com as propriedades elásticas (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e massa específica) do concreto e não com a sua resistência.

2.3.4.4. Tipo de Cimento

Sturup et al (1984) utilizaram cimento ASTM tipo I (cimento Portland comum) e ASTM tipo III (cimento Portland de alta resistência inicial) em concretos ensaiados nas idades de 12 horas a 91 dias (Figura 8). Eles constataram que valores para velocidade de propagação de ondas ultrassônicas entre 3,5 e 4,5 km/s representaram menor resistência para concreto com cimento Portland comum do que para o concreto com cimento Portland de alta resistência

inicial, sendo neles empregada a mesma quantidade de cimento (360kg/m³), porém com relações água/cimento e agregado/cimento variáveis.

Figura 9 - Relação entre V e Idade, Resistência à Compressão e Idade para Concretos com Teores e Tipos de Cimento e Temperatura de Cura Diferentes.



Fonte: (Sturup et al, 1984).

2.3.4.5. Temperatura

De acordo com a RILEM NDT 1(1972), a velocidade das ondas ultrassônicas é influenciada pela temperatura, caso esta apresente-se superior a 30°C e inferior a 5°C. Para temperaturas de 40°C a 60°C, há redução da

velocidade causada por microfissuração interna do concreto que não corresponde à redução na resistência à compressão do concreto. Na situação de congelamento do concreto, a velocidade de propagação das ondas de ultrassom é maior devido à água que se congelou no interior do concreto.

A influência da temperatura na ocasião da preparação do concreto foi investigada por Abbasi e Al-Tayyib (1996). Para a série de ensaios onde a temperatura variou de 32°C a 50°C verificou-se que a velocidade diminuiu com o aumento da temperatura no concreto.

Meneghetti (1999) realizando ensaios nas idades de 12 horas, 16 horas, 24 horas e 3 dias em concretos mantidos com temperaturas de 25° C, 35° C e 45°C, verificou que os submetidos a 45° C apresentaram velocidades menores do que os conservados a 25°C e 35°C.

2.3.4.6. Teor de Umidade no Concreto

Segundo Chung e Law (1983), o teor de umidade do concreto tem uma pequena influência na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, e ensaios em laboratório num concreto na condição saturada resultaram numa velocidade cerca de 2 % maior do que no concreto na condição seca.

Sturup et al (1984) obtiveram relações entre velocidade e resistência à compressão para pasta, argamassa e concreto, tanto em condições úmidas quanto secas, e constataram que, para uma determinada resistência à compressão, a velocidade é maior em condições úmidas do que secas.

Ohdaira e Masuzawa (2000) investigaram a influência do teor de água na propagação de ondas ultrassônicas no concreto (mantiveram-se constantes as relações água/cimento e a porcentagem de agregado miúdo). Os corpos de prova permaneciam imersos em água até a idade de 50 dias, e a cada data de ensaio eram secos com um secador e o teor de água calculado. Eles constataram que a velocidade diminuiu na proporção em que também diminuiu o teor de água,

provavelmente devido ao fato de que quando há água suficiente para preencher os vazios do concreto a velocidade é maior.

Também segundo Popovics (2001), há um aumento da velocidade em concretos com maior umidade. Ele ressalta, no entanto, que o oposto ocorre com a resistência à compressão.

Coutinho, *apud* Almeida (1993), apresenta os seguintes valores para propagação de ondas sonoras:

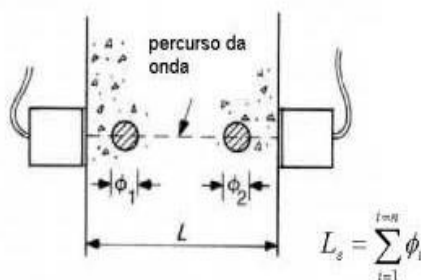
- No ar: 330 m/s
- Na água: 1450 m/s
- Na pasta de cimento: de 3500 m/s a 4000 m/s
- Nos agregados: de 4200 m/s a 5000 m/s.

2.3.4.7. Presença de Armadura e Fissuras

No caso de o concreto não apresentar armaduras, fissuras ou vazios, as ondas sonoras percorrem o menor caminho, isto é, uma linha reta entre os dois transdutores.

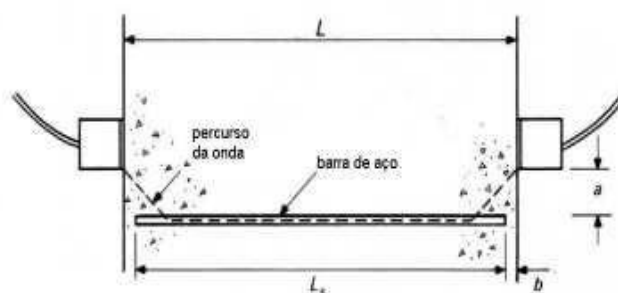
Se existem armaduras localizadas paralelamente ao caminho das ondas, dependendo da proximidade dos transdutores, as ondas podem transitar parte através do concreto e parte através do aço. Como a velocidade das ondas é maior no aço do que no concreto (1,2 a 1,9 vezes), o primeiro pulso a chegar no transdutor receptor percorreu o concreto e o aço, o que acarreta um aumento da velocidade de propagação (Sturup et al, 1984, RILEM NDT1, 1972).

Figura 10 - Influência de Barras Transversais ao Percurso da Onda.



Fonte: (Bungey, 1989).

Figura 11 - Influência de Barras Transversais ao Percurso da Onda.



Fonte: (Bungey,1989).

Bungey (1989) verificou que a zona de influência das barras transversais ao percurso é significativamente menor do que a das barras longitudinais, sendo que barras transversais de diâmetro inferior a 20 mm praticamente não são detectadas em concreto onde tem-se velocidade acima de 4,0 km/s, porém para barras longitudinais com diâmetros superiores a 6 mm paralelas ao percurso das ondas, a influência é significativa.

Neste capítulo foi apresentada a bibliografia que embasa o foco do presente trabalho.

O capítulo 3 trará a metodologia de experimentos realizados para obtenção dos resultados deste trabalho, com base na teoria levantada neste capítulo.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Conforme o panorama apresentado na fundamentação teórica do capítulo anterior, o programa experimental será descrito detalhadamente neste capítulo. Resumidamente o programa experimental consistiu em moldagem e preparo dos corpos de prova, exposição à câmara de carbonatação, medição das profundidades de carbonatação atingidas com o avanço do tempo e medição da velocidade da onda ultrassônica conforme o avanço da frente de carbonatação.

3.1. MATERIAIS

A seguir serão descritos os materiais utilizados:

3.1.1. Tipo do Cimento e Agregado

No programa experimental deste estudo optou-se por utilizar o cimento CP II E40 marca “Tupy”, areia média lavada, brita tipo 1 e água.

3.1.2. Moldagem e Traço do Concreto

Optou-se por moldar um total de 15 (quinze) corpos de prova em laboratório (CONCRETESTE) no padrão 10 x 20 cm de acordo com a NBR 5738:2008. Previamente os corpos de prova foram curados em câmara úmida, permanecendo em ambiente de laboratório até a data dos ensaios.

Os corpos de prova foram divididos em três grupos com os seguintes traços experimentais:

Grupo A: Traço: 1:1,08:1,92 – fator a/c 0,45

Grupo B: Traço: 1:1,08:1,92 – fator a/c 0,55

Grupo C: Traço: 1:1,08:1,92 – fator a/c 0,65

3.2. CARBONATAÇÃO ACELERADA

O ensaio de carbonatação acelerada teve por objetivo obter as profundidades e os coeficientes de carbonatação das misturas apresentadas nos grupos A, B e C. Estes foram inseridos na câmara climática automatizada CARON no laboratório da ABCP por um período de 7 semanas com as seguintes especificações: umidade relativa (UR) 65%, temperatura 23°C e teor de CO₂ 3%, em volume. Para a análise da profundidade de carbonatação, fatiaram-se os corpos de prova com espessura aproximada de 3 cm para posterior aspersão de fenolftaleína diluída na face do concreto.

A Figura 12 mostra as fatias da 1ª, 2ª e 3ª semana após o início da carbonatação. Após a aspersão de fenolftaleína observa-se que se iniciou o processo químico, sendo a profundidade de 9,6 mm para a 1ª semana, 10,9 mm para a 2ª semana e posteriormente 13,1 mm na 3ª semana.

Figura 12 – Evolução da Frente de Carbonatação. 1ª, 2ª e 3ª semana, A/C 0,45.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se na Figura 13 o avanço da frente de carbonatação do concreto, tendo sua profundidade elevada para 18,6 mm na 4ª semana, Ao final da 5ª semana verificou-se uma elevação da profundidade de carbonatação para 21,3 mm, e na 6ª semana para 22,6 mm para o grupo de amostras "A".

Figura 13– Evolução da Frente de Carbonatação. 4ª, 5ª e 6ª semana, A/C 0,45.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a 7ª e última semana do experimento, os corpos de prova remanescentes do grupo A, atingiram a profundidade de carbonatação de 23,7 mm, sendo o valor máximo obtido para este grupo, conforme ilustra a Figura 14.

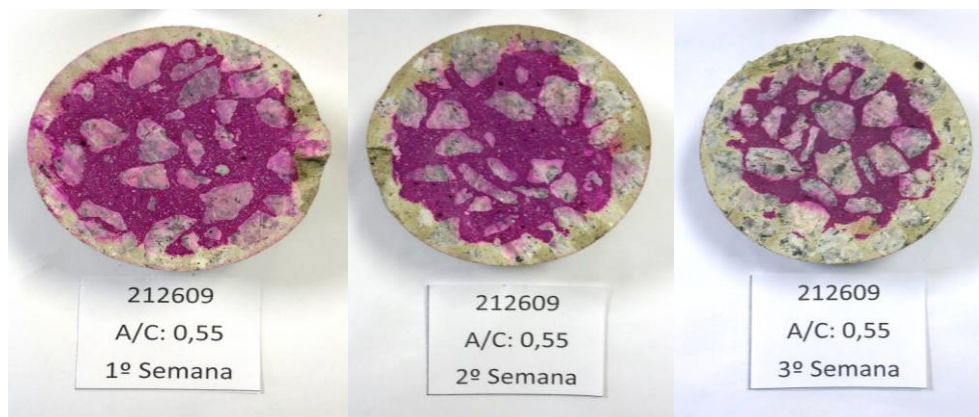
Figura 14 – Evolução da Frente de Carbonatação. 7ª semana, A/C 0,45.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O experimento no grupo B, na 1ª, 2ª e 3ª semana demonstrou um avanço da carbonatação mais agressivo se comparado ao grupo A. Sendo a espessura da camada carbonatada de 19,1 mm para a 1ª semana, seguido de um expressivo aumento para 30,9 mm na 2ª semana e, na terceira semana, 31,3 mm, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Evolução da Frente de Carbonatação. 1ª, 2ª e 3ª semana, A/C 0,55.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na Figura 16, é ilustrado o resultado das semanas 4, 5 e 6 dos corpos de prova do grupo B. É possível ver o avanço da frente de carbonatação para 35,6 mm, 38,9 mm e 42,6 mm, respectivamente.

Figura 16 – Evolução da Frente de Carbonatação. 4ª, 5ª e 6ª semana, A/C 0,55.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a conclusão do experimento, na 7ª semana, obteve-se o valor de 47,1 mm de frente de carbonatação para os corpos de prova com fator água/cimento de 0,55, como mostrado na Figura 16.

Figura 17 – Evolução da Frente de Carbonatação. 7ª semana, A/C 0,55.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A evolução da frente de carbonatação para o grupo C obteve os maiores valores da profundidade da carbonatação do concreto. No final da 1ª semana, a espessura carbonatada obteve o valor de 22,7 mm, 38,2 mm na 2ª semana e 40,7 mm para a 3ª semana (Figura 18).

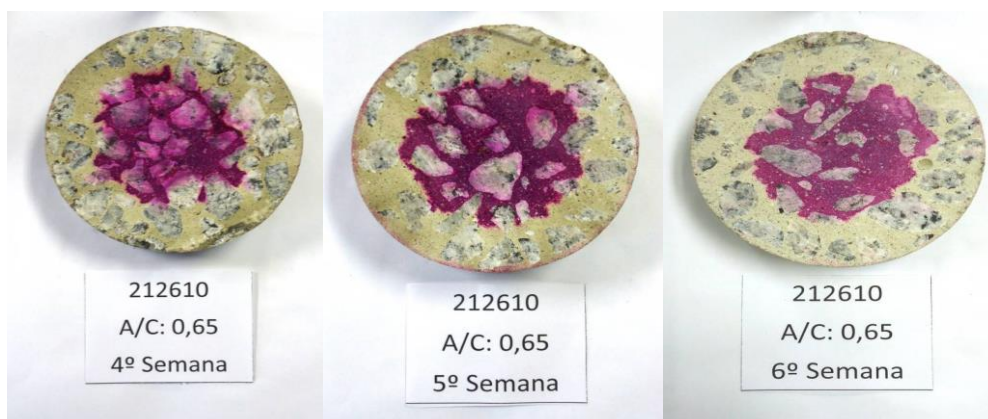
Figura 18 – Evolução da Frente de Carbonatação. 1ª, 2ª e 3ª semana, A/C 0,65.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na 4ª, 5ª e 6ª semana, foram registrados os valores de 44,5 mm, 47,6 mm, e 55,7 mm, respectivamente (Figura 19).

Figura 19 – Evolução da Frente de Carbonatação. 4ª, 5ª e 6ª semana, A/C 0,65.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na última semana, Figura 20, a espessura da camada carbonatada chegou a 75,7 mm, sendo o valor máximo aferido para o grupo. Observou-se também uma maior agressividade na penetração da frente de carbonatação em relação ao grupo A e B.

Figura 20 – Evolução da Frente de Carbonatação. 7ª Semana, A/C 0,65.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3. TESTE DE ULTRASSOM

Após a cura úmida, os corpos de prova foram submetidos ao primeiro teste de ultrassom antes do início da carbonatação, assim estabelecendo valores de referência de velocidade de propagação de cada grupo. Os testes de ultrassom

foram feitos em laboratório pela ABCP, utilizando o equipamento PUNDIT, pelo método de indução direta. Esse ensaio foi realizado conforme orientações da norma brasileira NBR 8802 de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Posteriormente foram realizados testes de ultrassom a cada semana, conforme o avanço da profundidade de carbonatação.

Neste capítulo foi apresentado o programa experimental do estudo. O próximo capítulo mostrará os resultados obtidos, assim como suas análises.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se uma compilação dos resultados obtidos através do programa experimental exposto o Capítulo 3 e faz-se uma análise deles, considerando e correlacionando os valores de frente de carbonatação e velocidade de ondas ultrassônicas através do concreto.

4.1. ENSAIO COLORIMÉTRICO PARA DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA CARBONATADA DO CONCRETO

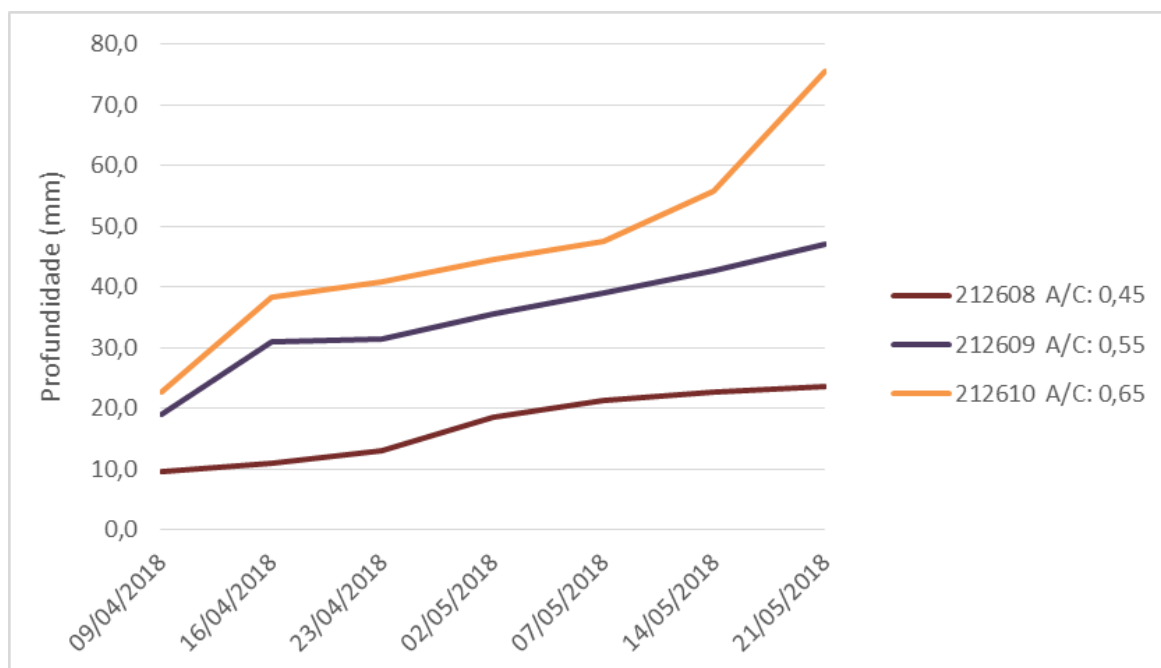
A Tabela 2 apresenta os valores obtidos através da mensuração da espessura carbonatada durante o período de ensaio.

Tabela 2 – Profundidade de carbonatação dos corpos de provas durante período de ensaio

Amostra	1ª Semana (mm)	2ª Semana (mm)	3ª Semana (mm)	4ª Semana (mm)	5ª Semana (mm)	6ª Semana (mm)	7ª Semana (mm)
212608 A/C: 0,45	9,6	10,9	13,1	18,6	21,3	22,6	23,7
212609 A/C: 0,55	19,1	30,9	31,3	35,6	38,9	42,6	47,1
212610 A/C: 0,65	22,7	38,2	40,7	44,5	47,6	55,7	75,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 2 é possível verificar que, ao longo do tempo, a profundidade de carbonatação foi crescente. A Figura 21 ilustra o gráfico com a penetração do gás carbônico nos corpos de prova ensaiados.

Figura 21 – Evolução da Frente de Carbonatação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando os valores no gráfico é possível observar que a penetração de gás carbônico nos corpos de prova foi sempre crescente. Porém, como já esperado, devido à sua maior porosidade, os corpos de prova com relação a/c de 0,65 apresentaram um avanço muito mais considerável na frente de carbonatação. Se comparado os resultados do grupo A e do grupo C na última semana de ensaio, tem-se que a frente de carbonatação no grupo C foi 319% maior que no grupo A.

4.2. PERDA DE MASSA DOS CORPOS DE PROVA

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos através da pesagem dos corpos de prova antes do início dos ensaios, para estabilização, e durante o ensaio.

Tabela 3 – Pesagem dos corpos de provas durante período de ensaio

Amostra	Corpos de prova nº	09/04/2018	16/04/2018	23/04/2018	02/05/2018	07/05/2018	14/05/2018
		15:00	13:20	08:30	15:00	15:00	13:30
		Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)
212608 A/C: 0,45	1	3437,9	3436,8	3436,0	3435,0	-	-
	2	3441,9	3441,4	3440,6	3439,6	3439,3	3439,1
	3	3394,1	3392,6	3391,9	3390,0	3389,7	3388,8
	4	3467,9	3466,7	3465,2	3464,0	3463,6	3462,8
	5	3425,8	-	-	-	-	-
212609 A/C: 0,55	6	3428,3	3422,9	3419,7	3416,1	-	-
	7	3319,1	-	-	-	-	-
	8	3382,0	3377,2	3373,3	3370,1	3368,8	3366,6
	9	3413,3	3407,7	3404,9	3401,6	3400,0	3398,4
	10	3379,9	3374,5	3370,4	3366,4	3364,7	3362,4
212610 A/C: 0,65	11	3289,7	-	-	-	-	-
	12	3350,1	3342,3	3336,7	3330,8	-	-
	13	3150,6	3142,0	3135,6	3128,8	3126,9	3123,1
	14	3260,5	3252,2	3246,6	3240,2	3238,1	3234,4
	15	3346,0	3338,1	3332,5	3326,6	3324,1	3320,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 3 é possível verificar que durante o ensaio, houve perda de água. Nas amostras de a/c 0,45, foi mensurada uma perda média de massa de 0,12%. No grupo B, obteve-se valores de 0,44% de perda média de peso dos corpos de prova. Já nas amostras onde houve maior quantidade de água adicionada à mistura (a/c 0,65) também foi registrada as maiores perdas de água durante o ensaio. Foi medido uma perda média de 0,75% e uma perda máxima de 0,87% de massa.

4.3. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE ULTRASSÔNICA ATRAVEZ DO CONCRETO

Os corpos de prova foram ensaiados após a estabilização de suas massas para que fosse estabelecido um marco de referência. Tais resultados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas – Valores de referencia

Amostra	Corpos de prova nº	Comprimento (mm)	Data 22/03/2018		Data 02/04/2018		Média	
			Hora 10:00		Hora 13:20			
			Tempo (us)	Velocidade (m/s)	Tempo (us)	Velocidade (m/s)	Tempo (us)	Velocidade (m/s)
A/C: 0,45	1	194,8	46,0	4240	45,4	4300	45,7	4270
	2	195,5	44,8	4350	45,3	4310	45,1	4330
	3	192,6	43,5	4440	44,4	4350	44,0	4395
	4	196	45,0	4360	45,4	4320	45,2	4340
	5	194,2	45,4	4270	45,0	4310	45,2	4290
A/C: 0,55	6	192,2	45,9	4180	44,9	4280	45,4	4230
	7	191,6	45,1	4260	44,5	4320	44,8	4290
	8	192	44,3	4330	44,3	4330	44,3	4330
	9	190,3	43,6	4360	43,5	4370	43,6	4365
	10	190,9	45,1	4240	44,8	4260	45,0	4250
A/C: 0,65	11	189,0	45,8	4130	45,4	4160	45,6	4145
	12	191,3	47,5	4020	46,3	4130	46,9	4075
	13	187,7	45,1	4170	45,1	4170	45,1	4170
	14	189,4	45,6	4150	45,4	4160	45,5	4155
	15	192,4	46,9	4090	46,3	4150	46,6	4120

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Tabela 4, constata-se que todos os valores obtidos enquadram o concreto dos corpos de prova como “Ótima Qualidade”, segundo critérios estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas técnicas ABNT NBR 8802.

Como referência, será utilizada a média entre as duas medições anteriores ao início da carbonatação do concreto.

Após o ensaio de carbonatação acelerado em câmara específica, obtiveram-se os seguintes valores, ilustrados na Tabela 5.

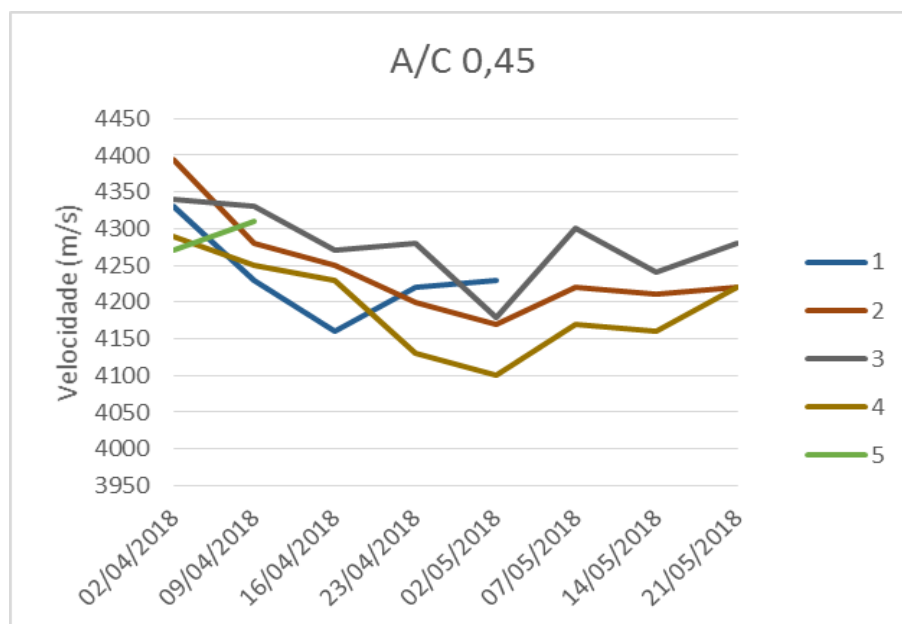
Tabela 5 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas ao longo do ensaio de carbonatação

Amostra	Corpos de prova nº	09/04 15:30 V (m/s)	16/04 13:40 V (m/s)	23/04 09:00 V (m/s)	02/05 15:15 V (m/s)	07/05 15:00 V (m/s)	14/05 13:40 V (m/s)	21/05 14:30 V (m/s)
A/C: 0,45	1	4230	4160	4220	4230	-	-	-
	2	4280	4250	4200	4170	4220	4210	4220
	3	4330	4270	4280	4180	4300	4240	4280
	4	4250	4230	4130	4100	4170	4160	4220
	5	4310	-	-	-	-	-	-
A/C: 0,55	6	4090	4140	4090	4090	-	-	-
	7	4150	-	-	-	-	-	-
	8	4180	4140	4140	4010	4140	4090	4100
	9	4220	4210	4120	4140	4050	4040	4100
	10	4120	4070	3950	3990	3950	3920	3890
A/C: 0,65	11	4040	-	-	-	-	-	-
	12	4060	3980	3950	3800	-	-	-
	13	4030	4010	3920	3730	3820	3840	3770
	14	4000	3980	3950	3910	3920	3840	3760
	15	3900	3830	3670	3730	3660	3530	3470

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para melhor visualização dos resultados, as figuras 22, 23 e 24 apresentam os gráficos com as alterações da velocidade de propagação do pulso ultrassônico ao longo da carbonatação do concreto.

Figura 22 – Velocidade do pulso ultrassônico ao longo do ensaio de carbonatação - A/C 0,45.

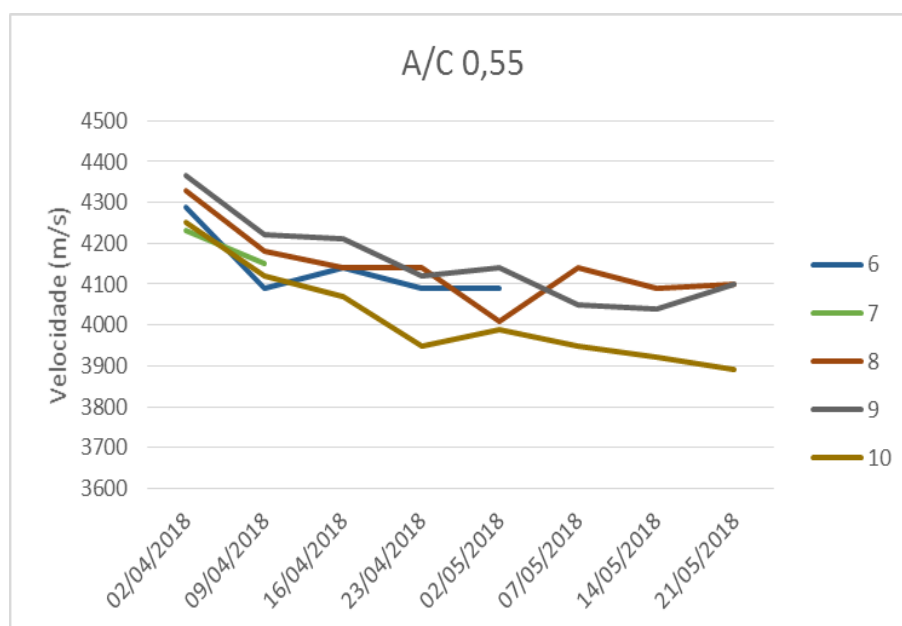


Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi observada, na Figura 22, uma tendência à diminuição da velocidade propagação da onda sônica.

Na Figura 23 é apresentado o gráfico da velocidade de propagação da onda ultrassônica nos corpos de prova com relação a/c 0,55.

Figura 23 – Velocidade do pulso ultrassônico ao longo do ensaio de carbonatação - A/C 0,55.

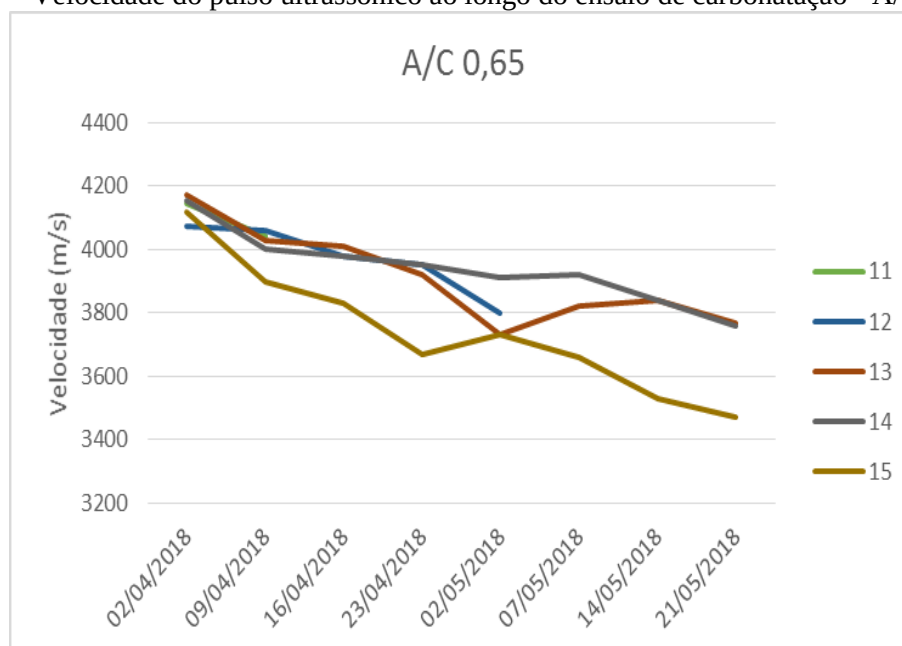


Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como nos resultados obtidos no grupo A, aqui tem-se também uma tendência a diminuição da velocidade que o pulso ultrassônico atravessa o corpo de prova.

Por fim, a Figura 24 ilustra, em forma de gráfico, os valores atingidos nos corpos de prova do grupo C.

Figura 24 – Velocidade do pulso ultrassônico ao longo do ensaio de carbonatação - A/C 0,65.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse grupo também se tem que a onda perde velocidade ao longo do período de ensaio, porém de forma mais agressiva do que nos outros grupos.

Todos os gráficos apresentam uma tendência à diminuição da velocidade de propagação das ondas conforme a perda de água e a penetração gradual de CO₂ no concreto. A fim de tornar a análise qualitativa, a Tabela 6 relaciona os valores obtidos nos ensaios com a qualidade do concreto quanto à sua compacidade e homogeneidade segundo os critérios adotados na fundamentação teórica.

Tabela 6 – Qualidade do concreto quanto à compacidade e homogeneidade

Amostra	Corpos de prova nº	Referencia	1ª Semana	2ª Semana	3ª Semana	4ª Semana	5ª Semana	6ª Semana	7ª Semana
		Qualidade do concreto	Qualidade do concreto	Qualidade do concreto	Qualidade do concreto	Qualidade do concreto	Qualidade do concreto	Qualidade do concreto	Qualidade do concreto
A/C: 0,45	1	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima			
	2	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima
	3	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima
	4	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima
	5	Ótima	Ótima						
A/C: 0,55	6	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima			
	7	Ótima	Ótima						
	8	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima
	9	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima
	10	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima
A/C: 0,65	11	Ótima	Ótima						
	12	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima			
	13	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima
	14	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima
	15	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima	Bom

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a tabela 6 é verificado que a qualidade do concreto quanto à homogeneidade e compacidade só foi alterada em uma medição do grupo com a/c de 0,65. É possível ver que, mesmo com a queda da velocidade da onda ultrassônica, o concreto permaneceu na mesma classificação na grande maioria dos pontos, indicando que essa queda é irrelevante para a durabilidade do concreto quanto a compacidade e homogeneidade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo será discorrido as considerações finais desta pesquisa, assim como propostas e sugestões para trabalhos futuros.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando que os resultados dos ensaios laboratoriais indicaram que, ao longo do tempo, com a variação da frente de carbonatação e de massa dos corpos de prova, a hipótese prevista foi corroborada e os objetivos alcançados.

Foi possível analisar a alteração dos seguintes parâmetros: frente de carbonatação, massa e velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Analisando esses três fatores, temos que a velocidade das ondas propagadas pelos corpos de prova diminuiu, assim como a massa dos testemunhos ensaiados devido à perda de água, e a frente de carbonatação aumentou, conforme o objetivo deste trabalho.

A velocidade da onda teve diminuição média de 98% no grupo A, 95% no grupo B e 91% no grupo C, enquanto a perda de massa foi de 0,12%, 0,44% e 0,75%, respectivamente. Já a carbonatação, analisando como referência os resultados obtidos após a primeira semana, se tem aumentos de 247% para os grupos A e B, e 333% para o grupo C.

Comparando esses fatores temos que a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas reagiu inversamente à penetração de CO₂. Como a presença da carbonatação do concreto preenche os poros, esses resultados foram inesperados. Porém, quando analisado a massa com a velocidade do pulso ultrassônicos, vemos tendências semelhantes onde, com a diminuição da massa dos CPs, temos também a diminuição da velocidade da onda ultrassônica. Com base nas literaturas apresentadas no capítulo 2 desta pesquisa, substratos umedecidos conduzem o pulso sônico mais rapidamente, se comparado ao

concreto seco, devido à presença de água nos poros do concreto que conduzem o som. Uma vez que temos perda de água dos corpos de prova, a tendência é que a velocidade também seja efetivamente menor. Isso é evidenciado mais claramente nos corpos de prova com relação a/c 0,65, uma vez que esses testemunhos possuem mais água em sua composição, eles também perdem mais água em suas primeiras idades.

Contudo, há o preenchimento parcial dos poros do concreto pelo carbonato de cálcio devido às reações químicas da carbonatação. Esses poros preenchidos tendem a conduzir a onda na mesma proporção, ao até mais rapidamente do que quando colmatados por água, porém, uma observação importante é que os corpos de prova não foram carbonatados completamente, indicando que a porosidade total do concreto não foi preenchida pelos materiais da carbonatação. Já a perda de água ocorre nos poros como um todo. Logo temos que os poros dos corpos de prova perderam água de forma homogênea, mas não foram carbonatados da mesma maneira, tendo apenas ocorrido a reação química em suas áreas superficiais. Portanto, o aumento da velocidade das ondas sônicas pelo concreto carbonatados foi insignificante a ponto de a perda de água ter mais influência nos resultados de ultrassom.

Com relação aos objetivos específicos propostos:

Sobre concretos com diferentes relações água/cimento, os ensaios comprovaram o que a literatura já afirma, quanto maior esse parâmetro, maior a penetração de gás carbônico, implicando é um maior e mais rápido avanço da frente de carbonatação. Isso se dá porque relações a/c elevadas tornam o concreto mais poroso, facilitando, assim, a penetração de agentes agressivos.

Com a realização da pesagem dos corpos de prova durante o tempo de ensaio, foi possível observar que houve uma perda de massa máxima de 0,87%. Esse valor foi obtido no corpo de prova com relação a/c mais elevada. Corpos de prova com menores relação água/cimento tiveram menos perda de massa.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, abaixo, proposições para novos trabalhos relacionados ao presente estudo:

- Realizar o mesmo programa experimental com corpos de prova de diferentes idades.
- Realcalinizar os corpos de prova com aspersão de solução alcalina e refazer os ensaios de ultrassom.
- Comparar a velocidade de propagação da onda ultrassónica em concretos moldados com cimentos de diferentes fornecedores.
- Comparar a velocidade de propagação da onda ultrassónica em concretos moldados com agregados diferentes.
- Realizar ruptura dos corpos de prova carbonatados.
- Realizar o mesmo ensaio fazendo mensuração da velocidade de propagação da onda pelos métodos indireto e semi-direto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-8802** - Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de propagação da onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.
- BAKKER, R.F.M. Initiation period. In.: SCHIESSL, P. (Ed.) **Corrosion of Steel in Concrete** - Report of Technical Committee 60CSC RILEM. London: Chapman & Hall Ltda, 1988.
- BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G.; GRANTHAM, M. G. **Testing of Concrete in Structures**. 4. ed. Londres, Taylor & Francis, 2006.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia. UFG; Co-edição São Paulo: Pini, 1997.
- CASCUDO, O. **Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão da armadura**. In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. 2v. ed. Geraldo C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005.
- COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- COSTA, R. M. **Estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- CHUNG, H. W., 1973, “Effects of embedded steel bars upon ultrasonic testing of concrete”, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 30, No. 102.
- CUNHA, A. C. Q. & HELENE, P. R. L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. São Paulo, 2001. Boletim Técnico – UPS
- FOCAOARU, I., 1984, “Romanian Achievements in Nondestructive Strength of Concrete”, *In Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit.
- HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.

ISAIA, G.C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** São Paulo, 1995. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.

KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para análise de eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação.** São Paulo, Tese (Doutorado) – CPGECC, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP.

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

MEDEIROS JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. **Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento.** *Revista ALCONPAT*, v.4, n.2, 2014.

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

MENDONÇA FILHO, F. F.; MIRA, M.; SILVA JUNIOR, J. Z. R. **A influência do ensaio não-destrutivo de ultra-som na avaliação das propriedades de concretos estruturais.** In: 53 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 53CBC2011, 2011.

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

NOGUEIRA, C.L., WILLIAN, K.J., 2001, “**Ultrasonic testing of damage in concrete under uniaxial compression**”, *ACI Materials Journal* , May.-June.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. **Fundamental Modeling Investigation of Concrete Carbonation.** *ACI Materials Journal* / July-August 1991.

PAPOVICS, S., 2001, “**Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship**”, *Materials Evaluation*. BERLIN. (2001).

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, 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). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PARROT, L.J. Damage caused by carbonation of reinforced concrete. **Materials and Structures**, v.23, 1990. (104-DCC: Damage Classification of Concrete Structures - RILEM).

PHOON, K.K., et al, 1999, “**Development of statistical quality assurance criterion for concrete using ultrasonic pulse velocity method**”, *ACIMaterial Journal* , September- October.

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). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da Cinza de Casca de Arroz residual com vistas à produção de cimento portland e/ou pozolânico**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

Pundit Manual, CNS Eletronics Ltd., London.

RILEM, NDT 1, 1972, ”**Testing of concrete by the ultrasonic pulse method**.”

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, 1993.

SCHRÖDER, F.; SMOLCZYK, H.G. **Carbonation and protection against steel corrosion**. In.: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT. Tokyo. (1968).

SILVA, V.M. (2007). **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação (Doutorado).

SILVA, V. M.; LIBORIO, J. B. L. **Influência da sílica ativa e tipos de cimentos Portland na carbonatação.** *In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 2002.

STURRUP, V. R., VECCHIO, F. J., and CARATIN, H., 1984, **“Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength”**, *In Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, Special Publication SP-82, American Concrete Institute.

TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: Monitoramento em longo prazo e análise de microestrutura.** 2012. Dissertação de Mestrado – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - UFSM.