



**ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À FRENTE DE CARBONATAÇÃO
DE CONCRETO DOSADO COM DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS:
ROCHA CALCÁRIA DOLOMÍTICA, BASÁLTICA E DIABÁSIO**

CURITIBA

2020



**CLAUDIO BETENHEUSER
GISELE DE JESUS NERIS
RENNAN ARAUJO VARGAS LEAL**

**ESTUDO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À FRENTE DE CARBONATAÇÃO
DE CONCRETO DOSADO COM DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS:
ROCHA CALCÁRIA DOLOMÍTICA, BASÁLTICA E DIABÁSIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Pós-Graduação
em Patologia das Obras Civas, Pós-
Graduação lato sensu do Instituto IDD,
como requisito parcial para a obtenção do
Grau de Especialista em Patologia nas
Obras Civas.
Orientador: Prof. LUIS CÉSAR L. DE
LUCA

CURITIBA

2020

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos professores que nos apoiaram e de alguma forma nos ajudaram para a realização deste trabalho.

Agradecemos aos nossos familiares pelo apoio e a paciência em nos suportar nos momentos críticos e quando tivemos que nos ausentar de alguns momentos em família.

Claudio – dedico este trabalho à minha falecida esposa que me acompanhou e me apoiou até onde lhe foi possível.

Agradecemos ao Laboratório de Engenharia da Universidade Federal do Paraná em Curitiba, na pessoa do Prof. Marcelo Medeiros, pela colaboração nos ensaios laboratoriais realizados, os quais tornaram possíveis a obtenção de alguns dos resultados neste trabalho apresentados.

RESUMO

O presente trabalho possui como objetivo o estudo comparativo da resistência à frente de carbonatação do concreto, dosado com rochas do tipo calcárias dolomíticas, em comparação a rochas basálticas e diabásio. O uso de rocha calcária dolomítica nos concretos traz benefícios para Curitiba e imediações, nos aspectos tecnológicos, econômicos, sociais e ambientais, devido à proximidade das jazidas. Prevê-se que, com mais estudos e pesquisas relacionados a esse tipo de rocha, aumenta-se a credibilidade e popularização de seu uso no concreto em estruturas da construção civil. De modo a cumprir o objetivo principal deste trabalho, executou-se um programa experimental com 18 corpos de prova destinados à análise comparativa da frente de carbonatação, utilizando-se câmara de carbonatação acelerada por período de 60 dias com grau concentração interna de CO_2 de 5 +/- 0,5%, umidade relativa de 65 +/- 1% e temperatura 23 +/- 1°C, isto após pré-condicionamento para estabilização da umidade interna dos CPs; e, a título de corroboração aos resultados, executou-se outros 18 corpos de prova destinados à análise comparativa da resistência à compressão. Para a composição dos CPs foram utilizados agregados graúdos oriundos de rochas da região de Curitiba, adquiridos em lojas comerciais, sem diferenciação dos materiais usualmente adquiridos para o uso geral na construção civil. Os resultados indicam que os concretos executados com agregado graúdo de rocha calcária dolomítica apresentaram resistências similares aos concretos executados com agregados de rochas basáltica e diabásio, tanto no que tange à frente de carbonatação quanto à resistência à compressão.

Palavras-chave: concreto, agregado, carbonatação, rocha basáltica, rocha calcária dolomítica, rocha diabásio.

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Resistência relativa aproximada do concreto segundo o tipo do cimento	19
Tabela 02 – Base comparativa para estudo e avaliação dos resultados de ruptura dos corpos-de-prova. Propriedades do cimento CPI S	28
Tabela 03 – Composição dos cimentos comum e composto	29
Tabela 04 – Traços de concreto utilizados para confecção dos CPs	50
Tabela 05 – Determinação da quantidade de corpos de prova	53
Tabela 06 – Determinação de resultados dos testes de Abatimento	54
Tabela 07– Classificação relacionando a velocidade de ultrassom à qualidade do concreto	59
Tabela 08 – Qualidade de concretos pelo método Torrent	63
Tabela 09 – Leituras da frente de carbonatação para o agregado basalto, resistência menor	64
Tabela 10 – Leituras da frente de carbonatação para o agregado calcário, resistência menor	65
Tabela 11 – Leituras da frente de carbonatação para o agregado diabásio, resistência menor	65
Tabela 12 – Classificação das profundidades médias de carbonatação aos 28 dias de leitura - Resistência menor	66
Tabela 13 – Leituras da frente de carbonatação para o agregado basalto, resistência maior	67
Tabela 14 – Leituras da frente de carbonatação para o agregado calcário, resistência maior	67
Tabela 15 – Leituras da frente de carbonatação para o agregado diabásio, resistência maior	68
Tabela 16 – Classificação das profundidades médias de carbonatação aos 84 dias de leitura – Resistência Maior	68
Tabela 17 – Leitura da velocidade de ultrassom em m/s	70
Tabela 18 – Leitura de permeabilidade ao ar para os agregados basalto, calcário e diabásio, resistências maior e menor, antes da carbonatação	72
Tabela 19 – Leitura de permeabilidade ao ar para os agregados basalto, calcário e diabásio, resistências maior e menor, após a carbonatação	72
Tabela 20 – Tabela de resultados de resistência à compressão para todos os traços e rochas utilizadas	75
Tabela 21 – Tabela dos resultados médios de resistência à compressão	75
Tabela 22 – Tabela dos resultados de Abatimento	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Influência de superfície específica do cimento sobre a resistência do concreto.....	18
Figura 02 – Gráfico da influência de cimento (classificação ASTM) sobre a resistência do concreto em função da idade	19
Figura 03 – Gráfico da curva granulométrica da brita calcária natural entre os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211/2009 para a zona 9,5/25	22
Figura 04 – Gráfico da curva granulométrica da brita calcária lavada na peneira 0,075 mm	23
Figura 05 – Gráfico da curva granulométrica da brita calcária lavada na peneira 4,75 mm	23
Figura 06 – Gráfico da curva granulométrica da brita calcária peneirada na peneira 0,075 mm	24
Figura 07 – Fatores que afetam a resistência à compressão – quadro esquemático	27
Figura 08 – Gráfico da evolução média da resistência à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland	29
Figura 09 – Gráfico que apresenta a vida útil do concreto (MEHTA, 2008)	30
Figura 10 – Intervenção combinada de três fases: gasosa, aquosa e sólida durante o processo de carbonatação dos hidróxidos de cálcio	38
Figura 11 – Agregado graúdo sendo quarteado para confecção dos CPs segundo a NBR 5738	51
Figura 12 – Cimento sendo pesado para confecção dos CPs	51
Figura 13 – Teste de granulometria do agregado graúdo, executado em peneiras com agitador	52
Figura 14 – Agregado graúdo sendo aquecido para evaporação da água e posterior aferição da massa seca	52
Figura 15 – Execução da moldagem dos CPs de acordo com a norma acima cita	54
Figura 16 – Identificação dos CPs	55
Figura 17 – Cura submersa dos CPs em temperatura de 22°C	55
Figura 18 – Ensaio dos CPs não-carbonatados com rocha basáltica	57
Figura 19 – Ensaio dos CPs não-carbonatados com rocha diabásio	57
Figura 20 – Ensaio dos CPs não-carbonatados com rocha calcária dolomítica	58
Figura 21 – Esquema do posicionamento dos transdutores para as medidas de velocidade de ultrassom nos corpos de prova cilíndrico 10cmx20cm	59
Figura 22 – Esquema do mecanismo de carbonatação	60
Figura 23 – Câmara de carbonatação do laboratório LAME/DCC/CESEC da UTFPR	61
Figura 24 – Esquema das leituras realizadas nos corpos de prova deste estudo de carbonatação acelerada	62

Figura 25 – Ilustração do equipamento utilizado na leitura de kT pelo método de Torrent	62
Figura 26 – Agregado graúdo calcário dolomítico utilizado na confecção dos CPs	88
Figura 27 – Procedimento de separação dos materiais em equipamento quarteador conforme norma	88
Figura 28 – Equipamentos, seleção de agregado miúdo através do quarteador, separação de grãos	89
Figura 29 – Balança de precisão para aferição e conferência da massa em gramas para realização dos traços desejados	89
Figura 30 – Agitador de peneiras de modo a vibrar a peneira	90
Figura 31 – Pesagem do agregado graúdo, balança de precisão para aferição e conferência da massa	90
Figura 32 – Equipamento de secagem para remoção da umidade do agregado graúdo	91
Figura 33 – Execução de secagem do agregado miúdo, procedimento de cálculos e análises	91
Figura 34 – Pesagem agregado miúdo, balança de precisão para aferição e conferência da massa em gramas para realização dos traços	92
Figura 35 – Pesagem do cimento, balança de precisão para aferição e conferência de massa em gramas para realização dos traços	92
Figura 36 – Betoneira utilizada para mistura dos materiais de modo a formar uma pasta de concreto utilizada para fazer os corpos de prova (CPs)	93
Figura 37 – Aplicação de desmoldante nas peças de moldes metálicos	93
Figura 38 – Cronômetro	94
Figura 39 – Cimento utilizado CPIIF32	94
Figura 40 – Etapa de procedimento do teste de Abatimento	95
Figura 41 – Aferição do Abatimento	95
Figura 42 – Desmoldagem dos corpos de prova após 1 dia para imersão em água	96
Figura 43 – Demarcação e identificação dos corpos de prova	96
Figura 44 – Organização e classificação dos corpos de prova antes da colocação na câmara de carbonatação	97
Figura 45 – Preparativos das quantidades de agregado miúdo antes da pesagem de modo a conferir ao trabalho porções exatas de medidas	97
Figura 46 – Pesagem do agregado graúdo, balança de precisão para aferição e conferência massa em gramas para realização dos traços	98
Figura 47 – Dosagem de água para o concreto	98
Figura 48 – Corpos de água prova imersos em água para realização de cura submersa	99
Figura 49 – Apiloamento da pasta de concreto para teste de Abatimento conforme NBR 67/1998	99

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Fluxograma de atividades do programa experimental	47
Gráfico 02 – Profundidade da frente de carbonatação ao longo do tempo para os concretos do traço 01, resistência menor	66
Gráfico 03 – Profundidade da frente de carbonatação ao longo do tempo para os concretos do traço 02, resistência maior	69
Gráfico 04 – Velocidade de ultrassom dos concretos do estudo para o traço 01 (resistência menor) e o traço 02 (resistência maior)	71
Gráfico 05 – Permeabilidade ao ar pelo método Torrent para os concretos do traço 01 (menor resistência) e traço 02 (maior resistência)	73
Gráfico 06 – Resistências à compressão para o traço 01	76
Gráfico 07 – Resistências à compressão para o traço 02	77
Gráfico 08 – Abatimento para traço 01	78
Gráfico 09 – Abatimento para traço 02	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C2S	Silicato dicálcico
C3S	Silicato tricálcico
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CH	Hidróxido de cálcio
CEB	Comité Euro - International du Béton
CPs	Corpos de prova em concreto
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	12
1.2 HIPÓTESE.....	12
1.3 OBJETIVO.....	12
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	12
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.4 JUSTIFICATIVAS.....	13
1.4.1 JUSTIFICATIVAS TECNOLÓGICAS.....	14
1.4.2 JUSTIFICATIVAS ECONÔMICAS E SOCIAIS.....	14
1.4.3 JUSTIFICATIVAS ECOLÓGICAS.....	15
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	15
1.6 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 O CONCRETO.....	17
2.1.1 CIMENTO.....	18
2.1.2 AGREGADOS.....	20
2.1.2.1 AGREGADO GRAÚDO.....	20
2.1.2.2 AGREGADO MIÚDO.....	24
2.1.3 ÁGUA E RELAÇÃO ÁGUA / CIMENTO.....	25
2.2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	26
2.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	26
2.2.2 TRABALHABILIDADE.....	30
2.3 FENÔMENOS E ATAQUES SOFRIDOS PELO CONCRETO.....	31
2.4 CARBONATAÇÃO.....	34
2.4.1 MECANISMO DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO.....	36
2.4.2 CARACTERÍSTICAS DOS CARBONATOS DE CÁLCIO FORMADOS.....	37
2.4.3 CONSEQUÊNCIAS DA CARBONATAÇÃO.....	38
2.4.4 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO.....	39
2.4.5 MECANISMOS DE TRANSPORTE DOS AGENTES AGRESSIVOS.....	40
2.5 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO.....	40
2.5.1 CÂMARA DE CARBONATAÇÃO.....	45
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	47

3.1 SISTEMATIZAÇÃO	47
3.2 DETERMINAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS	49
3.3 TRAÇOS DO CONCRETO UTILIZADOS	49
3.4 QUANTIDADE E DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA	53
3.5 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	53
3.6 CURA SUBMERSA DOS CORPOS DE PROVA	55
3.7 ACONDICIONAMENTO DOS CPS NA CÂMARA DE CARBONATAÇÃO	56
3.8 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CPS.....	56
3.9 MÉTODOS DE ENSAIO	58
3.9.1 ENSAIO DE VELOCIDADE DE ULTRASSOM – PROCEDIMENTO	59
3.9.2 ENSAIO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO – PROCEDIMENTO	60
3.9.3 ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO AR - PROCEDIMENTO	62
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS	64
4.1 FRENTE DE CARBONATAÇÃO	64
4.2 VELOCIDADE DE ULTRASSOM.....	69
4.3 PERMEABILIDADE AO AR	71
4.4 ANÁLISE DA CARBONATAÇÃO E DEMAIS ENSAIOS DOS CPS	73
4.5 RESULTADOS E ANÁLISES DO ROMPIMENTO DOS CPS	74
4.6 ANÁLISE DA TRABALHABILIDADE	77
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	80
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
7 ANEXOS	88
7.1 IMAGENS DE EXECUÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	88
7.2 RELATÓRIO DE ENSAIOS – CARBONATAÇÃO, PERMEABILIDADE AO AR E VELOCIDADE DE ULTRASSOM	100

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho possui como temática principal a comparação da interferência da natureza do agregado graúdo na resistência à frente de carbonatação do concreto.

O concreto é o material de construção mais consumido no mundo (MEHTA e MONTEIRO, 2008) ficando atrás apenas da água. Geralmente, o concreto comum é composto por cimento, areia (agregado miúdo), brita (agregado graúdo) e água. Para os concretos especiais adicionam-se ainda plastificantes, pozolanas, escórias de alto-forno, entre outros. (IBRACON, 2009)

Este trabalho se atém especialmente às propriedades e características físico-químicas do agregado graúdo, e dele no concreto. O agregado graúdo utilizado no concreto pode ser proveniente de vários tipos de rochas. De acordo com a ABNT, norma NBR 9935 (ABNT, 1987), agregado é um material sem forma e volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassa de concreto. É utilizado para a confecção do concreto como matéria prima mineral de fontes não renováveis, tornando-se um fator de alto impacto ambiental, para amenizar esse impacto, é necessário que o uso desses recursos seja maximizado, aumentando a vida útil das jazidas, através também do planejamento de ações cautelares que colaborem com a qualidade das estruturas, além da busca incessante por novos materiais – como outros tipos de rochas ou resíduos da construção (ou de outros processos) – que aumentem o rol de materiais alternativos a serem utilizados na confecção do concreto. Vale ressaltar que o sistema construtivo consome em média 50% dos recursos minerais produzidos no planeta. (NEVILLE, 1997)

A pedra britada utilizada em grande escala no concreto levanta questões sobre sua interferência na resistência mecânica e a frente de carbonatação do concreto.

O uso alternativo da Rocha Calcária Dolomítica como agregado graúdo no concreto levanta dúvidas sobre sua aplicabilidade, seus eventuais benefícios e/ou malefícios sobre a massa de concreto. A falta de informações detalhadas faz com que essa rocha seja menos utilizada na construção civil.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Concretos dosados com diferentes tipos de agregado graúdo – rochas calcária dolomítica, basáltica e diabásio – possuem diferentes resistências à frente de carbonatação?

1.2 HIPÓTESE

Presume-se que os concretos dosados com agregados de rocha calcária dolomítica possuem menor resistência à frente de carbonatação em comparação a concretos dosados com agregados de rocha basalto ou rocha diabásio, devido ao fato da rocha calcária dolomítica ser de composição sedimentar, ou seja, oriunda da sedimentação de partículas intemperizadas em superfícies côncavas (baixios do terreno original), além de ser possível a formação por precipitações de calcita que ocorreram em superfícies retilíneas (OLIVEIRA, 2012).

1.3 OBJETIVO

Neste item serão declarados os objetivos geral e específico deste trabalho.

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Comparar a resistência à frente de carbonatação de concreto dosado com diferentes tipos de agregados: rocha calcária dolomítica, basáltica e diabásio.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Comparar a resistência à velocidade do pulso ultrassônico nos corpos de prova (CPs) confeccionados com as rochas: calcária dolomítica, basalto e diabásio;
- b) Comparar a permeabilidade ao ar nos CPs confeccionados;
- c) Comparar a interferência dos agregados de rochas (calcário dolomítico, basalto e diabásio) na resistência à compressão do concreto;
- d) Comparar a interferência dos agregados das diferentes rochas já citadas na trabalhabilidade do concreto em estado fresco.

1.4 JUSTIFICATIVAS

De acordo com Gomes (2007) apud Guimarães et al (2010), sobre a carbonatação:

A carbonatação é um fenômeno natural, onde o concreto sofre a agressão do Dióxido de Carbono presente no meio, transformando o hidróxido de Cálcio presente, em Carbonato de Cálcio mais água, gerando a diminuição da alcalinidade da peça e a redução de volume (retração por carbonatação).

A carbonatação está diretamente relacionada à penetração do dióxido de carbono, por meio dos poros, para o interior do concreto. O qual na presença da umidade transforma-se em ácido carbônico (HCO_3) –, que é reativo.

O ingresso do dióxido de carbono nos poros do concreto, em concentrações normais atmosféricas - com variação de 0,03% a 1,0% em volume - é causado pela difusão. Essa difusão realiza-se por meio de poros capilares interconectados (rede capilar), microfissuras ou bolhas de ar. Determinados agregados são porosos e também podem fazer parte do sistema de transporte. (RICHARDSON, 1988).

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 CO_2 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 CO_2 encontra para difundir-se. (SILVA, 2007).

Sendo assim, pode-se dizer que a resistência à frente de carbonatação é inversamente proporcional à profundidade da carbonatação no concreto. E depende, entre outros fatores, das características do agregado graúdo usado. Há o mito de que a rocha calcária dolomítica – por sua constituição natural – tende a propiciar ou até acelerar o fenômeno de carbonatação. Em se provando de que isso não é fato, ou seja, é apenas um mito, viabiliza o uso da rocha calcária dolomítica como agregado graúdo em concretos.

O uso de rocha calcária dolomítica nos concretos traz benefícios para Curitiba e imediações, nos aspectos tecnológicos, econômicos, sociais e ambientais, devido à proximidade das jazidas.

Prevê-se que, com mais estudos e pesquisas relacionados a esse tipo de rocha aumenta-se a credibilidade e popularização de seu uso no concreto em estruturas da construção civil.

1.4.1 JUSTIFICATIVAS TECNOLÓGICAS

Criou-se uma cultura popular de que o uso de rochas calcárias – ou rochas brancas – são inadequadas para utilização no concreto armado. É mister saber o porquê, se é devido à sua resistência e/ou é mais suscetível à frente de carbonatação. Enfim, desmistificar e trazer dados técnicos que sejam embasados em análises de experimentos.

1.4.2 JUSTIFICATIVAS ECONÔMICAS E SOCIAIS

Em Curitiba e região metropolitana, a oferta de rocha calcária dolomítica é abundante, porém a frequente preferência por rochas basálticas ou diabásio – as quais são escassas nessa região – obriga que sejam transportadas de Ponta Grossa e outras regiões vizinhas, o que gera custos elevados devido ao transporte.

Em geral, o preço de mercado do agregado graúdo derivado de rocha calcária dolomítica é cerca de 30% abaixo do preço de aquisição de agregados derivados de outras rochas, isto com base em pesquisas simples de mercado realizadas na região de Curitiba.

Essa diferença de preço da rocha calcária dolomítica é de suma importância principalmente para as construções de baixo custo, como exemplo as casas e conjuntos habitacionais populares.

A desmistificação de características negativas que eventualmente a rocha calcária traria ao concreto abre oportunidades a proprietários de jazidas de rocha calcária a que possam explorar comercialmente, aumentando a quantidade de empregos nos trabalhos de exploração das pedreiras.

A rocha calcária dolomítica é pouco explorada comercialmente como agregado graúdo na produção de concretos. A desmistificação também incrementa valor a este material para os concretos, validado por estudos que apresentem

resultados seguros e que agregam confiabilidade ao aumento da exploração comercial da rocha calcária dolomítica.

1.4.3 JUSTIFICATIVAS ECOLÓGICAS

As jazidas de rochas de basalto e diabásio têm sido muito exploradas e com isso influenciam negativamente no ecossistema natural das regiões onde são extraídas. Com a utilização da rocha calcária dolomítica busca-se uma nova forma de equilibrar e amenizar as retiradas de grande volume de uma só região.

Prevê-se também uma redução da poluição ambiental, visto que os deslocamentos dos agregados por caminhões em rodovias seria reduzido, lembrando que o tráfego pesado contribui para o desgaste dos pavimentos diminuindo a vida útil dos mesmos.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a realização deste trabalho foi utilizado o método de pesquisa chamado Programa Experimental.

Foram tomados os seguintes passos:

- Confeção dos corpos de prova de concreto com base no método de dosagem ABCP/ACI, adaptado aos diferentes tipos de agregados graúdos utilizados neste trabalho (calcária dolomítica, basalto e diabásio), para baixa e alta resistência (conforme termos utilizados pela ABCP).
- Determinação da quantidade e dimensões de corpos de prova, com o total de 36 CPs com dimensões 100 mm x 200 mm, sendo 18 CPs para ensaio da Frente de Carbonatação e 18 CPs para ensaios de Resistência à Compressão.
- Moldagem dos CPs e determinação do prazo de cura submersa dos CPs.
- Determinação dos prazos de permanência dos CPs na Câmara de Carbonatação.
- Determinação da porcentagem de CO₂ a que os CPs foram submetidos.

- Acondicionamento dos CPs em Câmara de Carbonatação nos prazos e porcentagem de CO₂ estipulados.
- Para os CPs destinados à verificação das Resistências Mecânicas à Compressão, foi realizado o rompimento em prensa hidráulica em 90 dias após a concretagem.
- Para os CPs submetidos à Câmara de Carbonatação: após 60 dias na Câmara, foi executado o corte de 5 cm para leitura com aplicação de Fenolftaleína.
- Comparação e análise gráfica dos resultados obtidos nos ensaios especificados.
- Análise técnica e conclusões finais.

1.6 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho apresenta no capítulo 1 a Introdução, Problema de Pesquisa, Hipótese, Objetivos, Justificativas, Procedimentos Metodológicos.

No capítulo 2 tem-se a Fundamentação Teórica, que abordou a temática deste trabalho com os conceitos necessários à contextualização e explanando as principais características dos materiais utilizados neste estudo experimental.

No capítulo 3 apresenta-se o Programa Experimental e Sistematização, com definições dos métodos de ensaio desde a classificação e execução dos CPs de concreto, as medições de Abatimento (Slump test), os processos de cura úmida e condicionamento, a câmara de carbonatação e as medições de ultrassom, permeabilidade e frente de carbonatação.

No capítulo 4 faz-se a Apresentação e Análise dos Resultados, com tabelas e gráficos, que embasam as considerações finais.

Por fim no capítulo 5 encontram-se as Considerações Finais e recomendações para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partir deste capítulo faz-se a Fundamentação Teórica devidamente embasada para o presente trabalho. São apresentados os conceitos básicos dos materiais componentes do concreto de cimento Portland; na sequência, tem-se as características físicas do concreto e, por fim, os fenômenos e ataques sofridos pelo concreto.

2.1 O CONCRETO

O concreto é o material de construção mais consumido no mundo (MEHTA e MONTEIRO, 2008) ficando atrás apenas da água. Geralmente, o concreto comum é composto por cimento, areia (agregado miúdo), brita (agregado graúdo) e água. Para os concretos especiais adicionam-se ainda plastificantes, pozolanas, escórias de alto-forno, entre outros.

Segundo Carvalho (2014), o concreto apresenta as seguintes vantagens:

- Apresenta boa resistência à maioria das solicitações.
- Tem boa trabalhabilidade e por isso se adapta a várias formas, podendo assim, ser escolhida a mais conveniente do ponto de vista estrutural, dando maior liberdade ao projetista.
- Permite obter estruturas monolíticas, o que não ocorre com as de aço, madeira e pré-moldadas. Existe aderência entre o concreto já endurecido e o que é lançado posteriormente, facilitando a transmissão de esforços.
- As técnicas de execução são dominadas em todo o país.
- Em diversas situações, pode competir com as estruturas de aço em termos econômicos.
- É um material durável, desde que seja bem executado, conforme as normas, e evitado o uso de aceleradores de pega, cujos produtos químicos podem corroer as armaduras.
- Apresenta durabilidade e resistência ao fogo superiores em relação à madeira e ao aço, desde que os cobrimentos e a qualidade do concreto

estejam de acordo com as condições do meio em que está inserida a estrutura.

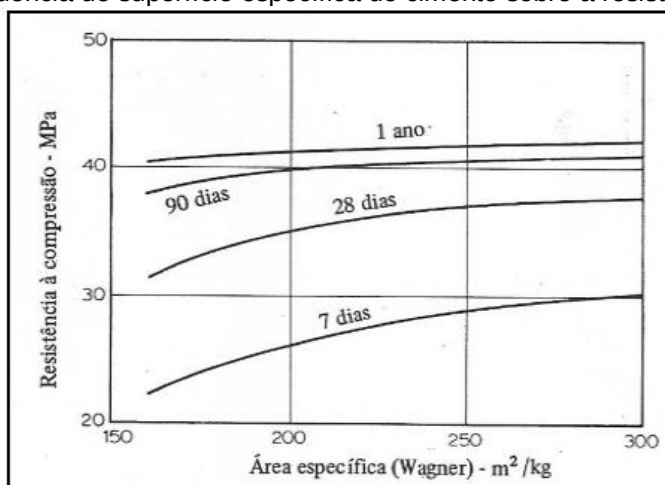
- Possibilita a utilização da pré-moldagem, proporcionando maior rapidez e facilidade de execução.
- É resistente a choques e vibrações, efeitos térmicos, atmosféricos e desgastes mecânicos

2.1.1 CIMENTO

Em geral, se chamam aglomerantes hidráulicos aqueles produtos que amassados com água, se moldam e endurecem tanto expostos ao ar como submersos em água, por serem estáveis em tais condições os compostos resultantes de sua hidratação. O aglomerante hidráulico mais importante é o cimento.

Segundo Neville (1997) apud Kihara e Centurione (2005), a finura e a distribuição granulométrica do cimento têm importância vital para o comportamento reológico e desempenho mecânico do concreto. Conforme mostra a Figura 01, a velocidade de hidratação e o crescimento rápido da resistência dependem da finura das partículas do cimento.

Figura 01 - Influência de superfície específica do cimento sobre a resistência do concreto



Fonte: NEVILLE (1997).

Mehta e Monteiro (2008) apresenta a relação percentual de resistência à compressão de concretos fabricados com diferentes tipos de cimento, classificados de acordo com as normas da ASTM¹. A Tabela 01 ilustra graficamente estas relações.

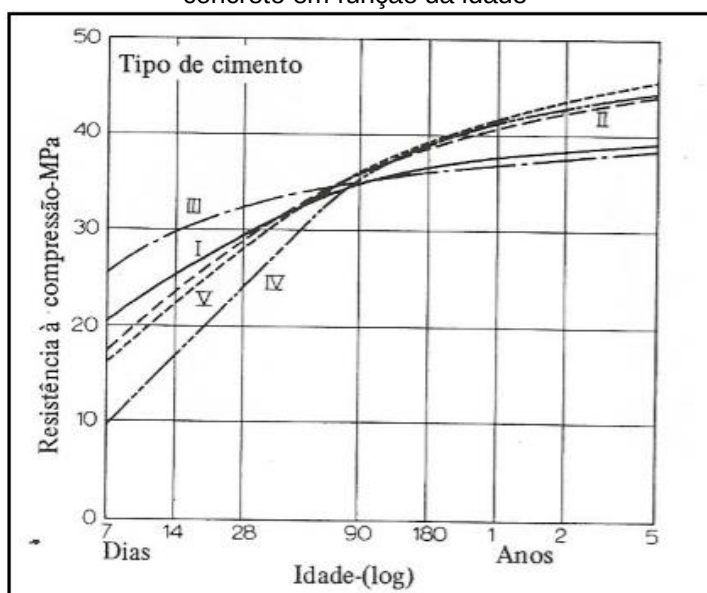
Tabela 01 - Resistência relativa aproximada do concreto segundo o tipo de cimento

Tipo de cimento Portland (segundo)	Natureza	Resistência à compressão (percentual em relação ao cimento tipo I)			
		1 dia	7 dias	28 dias	90 dias
I	Normal ou de uso comum	100	100	100	100
II	Calor de hidratação moderado e moderada resistência a sulfatos	75	85	90	100
III	Alta resistência inicial	190	120	110	100
IV	Baixo calor de hidratação	55	85	75	100
V	Resistente a sulfatos	85	75	85	100

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, (2008).

A correspondência entre a classificação dos cimentos segundo as normas da ASTM¹ com a das normas da ABNT¹ está apresentada no gráfico da Figura 02.

Figura 02 – Gráfico da Influência do tipo de cimento (classificação ASTM¹) sobre a resistência do concreto em função da idade



Fonte: NEVILLE, (1997).

¹ Os autores citados não especificam os números das normas ASTM e NBR usadas nos comparativos.

Segundo Alhadas (2008), o processo de hidratação do cimento inicia-se pela superfície das partículas e, assim, a área específica do material assume a qualidade de um importante parâmetro desse processo. Quanto mais fino estiver o cimento, maior será a velocidade de hidratação. Portanto, segundo Odler (1991), apud Kihara e Centurione (2005), para o desenvolvimento rápido da resistência mecânica do concreto são necessários um grau de finura elevado do cimento.

2.1.2 AGREGADOS

2.1.2.1 AGREGADO GRAÚDO

Para os autores Mehta e Monteiro, o agregado é considerado como: “Agregado é o material granular, como areia, cascalho, pedra esmagada, escória de alto-forno, ou resíduos de construção ou demolição.” (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 11). São materiais minerais, granulares, inertes, utilizados principalmente em obras de infraestrutura e edificações. Os agregados mais comuns são pedra britada, areia e cascalho, e são as substâncias minerais mais consumidas no Brasil e no mundo (ANEPAC, 2015).

Apresentam uma granulometria entre 25 mm a 4,75 mm conforme a ABNT (ABNT, NBR-NM-248, 2003)

As britas são os agregados graúdos mais usados no Brasil, com uso superior a 50% do consumo total de agregado graúdo nos concretos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Alhadas (2008), a forma do agregado se refere à sua geometria tridimensional. Neville (1997) revela que como é difícil representar corpos tridimensionalmente irregulares, é mais conveniente definir certas características geométricas desses corpos, tais como alongamento, achatamento, cubicidade e esfericidade. A textura superficial do agregado tem influência sobre sua aderência com a pasta de cimento.

Tanto a forma quanto a textura do agregado exercem forte influência sobre a resistência a compressão do concreto principalmente nas primeiras idades. Segundo Neville (1997), o efeito da forma e da textura é mais significativo em concretos de

alta resistência. Ao mantermos a mesma mineralogia do agregado, os concretos com agregado de superfície mais rugosa, tendem a apresentar maior resistência que os concretos com agregado de superfície mais lisa.

O aumento da dimensão máxima do agregado, para uma mesma mineralogia, pode ter dois efeitos opostos sobre a resistência do concreto. Utilizando o mesmo teor de cimento e mesma consistência do concreto, as misturas do concreto com agregados maiores requerem menos água de amassamento do que aquelas que contem agregados menores. (NUNES, 2005).

Um estudo de Okamura & Ouchi (2003) apresenta a relação da razão entre os agregados: a mistura entre graúdos e miúdos produz um empacotamento benéfico à consistência do concreto. O pedrisco – também conhecido como brita zero – proveniente de rochas calcárias, graníticas ou basálticas, apresenta uma granulometria entre 9,5 mm a 2,4 mm conforme NBR 248 (ABNT, NBR-NM-248, 2003); pode ser usado na composição do concreto como agregado com a finalidade de produzir melhora na trabalhabilidade da pasta em estado fresco.

Segundo DNPM (2001), as britas produzidas no Brasil são:

- Rochas Graníticas e Gnáissicas = 85%
- Rochas Calcárias (Calcário Dolomítico) = 10%
- Rochas Basálticas = 5%

De acordo com MORAIS et al (2016), agregados são materiais adicionados à massa de cimento e água para dar-lhe “corpo”, tornando-a mais econômica. Hoje eles representam cerca de oitenta por cento do peso do concreto e sabemos que além de sua influência benéfica quanto à retração e à resistência, o tamanho, a densidade e a forma dos seus grãos podem definir várias das características desejadas em um concreto.

Segundo Quaresma (2016), rochas para britagem são facilmente encontradas na natureza. As rochas mais comumente usadas na produção de brita são granito, gnaiss, basalto, diabásio, calcário e dolomito. No entanto, o tipo granítica se destaca nesta finalidade. No Brasil, cerca de 85% da brita produzida vem de granito/gnaiss, 10% de calcário/dolomito e 5% de basalto/diabásio.

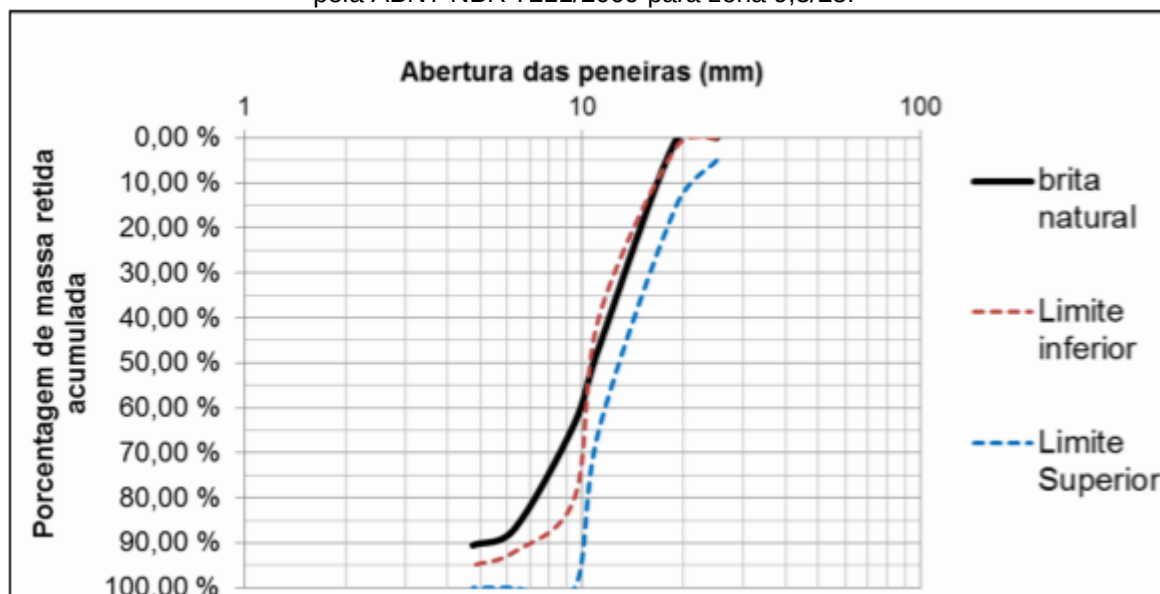
Segundo Moraes et al (2016), a baixa representatividade do uso da rocha calcária para a produção de brita retrata a escassez de conhecimento acerca da utilização adequada deste tipo de agregado. Em geral, a dúvida dos consumidores se ampara na credibilidade da brita granítica, apesar do custo maior em relação a brita calcária, uma vez que suas características são bem difundidas e estudadas. A brita calcária possui propriedades diferentes, que requerem estudos que esclareçam a melhor técnica e finalidade deste agregado.

No entanto, Silva Júnior (2014) afirma que nem todo o calcário disponível nesta região serve para a fabricação de cimentos, sendo classificado como material de segundo plano. Este material não possui ainda uma destinação amplamente conhecida, e sua utilização como pedra a ser britada ainda necessita de investigações.

De acordo com Moraes et al (2016) apresenta-se a seguir gráficos contendo as curvas das britas calcárias em vários limites granulométricos conforme ABNT NBR 7211/2009.

Abaixo a Figura 03 apresenta o gráfico da curva granulométrica da brita calcária natural entre os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211/2009 para zona 9,5/25.

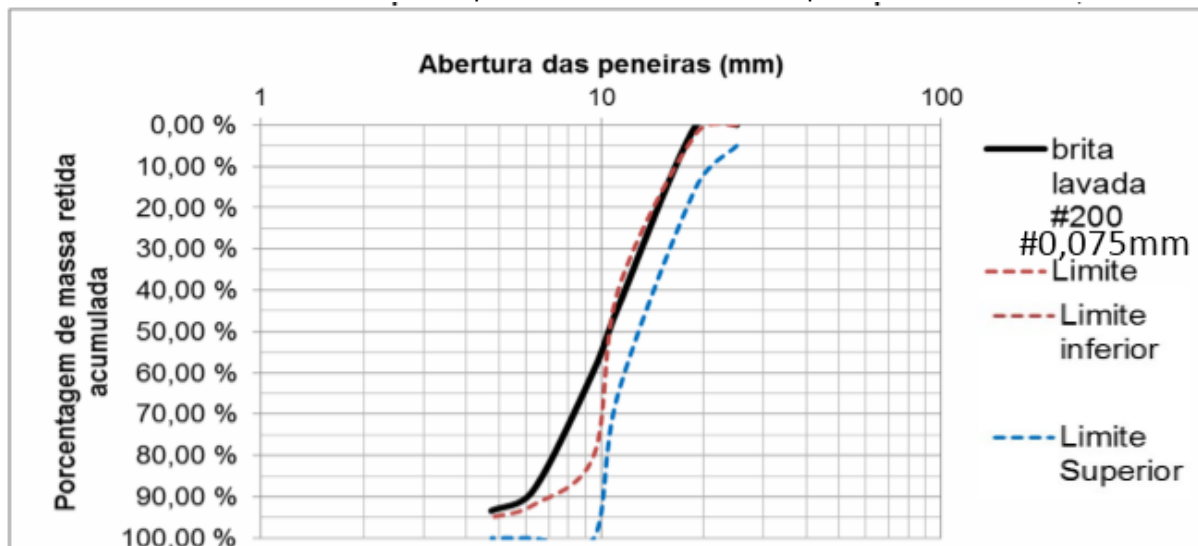
Figura 03 - gráfico da Curva Granulométrica da brita calcária natural entre os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211/2009 para zona 9,5/25.



Fonte: ABNT NBR 7211/2009.

Abaixo a Figura 04 com o gráfico da curva granulométrica da brita calcária lavada na peneira 0,075 mm entre os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211/2009 para zona 9,5/25.

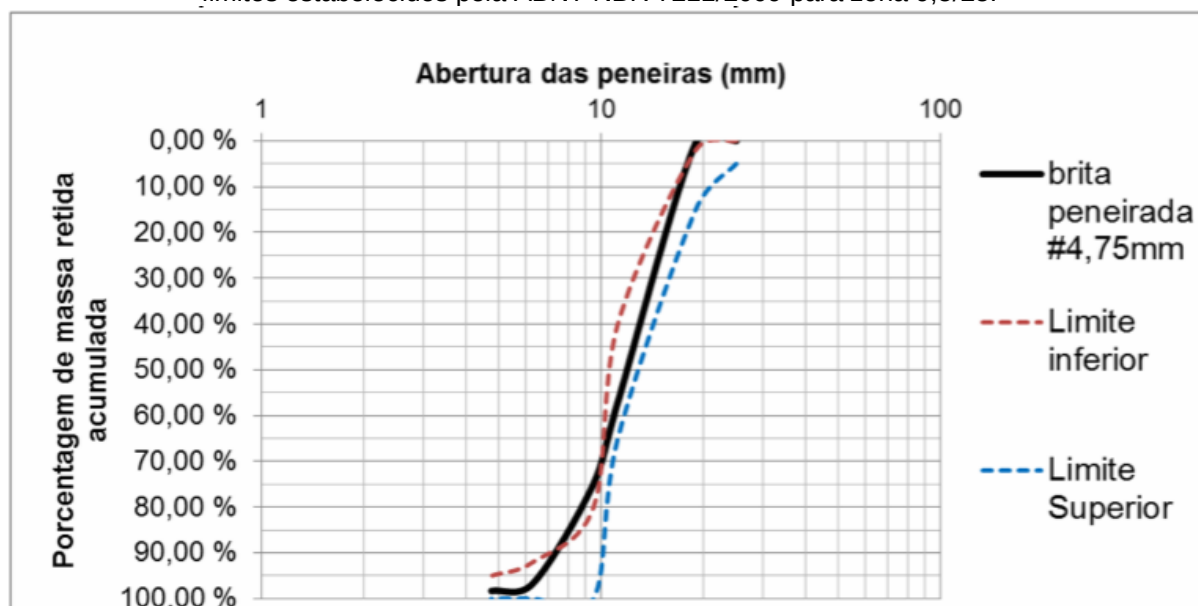
Figura 04 - gráfico com a Curva Granulométrica da brita calcária lavada na peneira 0,075 mm entre os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211/2009 para zona 9,5/25.



Fonte: ABNT NBR 7211/2009.

Abaixo a Figura 05 com o gráfico da curva granulométrica da brita calcária lavada na peneira 4,75 mm entre os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211/2009 para zona 9,5/25.

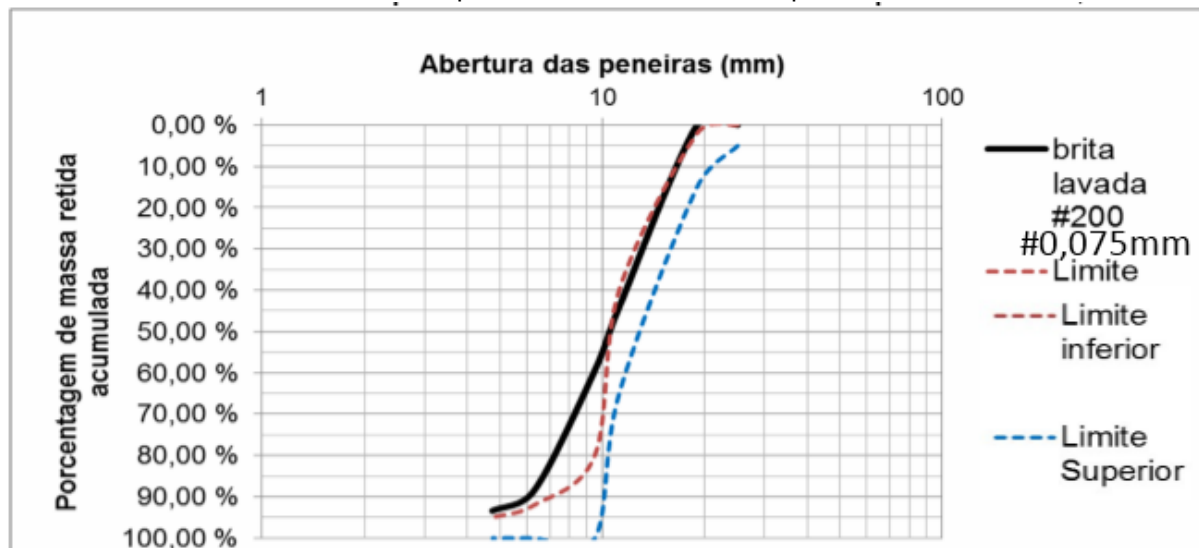
Figura 05 - gráfico com a Curva Granulométrica da brita calcária lavada na peneira 4,75 mm entre os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211/2009 para zona 9,5/25.



Fonte: ABNT NBR 7211/2009.

Abaixo a Figura 06 com o gráfico da curva granulométrica da brita calcária peneirada na peneira 0,075 mm entre os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211/2009 para zona 9,5/25.

Figura 06 - gráfico da Curva Granulométrica da brita calcária peneirada na peneira 0,075 mm entre os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211/2009 para zona 9,5/25.



Fonte: ABNT NBR 7211/2009.

De acordo com Moraes et al (2016), uma das justificativas do não uso deste material como agregado graúdo está relacionada a alta absorção de água por parte da brita calcária e o teor de finos, o que acarreta o aumento da relação água/cimento na dosagem do concreto, provocando queda da resistência e excessiva fluidez. Com o intuito de melhorar as propriedades deste agregado graúdo na mistura de concreto, além do uso de aditivos plastificantes, outra solução pertinente seria beneficiar a brita calcária de modo a reduzir o teor de finos da sua composição.

2.1.2.2 AGREGADO MIÚDO

Segundo Valverde in Balanço Mineral Brasileiro (2001), A ABNT NBR 7211 fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultante da britagem de rochas. Dessa forma, define areia ou agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos

passam pela peneira ABNT de 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 0,075 mm. Define ainda agregado graúdo como pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 4,8 mm. Minerações típicas de agregados para a construção civil são os portos-de-areia e as pedreiras, como são popularmente conhecidas. Entretanto, o mercado de agregados pode absorver produção vinda de outras fontes. No caso da areia, a origem pode ser o produtor de areia industrial ou de quartzito industrial, ambas geralmente destinadas às indústrias vidreira e metalúrgica.

2.1.3 ÁGUA E RELAÇÃO ÁGUA / CIMENTO

Conforme Helene (1992), a relação água/cimento dentro de uma mistura recebeu também o nome de fator água/cimento (a/c). Este fator é a base para a definição de todas as misturas compostas por cimento(s) e água (concreto, argamassa), devendo ser muito bem compreendido por quem trabalha com o concreto. A água deve ser empregada na quantidade necessária para envolver os grãos, permitindo a hidratação e posterior cristalização do cimento e trabalhabilidade desejada. Quando existe excesso de água forma-se o processo de exsudação, promovendo vazios chamados de “porosidade capilar”. A porosidade reduz a resistência do concreto e aumentando a permeabilidade e diminuindo a vida útil da peça de concreto.

O teor de água no concreto é medido pelo fator água-cimento, que nada mais é que a relação entre a massa de água e a massa de cimento utilizado na mistura. Esta relação varia de 0,15 a 1,5 de acordo com o método IBRACON (HELENE e TUTIKIAN, 2011).

A relação água/cimento é responsável pela:

- Trabalhabilidade
- Porosidade
- Permeabilidade
- Durabilidade
- Resistência à compressão

2.2 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO

Segundo Carvalho (2014), o concreto é obtido por intermédio da mistura adequada de cimento, agregado fino, agregado graúdo e água. Em algumas situações são incorporados produtos químicos ou outros componentes, como microssílicas, polímeros, etc. As adições têm a finalidade de melhorar propriedades tais como aumentar a trabalhabilidade e a resistência e retardar ou acelerar a velocidade das reações químicas que ocorrem no concreto.

As diversas características que o concreto endurecido deve apresentar para que possa ser utilizado dependem fundamentalmente do planejamento e de cuidados em sua execução.

As principais propriedades do concreto fresco são a consistência, a trabalhabilidade e a homogeneidade. São etapas importantes do processo de fabricação do concreto: o adensamento, o início do endurecimento (pega) do concreto e a cura.

As principais características do concreto são:

- A Resistência à Compressão;
- A Resistência à Tração;
- Diagrama Tensão-Deformação;
- Módulo de Elasticidade Transversal e Coeficiente de Poisson;
- Diagrama Tensão-Deformação com Carga e Descarga.

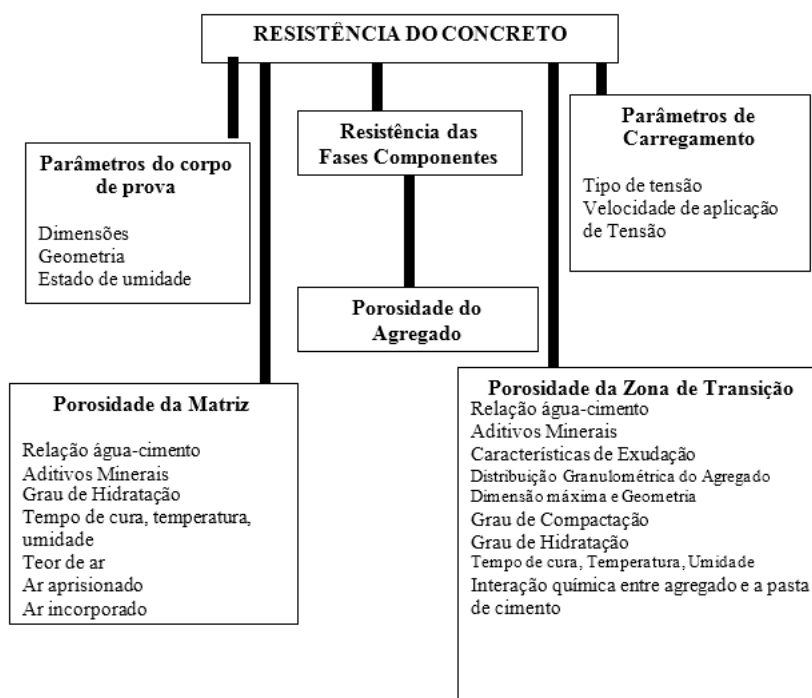
2.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

Segundo Alhadas (2008), as características físicas como, tamanho, forma, textura e granulometria, que também estão associados à modificação do valor da relação água/cimento (a/c) afetam o comportamento elástico e o mecanismo do concreto.

Segundo Nunes (2005), a resistência do agregado normalmente não é um fator determinante da resistência do concreto convencional, porque, à exceção dos concretos leves e de alta resistência, os agregados são bem mais resistentes que a matriz e a zona de transição do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a Figura 07 apresenta um quadro esquemático exemplar dos fatores mais influentes na resistência à compressão do concreto.

Figura 07 – Fatores que afetam a resistência à compressão - Quadro Esquemático



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2008)

Ponto importante a ser considerado nesse estudo são os custos e demandas dos materiais componentes do concreto, levando em consideração o consumo de energia para a sua produção. O método de Dosagem da ABCP foi adotado para a realização desta pesquisa em função da simplicidade de execução e seus resultados técnicos comprovados. Foram adotadas as nomenclaturas de resistências baixa e alta para a resistência característica do concreto à compressão com idade de 28 dias, de acordo com a norma NBR 12655 (ABNT, 2015), sendo a resistência média do concreto à compressão obtida através da equação a seguir:

$$F_{cj} = F_{ck} + 1,65 S_d$$

Onde:

F_{cj} - Resistência à compressão do concreto prevista para a idade de “j” dias, em MPa.

F_{ck} - Resistência à compressão do concreto característica, em MPa.

As tabelas abaixo, idealizadas por Tutikian (2004), também foram utilizadas para corroborar os estudos do qual este trabalho se refere, adotando-se um modelo reduzido apenas para dois traços de concreto, granulometria válida para todos os agregados e tempo equivalente para resistência à compressão. A Tabela 02 apresenta a base comparativa para estudo e avaliação dos resultados de ruptura dos CPs, propriedades do cimento CPI S.

Tabela 02 – Base comparativa para estudo e avaliação dos resultados de ruptura dos corpos-de-prova. Propriedades do cimento CPI S

Ensaio físico	Unidade	Média	Máximo	Mínimo	Desvio
Peneira 200	%	2,26	3,00	1,30	0,42
Peneira 325	%	14025	16,50	9,50	2,41
Blaine	$\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$	3685	3980	3370	181
Água de consistência normal	%	25,36	25,80	24,80	0,35
Início de pega	Horas	2,56	3,10	2,40	0,09
Fim de pega	Horas	3,56	4,10	3,40	0,10
Expansão a quente	mm	1,39	2,00	1,00	0,33
Resistência 1 dia	MPa	19,45	20,20	18,50	1010
Resistência 3 dias	MPa	28,27	30,90	25,90	1,46
Resistência 7 dias	MPa	32,21	34,40	29,10	1,64
Resistência 28 dias	MPa	x	x	x	x

Fonte: TUTIKIAN 2004, Laudo Técnico Votoran.

A Tabela 03 a seguir apresenta a composição dos cimentos tipo comum e composto.

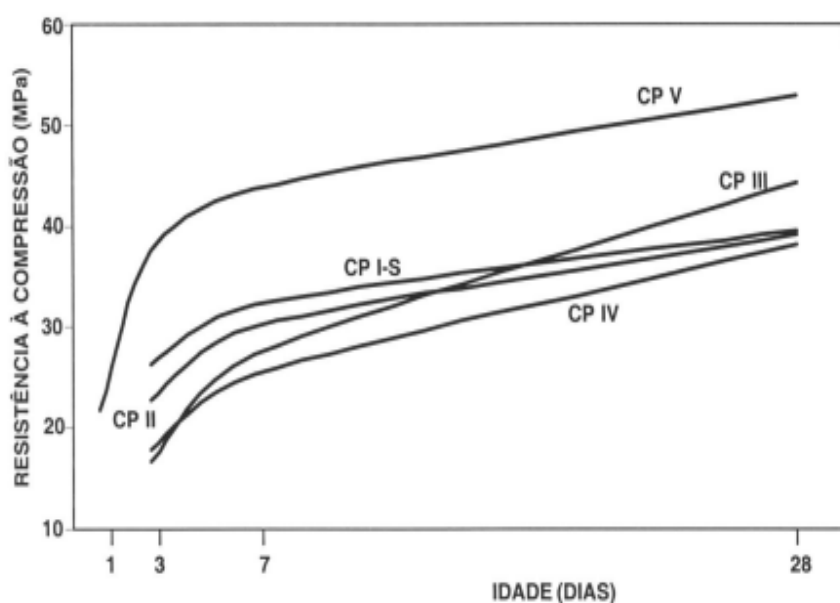
Tabela 03 – Composição dos cimentos comum e composto

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozzolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100	-	-	-	NBR 5732
	CP I-S	99-95	-	1-5	-	
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

Fonte: TUTIKIAN 2004, Laudo Técnico Votoran.

A Figura 08 apresenta o gráfico que mostra a evolução média da resistência à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland.

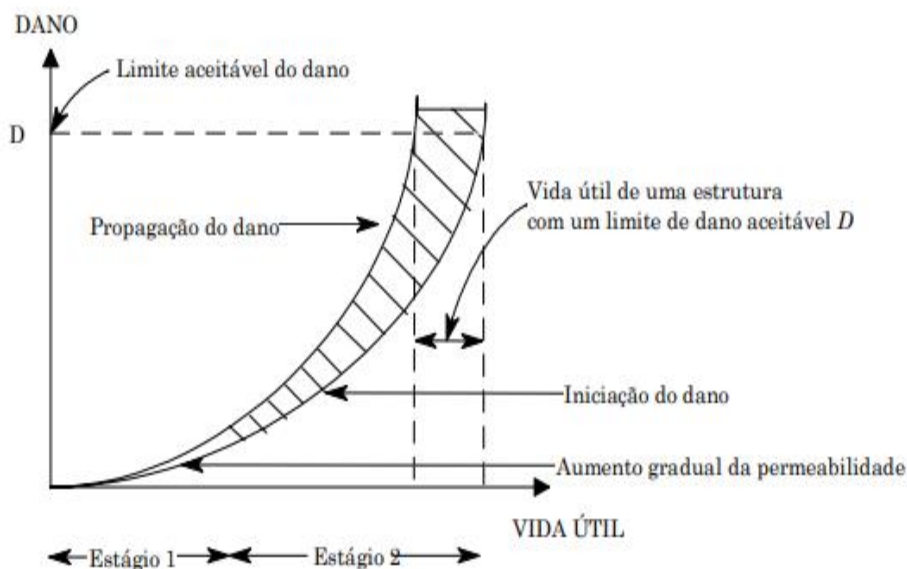
Figura 08 - gráfico da evolução média da resistência à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland.



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland sete. Ed. São Paulo, 2002.

A Figura 09 a seguir apresenta o gráfico que mostra a vida útil do concreto, segundo Mehta (2008).

Figura 09 - gráfico que apresenta a vida útil do concreto (MEHTA, 2008)



Fonte: CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland sete. Ed. São Paulo, 2002.

2.2.2 TRABALHABILIDADE

Rigorosamente falando, a trabalhabilidade pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil necessário à obtenção do adensamento total. O trabalho interno útil é uma propriedade física inerente do concreto e é o trabalho ou energia exigido para vencer o atrito interno entre as partículas individuais do concreto. Entretanto, na prática é necessária energia adicional para vencer o atrito superficial entre o concreto e as formas ou armaduras. Também é desperdiçada energia pela vibração das formas e pela vibração do concreto já adensado. Portanto, na prática é difícil medir a trabalhabilidade conforme a definição e o que se avalia é a trabalhabilidade resultante do método específico adotado.

Outro termo utilizado para descrever o estado do concreto fresco é a consistência, que é a resistência da forma de uma substância ou a facilidade com que ela flui. No caso do concreto, a consistência é algumas vezes tomada como uma medida do grau de umidade, pois, dentro de certos limites, concretos com maior quantidade de água são mais trabalháveis que concretos secos. Entretanto, concretos com a mesma consistência podem apresentar trabalhabilidades variáveis.

Devido à resistência do concreto ser afetada significativa e negativamente pela presença de vazios na massa compactada, é fundamental alcançar a maior massa específica possível. Isso requer uma trabalhabilidade suficiente para se obter um adensamento “teoricamente” total, utilizando uma quantidade de energia razoável sob determinadas condições. (NEVILLE, BROOKS, 2013).

Segundo Amorim (2010), a trabalhabilidade do concreto está diretamente ligada ao consumo de água; quanto maior o consumo de água, mais fluido é o concreto e torna mais fácil o seu manuseio. Porém, o aumento do volume de água na mistura ocasiona o aumento na relação água/cimento e perde-se em resistência e vida útil da estrutura, além de aumentar a porosidade do concreto. E, sabe-se que a porosidade do concreto está diretamente ligada à facilidade de penetração do CO_2 no concreto, facilitando o avanço da frente de carbonatação.

De acordo com Helene (2010), a trabalhabilidade do concreto é influenciada por fatores intrínsecos ao concreto, como a sua relação água/materiais secos, tipo e consumo de cimento; traço (1: m); teor de argamassa, tamanho, textura e forma dos agregados. Além dos fatores intrínsecos, existem os fatores externos de influência, como as condições de transporte, lançamento, características da fôrma, esbelteza dos elementos estruturais, densidade e distribuição das armaduras, dentre outros fatores.

De acordo com IBRACON (2010), Uma das principais características do concreto que determina a sua aptidão para ser manuseado é a sua consistência, que, na tecnologia do concreto, pode ser definida como a maior ou menor capacidade do concreto de se deformar sob a ação do sua própria massa.

A NBR NM 67 (ABNT, 1996) é o método de ensaio definido pela normalização brasileira para determinação da consistência do concreto fresco através do abatimento do tronco de cone (slump test).

2.3 FENÔMENOS E ATAQUES SOFRIDOS PELO CONCRETO

Como o objetivo deste trabalho é dar ênfase à carbonatação, os demais fenômenos e ataques sofridos pelo concreto serão mencionados, porém não terão seus conteúdos aprofundados. Quanto à carbonatação, merecerá um capítulo especial para o tema.

Segundo Helene (2003), as ações atuando sobre uma estrutura podem ser de origem Externa ou Interna a ela: algumas dão origem a fenômenos ou processos do tipo Físico, Químico, Mecânico ou Biológico, e outras podem afetar ou limitar o comportamento estrutural estabelecido no projeto.

Ações externas dividem-se em:

- Funcionais;
- Ambientais.

Ações internas dividem-se em:

- Intrínsecas;
- Induzidas ou Impostas.

As ações externas funcionais são consequência da existência ou do uso da construção e sua manifestação genérica são as cargas equivalentes que consideramos atuando sobre a estrutura. De acordo com a variação no tempo, são divididas em estáticas ou dinâmicas. As cargas estáticas podem ser: estáticas ou variáveis (estas ainda podem ser constantes ou móveis). As cargas dinâmicas podem ser: dinâmicas (subdividem-se em periódicas e não periódicas) e, Instantâneas.

As ações externas ambientais sobre as estruturas de concreto estão basicamente relacionadas com o entorno onde se encontra implantada a construção, sólido, líquido ou gasoso, e de sua interação com o meio circundante. Quando interpretadas do ponto de vista das cargas, as ações ambientais produzem fenômenos do tipo mecânico, porém tais ações têm também importância singular porque dão origem a outros fenômenos que afetam o comportamento, a aparência, a durabilidade e a capacidade portante das estruturas. Vejamos os seguintes exemplos:

- Físicos: variação de temperatura, umidade, ciclos de congelamento e degelo, etc.
- Químicos: Carbonatação (grifo nosso), chuva ácida, ciclos de umedecimento e secagem, corrosão, ataque de ácidos, águas brandas, resíduos industriais, fogo, etc.
- Biológicos: micro-organismos, algas, solos e/ou águas contaminadas, etc.

Em ambos os casos – ações funcionais ou ambientais – podem ocorrer fatos não previstos ou contemplados (excepcionais ou acidentais), que alteram bruscamente o comportamento da estrutura, como no caso de explosões, impactos, fenômenos ambientais, etc.

As ações internas intrínsecas são mudanças de volume que se manifestam e que têm características próprias de acordo com o tipo de concreto utilizado, teor e tipo de cimento, teor de ar incorporado, taxa e tipo de armaduras. E, ou com o processo de produção, cura, proteção contra o vento, de modo que, as restrições internas ou externas, traduzem-se em esforços ou tensões que podem afetar a durabilidade e até modificar o comportamento da estrutura. As manifestações típicas são: assentamento plástico, retração plástica, retração térmica inicial, retração de secagem, reação álcali-sílica.

As ações internas induzidas são deformações impostas, com o objetivo de melhorar o comportamento estrutural quanto à capacidade portante, durabilidade ou condição de serviço, como por exemplo, quando se empregam a técnica de protensão em todas as suas variantes.

Ainda de acordo com Helene (2003), com o objetivo de facilitar a compreensão das manifestações patológicas e conseqüentemente adotar a solução apropriada, foram agrupados os fenômenos típicos de acordo com a origem da ação ou segundo a similaridade da resposta da estrutura.

Fenômenos ou problemas típicos:

- Corrosão de armaduras, o ataque de cloretos e a perda da alcalinidade no concreto;
- Ação das cargas externas, processos mecânicos:
 - Tração axial;
 - Compressão axial;
 - Flexão e cisalhamento;
 - Flexão composta;
 - Torção;
 - Impacto.
- Ação das variações de umidade e temperatura, além do efeito da repetição de ciclos térmicos ou ciclos de molhagem-secagem;
- Ações que geram desintegração do concreto:

- Ação das baixas temperaturas sobre o concreto – efeito de ciclos de congelamento e degelo;
- Ação do fogo sobre as estruturas de concreto armado;
- Ataque por ácidos;
- Ação dos sulfatos;
- Reações deletérias dos agregados;
- Abrasão e desgaste;
- Lixiviação e eflorescência.
- Ações induzidas:
 - Fluência;
 - Recalque;
 - Protensão.
- Falhas típicas do processo construtivo:
 - Deficiências no detalhamento e/ou posicionamento da armadura;
 - Deficiências na construção ou remoção do sistema de formas.
- Ação sísmica.
 - Movimentação da estrutura devido a fenômenos naturais;

2.4 CARBONATAÇÃO

Como anteriormente mencionado o fenômeno da Carbonatação – objetivo geral e principal deste trabalho – é dado maior ênfase na fundamentação teórica abaixo.

A carbonatação do concreto é um dos principais fenômenos de iniciação da corrosão das armaduras (TUUTTI, 1982), uma das manifestações patológicas que mais afeta a estrutura de concreto armado, além de ser de difícil identificação e grande custo reparatório. (MEHTA, 1991)

Pode-se citar Aranha (1994) sobre os dados de carbonatação, na região amazônica, a corrosão chegou a 42,68% das manifestações patológicas das obras convencionais e 52,63% das obras especiais, no estado do Pernambuco a manifestação corresponde a 63%.

Segundo Richardson (1988) apud Silva (2007), a carbonatação é um fenômeno natural e pode ocorrer em ambientes com elevada e baixa concentrações de CO_2 . O teor de CO_2 em um ambiente rural é cerca de 0,03% em volume, em ambientes marítimos 0,03%, em lugares fechados de 0,05% a 0,1%, em laboratório não ventilado 0,1%, em grandes cidades e regiões industrializadas é esperado de 0,3% a 1,0%, em garagens e viadutos 0,2% e em um silo de grão 1,0%.

Andrade (1997) e Mehta (1993) apresentam dados de pontes e viadutos nos EUA, 253.000 delas apresentam algum foco de corrosão, sendo 35.000 novos casos a cada ano, em ordem de importância, a corrosão aparece como um dos maiores problemas a serem estudados.

Segundo Saetta et al (1993) o processo de carbonatação, além de baixar o pH do concreto pode gerar microfissuras em função das mudanças de volume e que podem modificar as condições de penetração de agentes externos ao material, concluindo que os estudos de carbonatação devem necessariamente associado a estudos de porosidade, uma vez que a penetração de agentes agressivos como o CO_2 , pode ser facilmente controlada pela estrutura de poros do material.

Andrade (1992) classifica a camada de cobrimento da armadura com dupla função de barreira física e química capaz de proteger a mesma de agentes agressivos ataquem o aço.

Para Pulleti (2009), a carbonatação é um fenômeno físico químico que ocorre principalmente entre os hidratos do cimento e o CO_2 da atmosfera, reduzindo a alcalinidade do concreto, fazendo o pH da solução dos poros passar de valor de 14 para valores na faixa de 9, essa diminuição da alcalinidade não é um fator prejudicial para o concreto em si, mas no caso concreto armado pode se tornar crítico.

Já Mehta e Monteiro (2008) em seus estudos classificam de 12,5 para 8,5 a redução significativa do pH do concreto original. Que diante dessa baixa da alcalinidade ocorre a despassivação da armadura.

Perante o processo de degradação das estruturas do concreto armado, certamente a sua vida útil será bastante comprometida (POSSAN, 2010). E por se tratar de um fenômeno que ocorre de forma generalizada, as estruturas sofrem problemas de estabilidade em diferentes pontos. Portanto torna-se extremamente importante o concreto de cobrimento, as dimensões especificadas e principalmente a qualidade desse concreto.

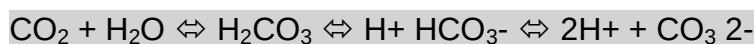
Além da diminuição do pH do concreto, a carbonatação leva também à microfissuração pela reação de novos produtos que se formam no interior deste e que desenvolvem um aumento da massa, levando ao aumento da penetração de CO₂ no interior do concreto, sendo necessário a verificação e associação dos ensaios de porosidade, uma vez que a entrada desses gases são controlados pelos poros do concreto. (SAETTA et al, 1993).

2.4.1 MECANISMO DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

A carbonatação do concreto se dá através dos seguintes processos físico-químicos descritos a seguir.

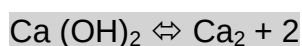
(a) Difusão e dissolução do CO₂ gasoso na solução presente nos poros do concreto, conforme é mostrado na equação. Na primeira etapa da reação há a formação do ácido carbônico que posteriormente se ioniza em bicarbonato e depois em carbonato, considerando que apenas este último participa do processo de carbonatação (PAPADAKIS, 2000).

Equação de difusão e dissolução:



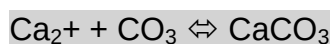
b) Dissolução do Ca(OH)₂ na solução dos poros do concreto. A dissolução do CO₂ provoca a diminuição do pH da solução intersticial dos poros, com isso a dissolução do Ca(OH)₂ ocorre para restabelecer a alcalinidade do meio, seguido de sua difusão das regiões de maior alcalinidade para as de menor alcalinidade (THIÉRY, 2005).

Na equação é mostrada essa dissolução (TAYLOR, 1997).



c) Reação entre os íons CO₃ e Ca²⁺ com a precipitação do composto CaCO₃, como é mostrado na equação (TAYLOR, 1997).

Equação de reação entre íons:



Pode se destacar que reação entre o Ca(OH)_2 e o CO_2 é considerada a principal reação da carbonatação do concreto. Segundo Peter et al (2008), investigou-se a influência dos compostos da pasta de cimento no consumo de CO_2 , no processo de carbonatação do concreto. Em seus estudos foram analisados os compostos CH, C-S-H, C_2S e C_3S , que de acordo com os resultados apresentados a quantidade de CO_2 consumida pelo CH foi cerca de três vezes maior que a consumida pelo C-S-H, vinte vezes maior que a do C_2S e cinquenta vezes maior que a do C_3S .

Em carbonatação acelerada de 5% de CO_2 constata-se que toda a portlandita disponível é consumida e ainda grande parte dos hidratos é degradada para suprir o teor de cálcio necessário para a formação do carbonato de cálcio (HOPE FILHO, 2008).

Na carbonatação natural a 3% DE CO_2 ainda há C-S-H na matriz carbonatada, porém, para percentual de 10% e 100% o C-S-H desaparece totalmente (CASTELLOTE et al, 2009).

O que se tem de dados na literatura mostram que não há um consenso nas informações sobre quais compostos são carbonatos. Preferencialmente, tendendo-se para a carbonatação da portlandita como primeiro elemento a carbonatar, por ser um elemento solúvel. A necessidade de se consumir toda a portlandita antes da carbonatação do C-S-H, é apontada por Chaussadent (1997) e Glausser, Matsche (2007).

2.4.2 CARACTERÍSTICAS DOS CARBONATOS DE CÁLCIO FORMADOS

O CaCO_3 mineralogicamente aparece como calcita, valerita e argonita (SMOLEZYK, 1976). Na forma de calcita é alotrópica e mais estável, em forma de valerita e argonita se transforma em calcita ao longo do tempo. (BAROGHEL e BOUNY, 1994).

A calcita está presente na camada superior do cimento hidratado. O precipitado de CaCO_3 , é inicialmente amorfo. Em baixas temperaturas forma a calcita, a 30° forma a valerita e calcita juntas, e igual ou superior a 40° a valerita e argonita que predomina nessa temperatura (STEPKOWKA et al, 2003).

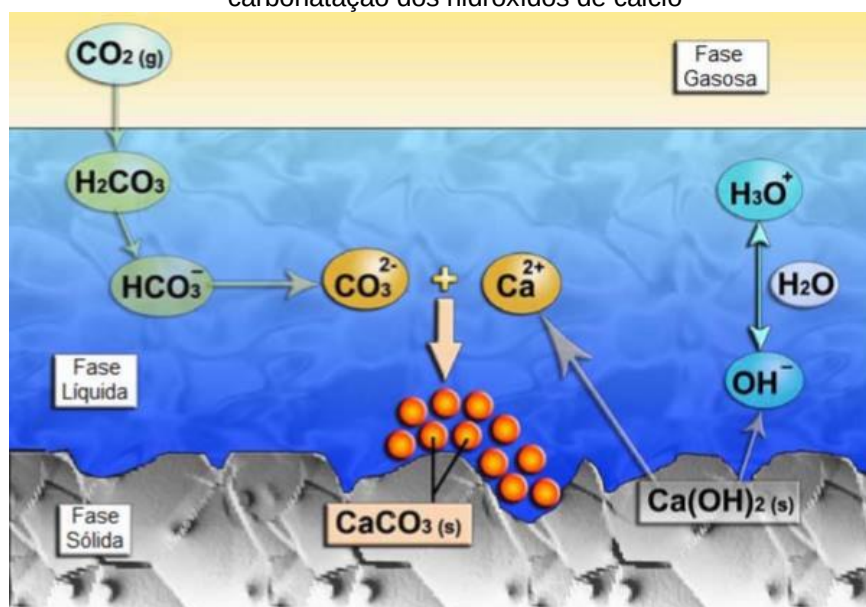
2.4.3 CONSEQUÊNCIAS DA CARBONATAÇÃO

A carbonatação responde por grandes alterações na micro estrutura do concreto e materiais cimentícios, e é responsável pelas duas principais alterações mudanças no concreto; a diminuição do pH, e o aumento da porosidade (JHOHMNEESSON e UTGENANN, 2001)

A carbonatação faz parte do fenômeno da corrosão por diminuir a estabilidade química da camada protetora das armaduras (TUUTTI, 1982). Este é o maior motivo dos estudos da carbonatação, principalmente quando se trata do uso em concreto armado.

Outra consequência da carbonatação é o aumento do volume dos sólidos, sendo que a cristalização dos produtos carbonatados pode ou não gerar uma expansão. O aumento do volume dos sólidos provoca redução do tamanho dos poros em relação à massa sólida em até 18% (GLASSER e MATSCHE, 2007).

Figura 10 – Intervenção combinada de três fases: gasosa, aquosa e sólida durante o processo de carbonatação dos hidróxidos de cálcio



Fonte: <http://www.ceramicafelisbino.com.br/index.php?id=produtoDetalhe&cod=40>

2.4.4 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Em síntese, a carbonatação nada mais é do que uma reação química entre hidróxidos presentes no cimento com gás carbônico; o produto final desta reação será um carbonato de cálcio e a consequente redução do pH da solução dos poros do concreto. O dióxido de carbono penetra pelos poros do concreto, dilui-se na umidade presente na estrutura e forma o composto chamado carbonato de cálcio (H_2CO_3); enquanto o concreto apresentar um pH superior a 12, dificilmente a armadura correrá algum risco de iniciar o processo de corrosão. (Fonte: <https://www.cimentoitambe.com.br>)

Embora a carbonatação por si só não constitua uma forma de degradação do concreto, esta tem a capacidade de permitir a despassivação da armadura, uma vez que o pH reduzido favorece a fissuração. A penetração do CO_2 pelos poros do concreto promove a reação química dando início ao processo de corrosão que termina por reduzir a vida útil da estrutura (CUNHA, 2001)

Segundo Castro (2000), a penetração do CO_2 no concreto conduz à despassivação da armadura, permitindo que tenha início o processo de corrosão da mesma. O conhecimento dos processos de transformação do pH do concreto e do avanço da frente de carbonatação permite a elaboração de traços com melhor capacidade de promover ao concreto maiores resistências à frente de carbonatação.

John (1987) em seu estudo sobre o processo de degradação, afirma que este ocorre quando existe transformação dos materiais ao interagirem com o meio ambiente. Afirmção semelhante pelo CEB (1992) mostra como há dependência entre a estrutura e o meio onde ela está inserida. Destaca-se também o texto da RILEM CPC-18 (1988), que descreve parâmetros para a profundidade de carbonatação, e, a proposta da RILEM TC 116-PCD (1999) que especifica o pré-condicionamento de corpos-de-prova para a medição de permeabilidade a gases e absorção de água.

Os fatores ambientais estão sempre relacionados à umidade, temperatura e concentração de dióxido de carbono CO_2 . Tais procedimentos referem-se apenas à cura, tempo e tamanho das amostras. Já sobre os constituintes relaciona-se o tipo do cimento, tipo e teor dos agregados. A falta de padronização principalmente dos

fatores ambientais e dos procedimentos de ensaios, dificultam a repetição fidedigna dos estudos e a preconização dos resultados. (NEPONUCENO, 2005).

De maneira geral, a durabilidade do concreto depende diretamente da facilidade com que os fluidos e os íons penetram no interior do concreto, e se deslocam no seu interior através da rede de poros da sua micro estrutura. As forças que impulsionam esse transporte podem ser a diferença de concentração, de pressão, de temperatura, de potencial de elétrico, e a absorção capilar. (NEPONUCENO, 2005).

2.4.5 MECANISMOS DE TRANSPORTE DOS AGENTES AGRESSIVOS

Difusão, permeação, absorção, e migração são os quatro meios de transporte dos íons agressivos e fluidos para o interior do concreto, podem atuar simultânea ou sucessivamente ao longo do tempo, dependendo das condições de exposição do concreto ao agente agressivo (CALÇADA, 2004).

Difusão é o transporte dos íons, causado pela diferença de concentração, esse transporte de massa ocorre de uma região de alta concentração para uma região de baixa concentração. Em condições de saturação os íons se difundem através dos poros cheios de água, se os poros estiverem com quantidade de água reduzida, a difusão é dificultada (SAETTA et al, 1993).

2.5 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

Grande parte dos ensaios de carbonatação são baseados no modelo do CEB (1997), Comité Euro - International du Béton.

A estimativa da profundidade de carbonatação do concreto neste modelo do CEB é feita pela equação a seguir, sendo considerados diversos fatores que influenciam o processo.

Esse modelo permite prever a profundidade carbonatada em função das condições do ambiente em que o material está exposto.

$$x_c = \sqrt{(2\Psi_1\Psi_2\Psi_3\Delta C)} \frac{\sqrt{D} \, d \, o \, n}{a} t \left(\frac{t_o}{t}\right)^n$$

Em que,

e_c - profundidade de carbonatação (m);

D_{don} - difusão do CO_2 para completa carbonatação;

ΔC - diferença de concentração de CO_2 entre o ambiente e a frente de carbonatação; parâmetros referentes às condições de microclima, de cura e referente à relação água/cimento (tabelados);

n - parâmetro que reflete as condições microclimáticas (ciclos de molhagem e secagem - tabelados);

t_0 - período de referência (1 ano);

t - tempo;

O termo “a” corresponde à quantidade de CO_2 necessária para que todo material seja completamente carbonatado e é dada pela equação:

$$a = 0,75C \text{ CaO } \alpha H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}}$$

Em que,

C - quantidade de cimento no material (kg/m^3);

CaO - quantidade de CaO no cimento (%);

αH - grau de hidratação (%);

M - massas molares (mol/m^3).

Os coeficientes a e n são determinados de acordo com o ambiente de exposição, condições de cura, orientação solar de exposição das superfícies, meio de exposição às intempéries e se está protegido ou não.

Segundo Tuutti (1982), a estimativa da profundidade de carbonatação dos concretos pode ser efetuada pela equação convencional da raiz quadrada do tempo, que é baseada na primeira lei de Fick, conforme mostrada na equação abaixo:

$$e = k \sqrt{t}$$

Em que:

e - Profundidade de carbonatação;

k - Coeficiente de carbonatação;

t - Tempo de exposição.

O autor considera que o coeficiente de carbonatação depende do coeficiente de difusão do CO_2 e que este pode ser representado pelo coeficiente de difusão

efetivo do O_2 , o qual se considera mais fácil sua determinação em laboratório, embora deixe claro que não existam meios para equivalência entre os dois gases, mesmo considerando que a difusão ocorra através da camada já carbonatada.

Modelo de Papadakis, Vayenas e Fardis (1989, 1991)

Este modelo considera a química do processo de carbonatação e é baseado nas equações de equilíbrio de massa do CO_2 , $Ca(OH)_2$, C-S-H e dos silicatos de cálcio anidros, C_3S e C_2S . O modelo considera a seguinte equação para estimar a profundidade carbonatada.

$$e_c = \sqrt{\frac{2 D CO_2 [CO_2]^0}{[Ca(OH)]^0 + 3 [CSH]^0 + 3 [C_3S]^0 + 2 [C_2S]^0} t}$$

Em que,

e_c - Profundidade de carbonatação (m);

DCO_2 - Coeficiente de difusão efetivo do CO_2 no material carbonatado (m^2/s);

t - Tempo (s);

$[CO_2]$ - Concentração molar do CO_2 (mol/m^3);

$[Ca(OH)_2]$ e $[CSH]$ - Concentração molar dos hidratos (mol/m^3);

$[C_3S]$ e $[C_2S]$ - Concentração molar dos anidros (mol/m^3);

O índice 0 é relativo às concentrações iniciais ($t = 0$).

Os autores consideram este modelo para ensaios acelerados e destacam sua facilidade de aplicação, desconsiderando as condições de umidade relativa e as mudanças na porosidade causadas pelo processo de carbonatação. Consideram também uma modelagem para as reações pozolânicas, baseando-se na observação de que os óxidos das pozolanas e do clínquer são os mesmos, porém com mineralogia e proporções diferentes. Eles estimam que a hidratação do cimento Portland comum e as reações pozolânicas geram os mesmos produtos com a diferença que a porção vítrea da pozolana reage com a portlandita formada na hidratação do cimento. Assim, no modelo proposto os produtos das reações pozolânicas são somados aos produtos da hidratação do cimento para serem considerados.

Em seus estudos, com o objetivo de propor um modelo matemático para previsão da vida útil de projeto de estruturas de concreto frente à ação da carbonatação, Possan (2010) elaborou um modelo de predição da profundidade de carbonatação do concreto empregando dados de entrada de fácil obtenção. Sua aplicabilidade depende de diversos fatores envolvidos no processo de degradação, de modo que, para que sejam estabelecidos os limites adequados - bem como o universo de sua aplicação - admitem-se as seguintes condições de contorno:

- A profundidade de carbonatação é bem definida, ou seja, uniforme;
- concreto é homogêneo e isotrópico;
- concreto não apresenta fissuração;
- A estrutura de concreto foi executada com boas práticas construtivas.

O modelo que descreve a ação do CO_2 através do concreto é representado na equação:

$$e_c = k_c \left(\frac{20}{f_c} \right)^{k_{fc}} \left(\frac{t}{20} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[\left(\frac{k_{ad} ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{k_{CO_2} CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left(\frac{k_{UR} (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] k_{ce}$$

Em que,

e_c - Profundidade de carbonatação média do concreto (mm);

k_c - Fator variável referente ao tipo de cimento empregado;

f_c - Resistência característica à compressão axial do concreto (MPa);

k_{fc} - Fator variável referente à resistência à compressão axial do concreto

em função do tipo de cimento utilizado;

t - Idade do concreto (anos);

k_{ad} - Fator variável referente às adições pozolânicas do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz em função do tipo de cimento utilizado;

ad - Teor de adição pozolânica no concreto em % em relação à massa de cimento;

k_{CO_2} - Fator variável referente ao teor de CO_2 do ambiente em função do tipo de cimento utilizado;

CO_2 - Teor de CO_2 da atmosfera (%);

k_{UR} - Fator variável referente à umidade relativa em função do tipo de cimento utilizado;

UR - Umidade relativa média (10 -2 %);

k_{ce} - Fator variável referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura

Dessa forma, observa-se que o modelo considera algumas variáveis que influenciam no processo, tais como resistência à compressão axial do concreto, tipo de cimento, presença de adições, umidade relativa, quantidade de CO_2 , processo de molhagem e secagem, de umidade e tempo.

A partir da literatura admite-se que o processo de carbonatação é influenciado por diversos fatores, podendo ser eles: internos, ligados às propriedades e características do concreto, ou externos, como por exemplo: a umidade, temperatura e concentração de CO_2 do ambiente de exposição. Como o processo natural ocorre de forma muito lenta, grande parte das pesquisas de carbonatação são realizadas utilizando-se do processo de aceleração, por meio de aplicação de elevadas concentrações de CO_2 , em câmaras apropriadas. Dessa forma, por se tratar de uma situação alterada em relação ao processo ocorrido de forma natural, torna-se necessária a utilização de modelos matemáticos que auxiliem na previsão da profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição no ambiente de utilização dos concretos armados, de forma a tentar prever a vida útil destas estruturas em relação ao fenômeno de carbonatação. (TUUTTI, 1982)

O modelo mais utilizado na grande maioria dos trabalhos na área de evolução da carbonatação com o tempo é o derivado da primeira lei de Fick (TUUTTI, 1982) por ser o mais simples e rápido de ser aplicado, além de fornecer boa aderência com os resultados reais, desde que aplicado devidamente, a partir de dados tratados estatisticamente.

As pesquisas envolvendo o processo natural, como é o caso desta, se mostram bastante importantes, pois permitem avaliar o comportamento dos concretos que sofreram ataque do CO_2 em concentrações ambientes e por períodos prolongados de tempo, verificando a influência das variáveis nos resultados das profundidades apresentadas.

No capítulo 3 serão apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho experimental com o detalhamento das variáveis contempladas no programa experimental; dos materiais utilizados para a produção dos corpos de prova; dos concretos estudados com sua caracterização no estado endurecido; dos corpos de prova utilizados para a carbonatação natural; da avaliação da frente de carbonatação; e da análise estatística utilizada.

Segundo Parrot (1990), a taxa de penetração da frente de carbonatação do concreto pode ser controlada ao se utilizar concreto de baixa porosidade.

Smolczyk (1990), ao analisar o trabalho de Hamada, coloca como avaliação comprovada que a carbonatação não depende da quantidade de $\text{Ca(OH}_2\text{)}$ livre na pasta; isso diz que o $\text{Ca(OH}_2\text{)}$ não protege o concreto da frente de carbonatação, nesse caso a propagação da frente de carbonatação é determinada pela permeabilidade do concreto.

2.5.1 CÂMARA DE CARBONATAÇÃO

A concentração de CO_2 é um fator que merece maior investigação. Pesquisas analisaram diferentes percentuais em diferentes temperaturas e umidade relativa com índices maiores que 5%. (ABREU, 2004)

É importante correlacionar estudo da carbonatação acelerada com a carbonatação natural para verificar a diferença no comportamento das tendências do fenômeno nas duas condições (PAULETTI, 2004). Isso contribui na diferença do percentual de CO_2 mais adequado para cada realização do ensaio acelerado. Por outro lado, a influencia da temperatura e da umidade relativa do ar na carbonatação do concreto seria melhor compreendida e poderia ser fixada para a realização de futuros ensaios (DAL MOLIM, POSSAN, PAULETTI, 2006).

Segundo Guimarães et al (2010), a carbonatação é um fenômeno natural, onde o concreto sofre agressão do dióxido de carbono presente no meio. Esta agressão ocorre continuamente e a degradação sob condições naturais é lenta. Por tratar-se de fenômeno importante quanto à avaliação da vida útil de um dos materiais mais empregados na construção civil, desenvolveu-se técnica de acelerar o ataque por dióxido de carbono para medir seu impacto no meio. Ainda pouco estudado e não normatizado, o ensaio acelerado de carbonatação está sendo aperfeiçoado em cada programa experimental onde é empregado, porém, consiste basicamente da construção de uma câmara de carbonatação, onde é introduzido dióxido de carbono sob pressão e os corpos de prova a serem ensaiados são submetidos a esse meio por tempo controlado.

Segundo Pauletti (2004), ensaios acelerados de carbonatação não são normatizados, são de difícil comparação e os fatores mais significativos são a

relação A/C e, principalmente, o percentual de CO₂. As amostras carbonatadas em câmara saturada de CO₂ apresentaram um comportamento distinto daquelas carbonatadas a 6%, atingindo profundidades 116% maiores que em ambientes saturados. O tipo de cimento, tipo de secagem e o tempo não apresentaram grande significância na profundidade de carbonatação, quando comparados aos demais fatores.

Segundo Guimarães et al (2010), o ensaio resume-se em fechar hermeticamente a câmara de carbonatação, onde são introduzidos teores de CO₂ superiores ao encontrado na atmosfera, na concentração aproximada de 100%. A umidade interna da câmara é de aproximadamente 60% e a temperatura de aproximadamente 25°C.

Para o ensaio da carbonatação, o tempo e o tipo de cura dos CPs precisam ser fixados. Depois de curados e antes da entrada na câmara de carbonatação, os CPs precisam ser sazoados. O ideal é que esse procedimento garanta o perfeito equilíbrio da umidade interna dos CPs, permitindo que a difusão do CO₂ ocorra de forma uniforme no material. Essas são questões que precisam estar claras para se padronizar o procedimento de sazonamento das amostras que serão carbonatadas (DAL MOLIM, POSSAN, PAULETTI, 2006).

É de suma importância verificar o ambiente em que os CPs são acomodados antes da realização do ensaio. E o tempo que esse procedimento demanda são fundamentais para confiabilidade nos resultados do experimento. Com relação ao tamanho dos CPs, Possan (2004) sugere que a altura seja o dobro da espessura conforme NBR 6118. (DAL MOLIM, POSSAN, PAULETTI, 2006).

Segundo Ferreira (2013) em sua tese de doutorado, na correlação entre os coeficientes de carbonatação acelerado e natural verificou-se uma relação de direta proporcionalidade entre os coeficientes encontrados para os dois procedimentos, com o coeficiente acelerado significando aproximadamente 7,4 vezes o coeficiente natural. Ou seja, ele conclui que o ensaio de carbonatação acelerada representa proporcionalmente a profundidade da frente de carbonatação, validando este ensaio frente a situações reais.

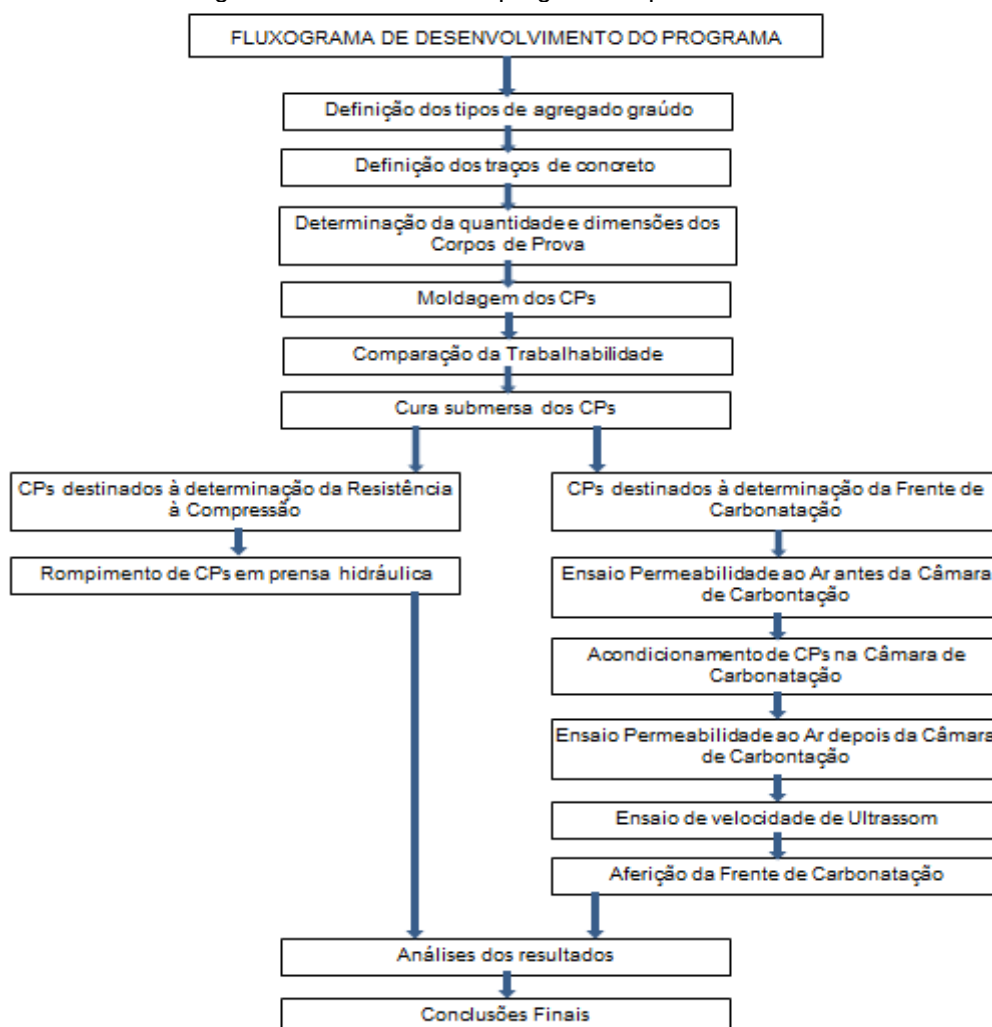
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente capítulo abordará o Programa Experimental com definições dos métodos de ensaio desde a classificação e execução dos CPs de concreto, as medições de Abatimento, os processos de cura úmida e condicionamento, a câmara de carbonatação, as medições de ultrassom, permeabilidade e frente de carbonatação.

3.1 SISTEMATIZAÇÃO

O presente Programa Experimental é composto por 13 fases apresentadas abaixo conforme Gráfico 01, que contém o Fluxograma das atividades.

Gráfico 01 – Fluxograma de atividades do programa experimental



Fonte: Próprio autor, 2019.

Algumas diretrizes e limitações foram adotadas para a realização deste Programa Experimental, a saber:

Para a composição dos CPs foram utilizados agregados graúdos oriundos de rochas da região de Curitiba e adquiridos em lojas comerciais, sem diferenciação dos materiais usualmente comercializados para o uso geral na construção civil. Os materiais foram adquiridos em suas embalagens originais, envasadas pelos próprios fornecedores.

A areia adotada para a moldagem dos CPs também foi oriunda de loja comercial, sem diferenciação do material usualmente adquirido em uso geral da construção civil na região de Curitiba.

Os traços utilizados indicam o uso de areia úmida sem, contudo, especificar o grau de umidade desse material. A fim de padronizar as composições dos traços para execução dos CPs, determinou-se o grau de umidade dessa areia, o qual é válido para os dois traços adotados em todos os CPs executados.

Como os objetivos deste programa experimental são dirigidos à comparação, tanto – e principalmente – da resistência à frente de carbonatação, quanto da interferência das rochas (calcário dolomítico, basalto e diabásio) na resistência à compressão do concreto (além de comparar a influência dos agregados graúdos acima mencionados na trabalhabilidade do concreto em estado fresco), não foi foco deste trabalho a determinação de traços específicos com vistas a alcançarem alguma resistência pretendida. Desta forma, procurou-se na bibliografia corrente uma relação de traços que buscassem facilidade na confecção dos CPs e homogeneidade de resultados, que realçassem apenas as diferenças no uso de britas diferentes.

Não foram utilizados quaisquer aditivos que viessem a alterar o Abatimento, a cura ou até a resistência final dos CPs para rompimento à compressão. No processo de confecção dos CPs foi aplicado um desmoldante adquirido facilmente em lojas comerciais, para a facilidade de desmolde dos CPs.

Os moldes adotados para confecção dos CPs foram os do tipo metálicos cilíndricos, com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm (dimensões internas), em atendimento às prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Para os processos de cura úmida, todos os CPs foram acondicionados no mesmo tanque com a mesma água, sem adição de demais produtos, em média a 28° C e por igual período de tempo para todos.

Os CPs destinados à medição da resistência à compressão foram rompidos no mesmo dia e utilizando-se os mesmos equipamentos de laboratório da Faculdade IDD, devidamente calibrados, seguindo as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018).

Já para os CPs destinados à medição da resistência à frente de carbonatação, todos os procedimentos foram realizados no laboratório de Engenharia Civil da UFPR, desde o condicionamento do CPs até o acondicionamento na câmara de carbonatação acelerada, além da leitura de frente de carbonatação, medição do grau de permeabilidade e velocidade de ultrassom.

Foi delimitado o processo para realização deste ensaio, procurou-se fixar uma série de condições laboratoriais relacionadas como as dimensões do corpo de prova: cubos com 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura, tempo de permanência na câmara de 63 dias, teor de CO₂ a 12%, temperatura da câmara a $26 \pm 5^\circ\text{C}$. Os corpos foram cortados e determinou-se a profundidade de carbonatação com aplicação de uma solução de fenolftaleína. Com base nos valores médios de cada corpo de prova, calculou-se a média das leituras.

3.2 DETERMINAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS

Foram determinados três (03) tipos de agregados graúdo, sendo eles:

- Calcária Dolomítica;
- Basalto;
- Diabásio;

3.3 TRAÇOS DO CONCRETO UTILIZADOS

Foram utilizados dois traços experimentais para dosagem e confecção dos corpos de prova, sendo o primeiro 1:2:4 visando menor resistência e, o segundo 1:1:4 para resistência maior, com os consumos de água conforme a Tabela 04 a seguir.

As quantidades de agregado foram as mesmas para os três tipos de rochas: basalto, diabásio e calcário dolomítico.

Tabela 04 – Traços de concreto utilizados para confecção dos CPs.

Volumes para composição de 0,005 m³ de concreto:

Traços adotados	Traço em volume	Cimento (g)	Areia Úmida (g)	Brita nº 1 (g)	Água (ml)
Traço 01 - Resistência Menor	1 : 2 : 4	1485	7066,6	5670	750
Traço 02 - Resistência Maior	1 : 1 : 4	2570	6107,8	4900,5	1130

As quantidades de brita foram as mesmas para os três tipos de brita: basalto, diabásio e calcário dolomítico.

Fonte: Próprio autor, 2019.

Foi realizada a verificação da umidade da areia e a determinação da sua massa específica, em balança de precisão; de uma amostra de 100 g colocada em forno elétrico, resultou em 88,8 g de superfície seca; verificou-se que a umidade da areia no momento foi de 11,2%

Após, realizou-se a determinação da granulometria das britas usadas. Utilizou-se uma amostra quarteada de 4 kg, com posterior peneiramento.

As verificações resultaram nos seguintes números para a dosagem de materiais na composição dos traços de concreto adotados:

- Massa específica da Areia = 2627 kg/m³
- Teor de umidade da Areia = 11,2 %
- Granulometria da Brita Calcária Dolomítica = 9,5 mm
- Granulometria da Brita Basáltica = 9,5 mm
- Granulometria da Brita Diabásio = 11,5 mm
- Peso da água (para 1000 ml) = 993,9 g
- Cimento adotado = CP II 32 Votoran, conforme NBR 11578.

A seguir a Figura 11 contendo imagem do procedimento de quarteamento do agregado miúdo, em atendimento à norma NBR 5738.

Figura 11 – Agregado miúdo sendo quarteado para a confecção dos CPs, segundo a NBR 5738



Fonte: Próprio autor, 2019.

Segue Figura 12, com o cimento sendo pesado para a confecção dos CPs.

Figura 12 – Cimento sendo pesado para a confecção dos CPs



Fonte: Próprio autor, 2019.

Segue Figura 13, com teste de granulometria do agregado graúdo, executado em peneiras com agitador.

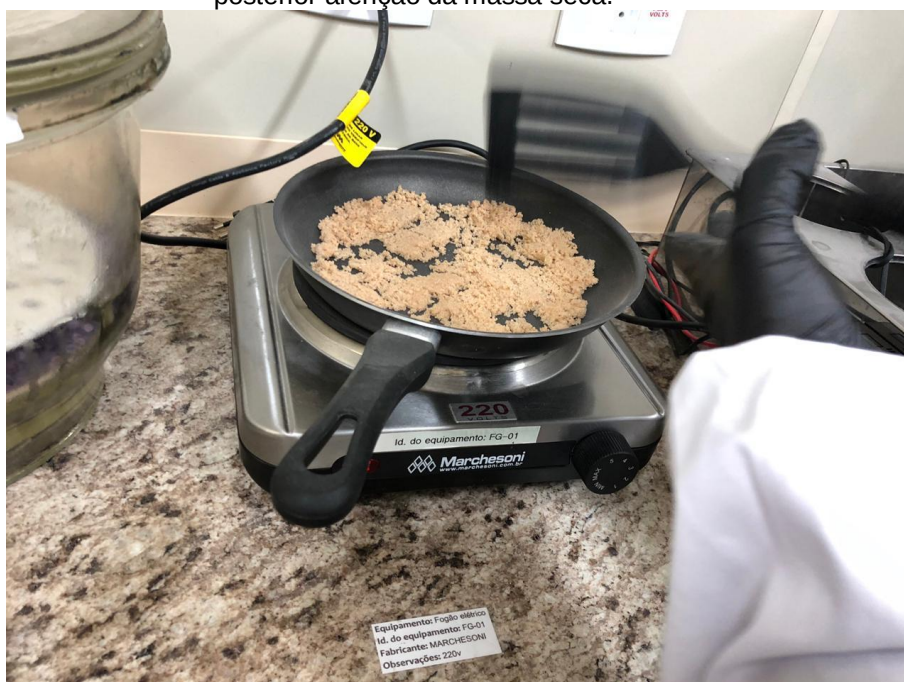
Figura 13 – Teste de granulometria do agregado graúdo, executado em peneiras com agitador



Fonte: Próprio autor, 2019.

Abaixo, Figura 14 – Agregado miúdo sendo aquecido para evaporação da água e posterior aferição da massa seca.

Figura 14 – Agregado miúdo sendo aquecido para evaporação da água e posterior aferição da massa seca.



Fonte: Próprio autor, 2019.

3.4 QUANTIDADE E DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

Determinação da quantidade e dimensões de corpos de prova, com o total de 36 CPs com dimensões 100 mm x 200 mm, sendo 18 CPs para ensaio da Frente de Carbonatação e 18 CPs para ensaios de Resistência à Compressão. É o que apresenta abaixo a Tabela 05.

Tabela 05 – Determinação da quantidade de corpos de prova

AGREGADOS GRAÚDOS						
Traços utilizados	CALCÁRIO DOLOMÍTICO		BASALTO		DIABÁSIO	
	Traço 01	Traço 02	Traço 01	Traço 02	Traço 01	Traço 02
ENSAIOS						
CARBONATAÇÃO	3	3	3	3	3	3
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	3	3	3	3	3	3
	6	6	6	6	6	6

Total: 36 corpos de prova.

Traço 01 - Resistência Menor

Traço 02 - Resistência Maior

Total de Corpos de Prova	
para Câmara de Carbonatação	18
para ensaio de Resistência à Compressão Simples	18
	36

Fonte: Próprio autor, 2019.

3.5 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a moldagem dos CPs foi adotada a Norma NBR 5738/2015 (ABNT, 2015). Os CPs adotados possuem as dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Os materiais foram misturados em betoneira por tempo de 6 minutos. Foram moldados os CPs manualmente em duas camadas com 12 golpes por camada. Nas paredes internas dos CPs foi aplicado desmoldante.

Foram realizados ensaios de Abatimento (Slump test) baseados em método proposto por VARELA (2012).

A seguir, Figura 15 que mostra a execução da moldagem dos CPs de acordo com a norma acima citada.

Figura 15 – Execução da moldagem dos CPs de acordo com a norma acima citada.



Fonte: Próprio autor, 2019.

A tabela 06 apresenta os resultados dos testes de Abatimento realizados.

Tabela 06 – Determinação de resultados dos testes de Abatimento.

Traços adotados	Traço em volume	Tipo de Brita nº 1	Água (ml)	ABATIMENTO (cm)
Traço 01 - Resistência Menor	1 : 2 : 4	BASALTO	750	5,0
	1 : 2 : 4	DIABÁSIO	750	12,0
	1 : 2 : 4	CALCÁRIA	750	2,5
Traço 02 - Resistência Maior	1 : 1 : 4	BASALTO	1130	7,0
	1 : 1 : 4	DIABÁSIO	1130	16,0
	1 : 1 : 4	CALCÁRIA	1130	8,0

Fonte: Próprio autor, 2019.

Após 3 dias da moldagem, foram retirados os moldes dos CPs e identificados. Segue a Figura 16.

Figura 16 – Identificação dos CPs.



Fonte: Próprio autor, 2019.

3.6 CURA SUBMERSA DOS CORPOS DE PROVA

Conforme a Norma NBR 5738/2015 (ABNT, 2015) os CPs foram submetidos à cura submersa por um prazo de 29 dias. É o que mostra a Figura 17.

Figura 17 – Cura submersa dos CPs em temperatura de 22°C.



Fonte: Próprio autor, 2019.

3.7 ACONDICIONAMENTO DOS CPS NA CÂMARA DE CARBONATAÇÃO

Para aqueles CPs destinados ao ensaio da Frente de Carbonatação: determinação dos prazos de permanência dos CPs na Câmara de Carbonatação, em 60 e 90 dias, isso após período de descanso de 51 dias para diminuição da água nos poros do concreto.

Determinação da porcentagem de CO₂ a que os CPs foram submetidos:

- Concentração de CO₂: 5 +/- 0,5%
- Umidade relativa do ar: 65 +/- 1%
- Temperatura: 23 +/- 1%

3.8 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CPS

Apesar de não ser o objetivo principal do trabalho, o ensaio da resistência contribui para afirmar que os concretos com maiores resistência possuem menos velocidade de carbonatação devido à redução dos poros. Para os CPs destinados à verificação das Resistências Mecânicas à Compressão, foi realizado o ensaio em prensa hidráulica com a idade de 90 dias após a concretagem.

A Figura 18 mostra o ensaio de um CP.

Figura 18 – Ensaio dos CPs não carbonatados, com a rocha basáltica.



Fonte: Próprio autor, 2019.

A seguir, Figura 19 com o ensaio dos CPs não carbonatados de rocha diabásio.

Figura 19 – Ensaio dos CPs não carbonatados, diabásio.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Na sequência a Figura 20 – Ensaio dos CPs não carbonatados de rocha calcária dolomítica.

Figura 20 – Ensaio dos CPs não carbonatados de rocha calcária dolomítica



Fonte: Próprio autor, 2019.

3.9 MÉTODOS DE ENSAIO

Para a Câmara de Carbonatação foram destinados 18 CPs, sendo 9 CPs executados com o traço 01 e 9 CPs com o traço 02.

Após os CPs serem submetidos à Câmara de Carbonatação durante 60 dias, realizou-se o corte de 5 cm para leitura com aplicação de Fenolftaleína.

Na aferição foram realizados três ensaios:

- Velocidade de ultrassom para caracterização de homogeneidade dos CPs;
- Permeabilidade ao ar, antes da colocação na câmara de carbonatação e após carbonatado;
- Aferição da frente da carbonatação.

3.9.1 ENSAIO DE VELOCIDADE DE ULTRASSOM – PROCEDIMENTO

As leituras foram realizadas com auxílio do equipamento Ultrasonic Pulse Velocity - Pundit Lab do fabricante Proceq, com os dois transdutores sendo um o emissor e o outro o receptor das ondas. O equipamento foi configurado com frequência de transmissão/recepção de 54 kHz, usando os transdutores de 50 mm de diâmetro.

As leituras foram conduzidas em acordo com a NBR 8802/2013 empregando o método de transmissão direta. Antes de cada leitura, foi efetuada a limpeza da superfície. Em seguida, foi utilizado o gel de acoplamento indicado pelo fabricante para produzir o contato adequado entre os transdutores e as superfícies do concreto. Para centralizar os transdutores foi utilizado o aparato metálico indicado na Figura 21, assim como proposto no trabalho de Godinho et al (2020).

Figura 21 – Esquema do posicionamento dos transdutores para as medidas de velocidade de ultrassom nos corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm



Fonte: GODINHO et al, 2020.

Os dados obtidos foram usados como parâmetros de caracterização dos concretos e interpretados com base na tabela 07, que apresenta faixas de valores e suas respectivas classificações quanto a qualidade do concreto.

Tabela 07 – Classificação relacionando a velocidade de ultrassom à qualidade do concreto.

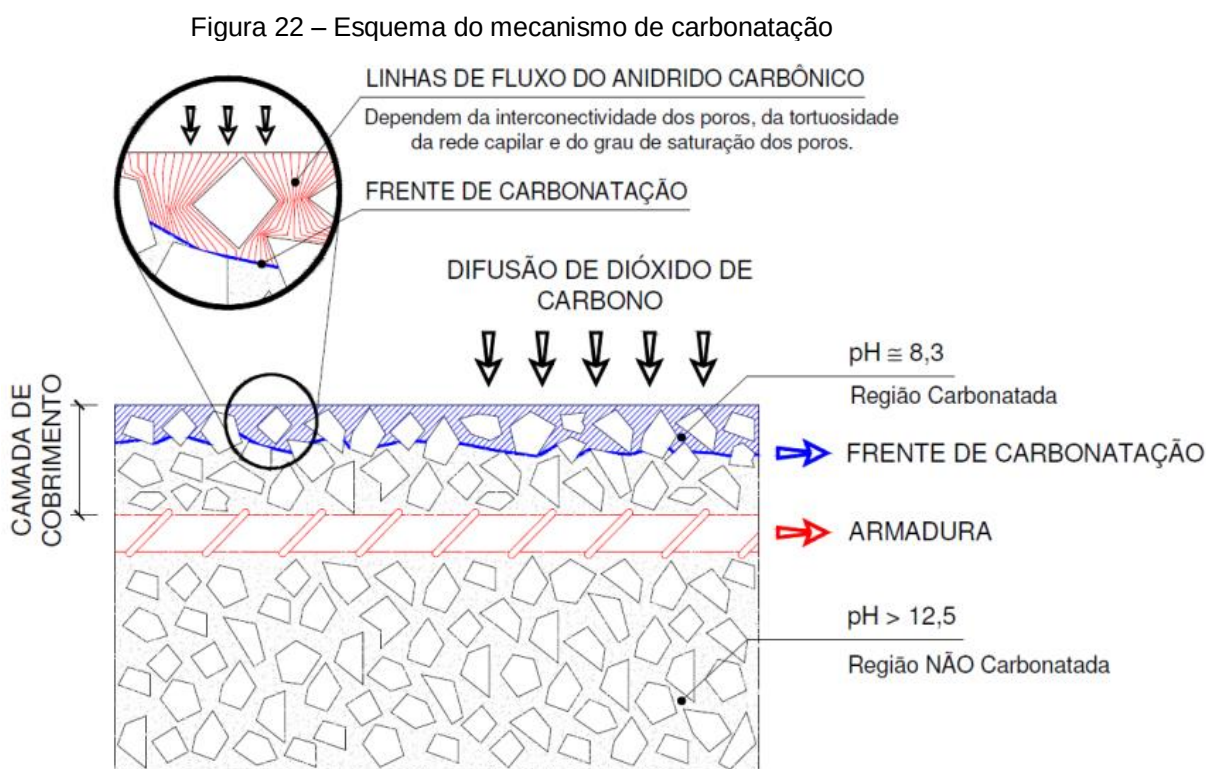
VELOCIDADE DE ONDA ULTRA-SÔNICA (m/s)	QUALIDADE DO CONCRETO
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Ótimo
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V < 2000$	Ruim

Fonte: RINCON et al, 1988

3.9.2 ENSAIO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO – PROCEDIMENTO

De acordo com Raisdorfer (2015), a maioria das estruturas executadas no Brasil é construída com o sistema estrutural em concreto armado, e pode-se dizer que os efeitos da carbonatação tem impacto sobre grande parte das obras da sociedade, sejam pontes, prédios, barragens, entre outras. Desse modo, quantificar os efeitos desse fenômeno de degradação é primordial para entender e estabelecer sua durabilidade.

O processo de carbonatação começa na face externa da peça de concreto e por difusão do CO_2 , avança para o interior do concreto. A interface entre o concreto carbonatado e o não carbonatado é denominada frente de carbonatação assim como pode ser visto na Figura 22 (HELENE, 1993; HOPPE FILHO, 2008).



Fonte: HOPPE FILHO, 2008, (adaptado de MEDEIROS e HELENE 2001.)

A umidade interna do concreto tem grande importância na velocidade de avanço da frente de carbonatação. Assim, um processo de sazonalidade incorreto pode modificar a velocidade de propagação da frente de carbonatação de maneira fora do padrão por haver regiões com umidades diferentes dentro do concreto, ou

fazendo com que o excesso de umidade retarde o processo nas primeiras idades de carbonatação acelerada (RAISDORFER, 2015).

Por este motivo, antes de introduzir os corpos de prova na câmara de carbonatação, foi aplicado um processo de condicionamento em uma sala climatizada, com umidade relativa de $60 \pm 5\%$ e temperatura de $23 \pm 3^\circ\text{C}$. Os corpos de prova ficaram neste ambiente até que sua variação do peso foi menor que 0,10 g em 24 horas.

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado em uma câmara de carbonatação como ilustra a Figura 23, com controle automatizado de teor de dióxido de carbono, umidade relativa e temperatura do ambiente interno. A câmara foi ajustada para ter concentração interna de CO_2 de $5 \pm 0,5\%$, umidade relativa de $65 \pm 1,0\%$, temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$.

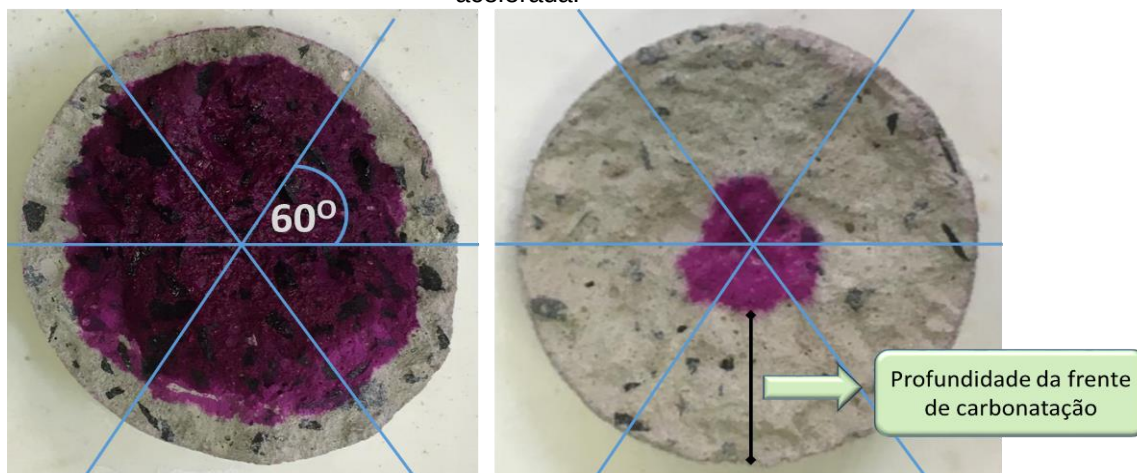
Figura 23 – Câmara de carbonatação do laboratório LAME/DCC/CESEC da UFPR.



Fonte: Próprio autor, 2019.

A frente de carbonatação foi mensurada com aspersão de solução de fenolftaleína sobre as superfícies de concreto recém fraturadas de corpos de prova $\varnothing 10 \times 20$ cm. As leituras foram realizadas a partir da face externa em direção ao centro da circunferência, como ilustra a Figura 24. Para cada secção do corpo de prova recém fraturado foram realizadas seis leituras, uma a cada 60° .

Figura 24 – Esquema das leituras realizadas nos corpos de prova deste estudo de carbonatação acelerada.

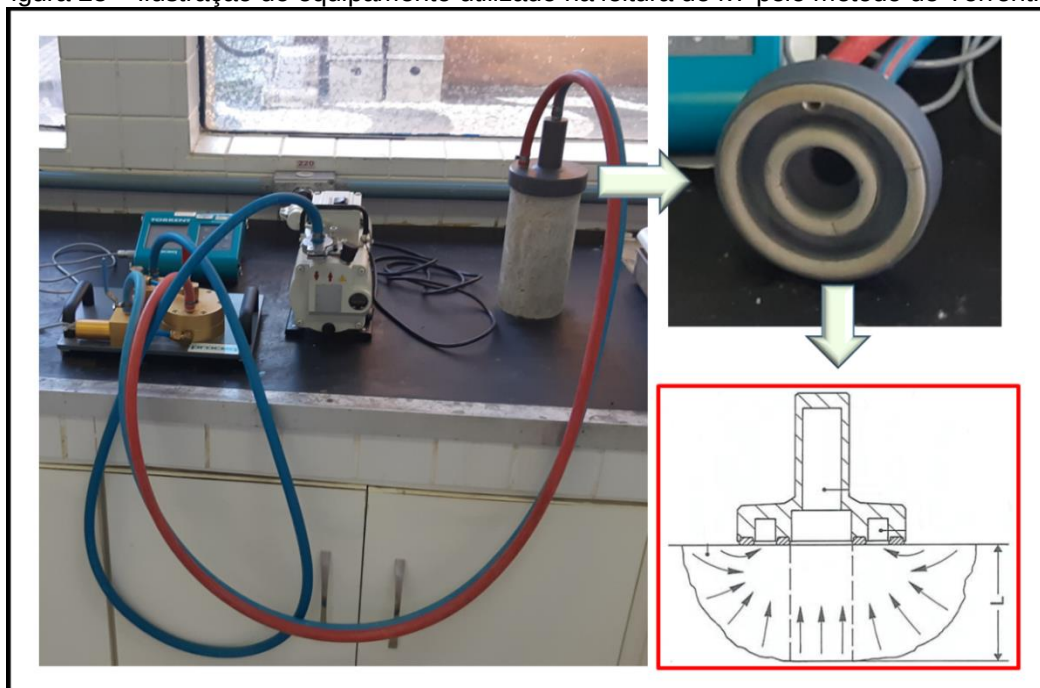


Fonte: Próprio autor, 2019.

3.9.3 ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO AR - PROCEDIMENTO

O método desenvolvido por Torrent e Frenzer (1995) consiste no uso de uma câmara de célula dupla, onde se produz uma pressão negativa sob a superfície do material com o auxílio de uma bomba a vácuo, como ilustra a Figura 25. A partir da aplicação deste método não destrutivo, se obtém dados do coeficiente de permeabilidade do concreto (k_T) (SENTONE, 2011).

Figura 25 – Ilustração do equipamento utilizado na leitura de k_T pelo método de Torrent.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Torrent e Frenzer (1995) propuseram a Tabela 08 para a avaliação da qualidade do concreto baseado nos resultados do kT no método da permeabilidade ao ar. Esta mesma classificação também foi usada no trabalho de Adámek e Juránková (2010).

Tabela 08 – Qualidade de concretos pelo método Torrent

QUALIDADE DE COBERTURA DO CONCRETO	ÍNDICE	kT (10-16 m²)
Muito ruim	5	> 10
Ruim	4	1,0 – 10
Normal	3	0,1 – 1,0
Bom	2	0,01 – 0,1
Muito bom	1	< 0,01

Fonte: TORRENT FREENZER, 1995

Um equipamento Torrent da marca Proceq foi usado para a realização das medições de permeabilidade. As medidas foram efetuadas nas condições ambientais de laboratório de $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ e em umidade relativa de UR $70 \pm 5\%$.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se os resultados e as análises da pesquisa. Iniciando pelos resultados da profundidade da frente de carbonatação, passando por velocidade do pulso ultrassônico, permeabilidade até chegar na resistência a compressão.

4.1 FRENTE DE CARBONATAÇÃO

A seguir apresentam-se as tabelas referentes às medições da frente de carbonatação dos CPs com os diferentes tipos de agregado, rocha basáltica, diabásio e calcária dolomítica.

Apresenta-se na Tabela 09 a frente de carbonatação para o agregado de rocha basalto, com o traço 01, resistência menor, em mm

Tabela 09 – Leituras da frente de carbonatação para o agregado basalto, resistência menor.

Tempo de Carbonatação	Agregado	Resistência	CP	Leituras (mm)							MÉDIAS GERAIS
				1	2	3	4	5	6	Média	
14 dias	Basalto	menor	CP1	23,0	24,0	22,0	21,0	21,0	21,0	22,0	23,6
			CP2	23,0	22,0	22,0	22,0	21,0	23,0	22,2	
			CP3	25,0	26,0	27,0	27,0	28,0	26,0	26,5	
21 dias	Basalto	menor	CP1	36,0	38,0	39,0	39,0	36,0	36,0	37,3	36,6
			CP2	35,0	38,0	36,0	35,0	35,0	35,0	35,7	
			CP3	38,0	35,0	38,0	35,0	38,0	37,0	36,8	
28 dias	Basalto	menor	CP1	43,0	44,0	42,0	44,0	43,0	43,0	43,2	43,1
			CP2	43,0	44,0	42,0	43,0	44,0	42,0	43,0	
			CP3	50,0	42,0	41,0	42,0	41,0	42,0	43,0	
56 dias	Basalto	menor	CP1	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
			CP2	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	
			CP3	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	

Fonte: Próprio autor, 2019.

Apresenta-se na Tabela 10 a frente de carbonatação para o agregado de rocha calcário, traço 01, resistência menor, em mm

Tabela 10 – Leituras da frente de carbonatação para o agregado calcário, resistência menor.

Tempo de Carbonatação	Agregado	Resistência	CP	Leituras (mm)							MÉDIAS GERAIS
				1	2	3	4	5	6	Média	
14 dias	Calcário	menor	CP1	28,0	28,0	30,0	27,0	25,0	26,0	27,3	26,2
			CP2	25,0	25,0	25,0	25,0	28,0	28,0	26,0	
			CP3	24,0	25,0	24,0	26,0	27,0	26,0	25,3	
21 dias	Calcário	menor	CP1	41,0	40,0	42,0	44,0	43,0	41,0	41,8	40,6
			CP2	40,0	42,0	44,0	43,0	41,0	42,0	42,0	
			CP3	38,0	37,0	38,0	39,0	38,0	37,0	37,8	
28 dias	Calcário	menor	CP1	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
			CP2	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	
			CP3	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	

Fonte: Próprio autor, 2019.

Apresenta-se na Tabela 11 a frente de carbonatação para o agregado de rocha diabásio, com o traço 01, resistência menor, em mm

Tabela 11 – Leituras da frente de carbonatação para o agregado diabásio, resistência menor.

Tempo de Carbonatação	Agregado	Resistência	CP	Leituras (mm)							MÉDIAS GERAIS
				1	2	3	4	5	6	Média	
14 dias	Diabásio	menor	CP1	22,0	18,0	19,0	20,0	20,0	18,0	20,0	20,0
			CP2	20,0	20,0	21,0	19,0	21,0	21,0	20,0	
			CP3	19,0	21,0	19,0	20,0	21,0	22,0	20,0	
21 dias	Diabásio	menor	CP1	30,0	28,0	29,0	29,0	30,0	31,0	28,0	28,3
			CP2	27,0	27,0	28,0	30,0	27,0	30,0	30,0	
			CP3	28,0	28,0	28,0	27,0	29,0	29,0	27,0	
28 dias	Diabásio	menor	CP1	36,0	32,0	31,0	33,0	33,0	31,0	33,0	34,0
			CP2	35,0	34,0	32,0	33,0	33,0	35,0	35,0	
			CP3	32,0	37,0	32,0	33,0	34,0	36,0	34,0	
56 dias	Diabásio	menor	CP1	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
			CP2	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	
			CP3	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	

Fonte: Próprio autor, 2019.

A Tabela 12 apresenta a classificação entre as profundidades médias de carbonatação aos 28 dias de leitura para os CPs de resistência menor, em mm

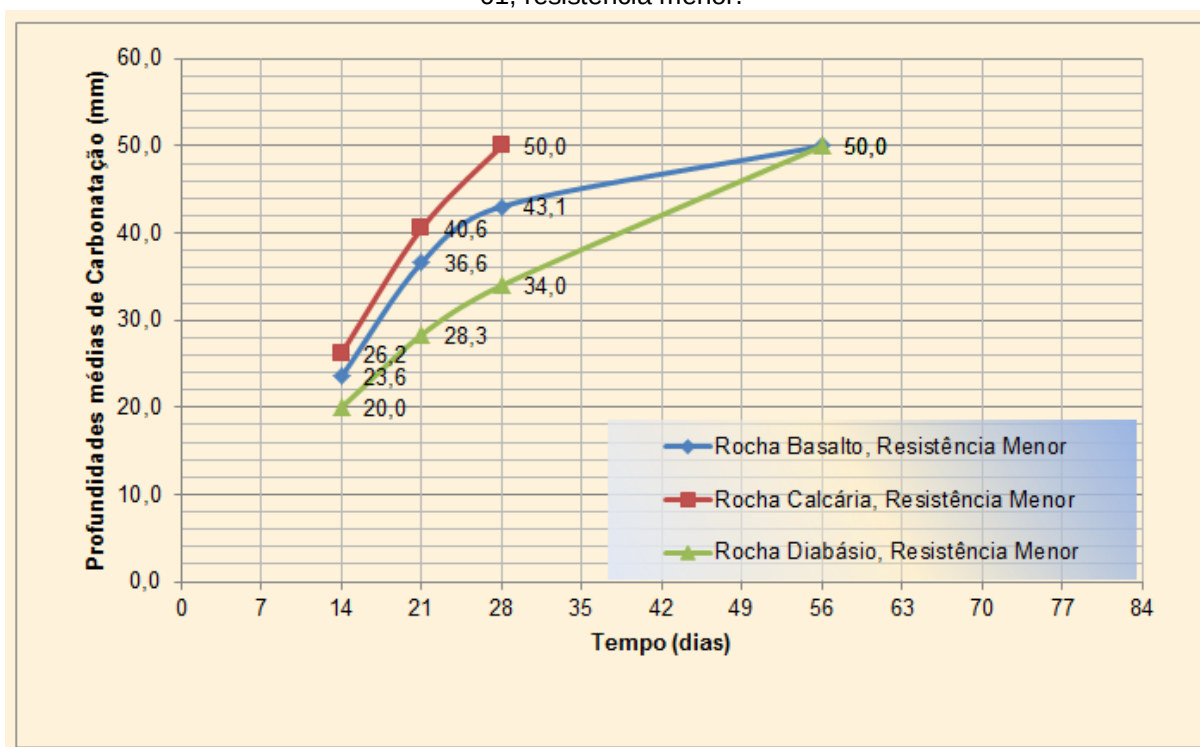
Tabela 12 – Classificação das profundidades médias de carbonatação aos 28 dias de leitura - Resistência Menor.

Rocha	Profundi- dade média	Classifi- cação	Percentual em relação à maior profundidade de carbonatação	Diferença percentual
Basalto	43,1	2 ^a	86%	14%
Calcária	50,0	3 ^a	100%	-
Diabásio	34,0	1 ^a	68%	32%

Fonte: Próprio autor, 2019.

O Gráfico 02 mostra a evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo para concretos de menor resistência (do traço 01) com os 3 tipos de agregados, basalto, calcário e diabásio. Os resultados indicam que o concreto com calcário apresentou a maior velocidade de carbonatação, seguido de basalto e diabásio.

Gráfico 02 – Profundidade da frente de carbonatação ao longo do tempo, para os concretos do traço 01, resistência menor.



Fonte: Próprio autor, 2019.

A seguir, os resultados para os ensaios da frente de carbonatação para os concretos elaborados com o traço 02, de resistência maior.

Apresenta-se na Tabela 13 a frente de carbonatação para o agregado de rocha basalto, traço 02, de resistência maior, em mm

Tabela 13 – Leituras da frente de carbonatação para o agregado basalto, resistência maior.

Tempo de Carbonatação	Agregado	Resistência	CP	Leituras (mm)							MÉDIAS GERAIS
				1	2	3	4	5	6	Média	
14 dias	Basalto	maior	CP1	9,0	9,0	6,0	8,0	9,0	8,0	8,2	8,2
			CP2	8,0	8,0	9,0	9,0	6,0	8,0	8,0	
			CP3	8,0	8,0	8,0	9,0	10,0	8,0	8,5	
28 dias	Basalto	maior	CP1	17,0	17,0	14,0	16,0	17,0	16,0	16,2	16,1
			CP2	18,0	17,0	17,0	16,0	16,0	16,0	16,7	
			CP3	15,0	15,0	15,0	16,0	17,0	15,0	15,5	
56 dias	Basalto	maior	CP1	23,0	22,0	24,0	23,0	21,0	25,0	23,0	24,3
			CP2	26,0	25,0	26,0	28,0	26,0	28,0	26,5	
			CP3	24,0	23,0	25,0	23,0	22,0	24,0	23,5	
84 dias	Basalto	maior	CP1	31,0	33,0	34,0	35,0	35,0	35,0	33,8	34,6
			CP2	33,0	32,0	35,0	36,0	33,0	34,0	33,8	
			CP3	38,0	36,0	35,0	36,0	37,0	34,0	36,0	

Fonte: Próprio autor, 2019.

Apresenta-se na Tabela 14 abaixo as leituras da frente de carbonatação para o agregado de rocha calcária, traço 02, resistência maior, em mm

Tabela 14 – Leituras da frente de carbonatação para o agregado calcário, resistência maior.

Tempo de Carbonatação	Agregado	Resistência	CP	Leituras (mm)							MÉDIAS GERAIS
				1	2	3	4	5	6	Média	
14 dias	Calcário	maior	CP1	10,0	12,0	11,0	12,0	10,0	10,0	10,8	10,6
			CP2	14,0	10,0	10,0	10,0	9,0	14,0	11,2	
			CP3	9,0	11,0	9,0	9,0	9,0	11,0	9,7	
28 dias	Calcário	maior	CP1	18,0	19,0	21,0	20,0	17,0	18,0	18,8	19,3
			CP2	22,0	21,0	19,0	19,0	19,0	22,0	20,3	
			CP3	18,0	19,0	18,0	19,0	19,0	20,0	18,8	
56 dias	Calcário	maior	CP1	25,0	25,0	27,0	26,0	25,0	26,0	25,7	27,4
			CP2	28,0	28,0	29,0	30,0	30,0	28,0	28,8	
			CP3	26,0	27,0	28,0	30,0	28,0	27,0	27,7	
84 dias	Calcário	maior	CP1	35,0	36,0	35,0	36,0	37,0	35,0	35,7	35,7
			CP2	38,0	36,0	35,0	36,0	33,0	34,0	35,3	
			CP3	38,0	36,0	35,0	36,0	37,0	34,0	36,0	

Fonte: Próprio autor, 2019.

Apresenta-se a seguir na Tabela 15 as leituras da frente de carbonatação para o agregado de rocha diabásio, com traço 02, resistência maior, em mm

Tabela 15 – Leituras da frente de carbonatação para o agregado diabásio, resistência maior.

Tempo de Carbonatação	Agregado	Resistência	CP	Leituras (mm)							MÉDIAS GERAIS
				1	2	3	4	5	6	Média	
14 dias	Diabásio	maior	CP1	10,0	9,0	8,0	10,0	10,0	9,0	9,3	9,6
			CP2	11,0	11,0	8,0	9,0	10,0	10,0	9,8	
			CP3	11,0	9,0	9,0	9,0	10,0	9,0	9,5	
28 dias	Diabásio	maior	CP1	15,0	16,0	14,0	15,0	16,0	17,0	15,5	16,3
			CP2	17,0	17,0	18,0	18,0	17,0	17,0	17,3	
			CP3	16,0	17,0	17,0	15,0	16,0	16,0	16,2	
56 dias	Diabásio	maior	CP1	24,0	23,0	25,0	25,0	22,0	24,0	23,8	24,2
			CP2	15,0	27,0	27,0	25,0	26,0	25,0	24,2	
			CP3	25,0	23,0	26,0	25,0	25,0	24,0	24,7	
84 dias	Diabásio	maior	CP1	33,0	30,0	30,0	31,0	32,0	33,0	31,5	32,4
			CP2	32,0	32,0	32,0	32,0	33,0	33,0	32,3	
			CP3	33,0	32,0	33,0	34,0	33,0	35,0	33,3	

Fonte: Próprio autor, 2019.

A Tabela 16 apresenta a classificação entre as profundidades médias de carbonatação aos 84 dias de leitura para os CPs de resistência maior, em mm

Tabela 16 – Classificação das profundidades médias de carbonatação aos 84 dias de leitura - Resistência Maior.

Rocha	Profundidade média	Classificação	Percentual em relação à maior profundidade de carbonatação	Diferença percentual
Basalto	34,6	2ª	97%	3%
Calcária	35,7	3ª	100%	-
Diabásio	32,4	1ª	91%	9%

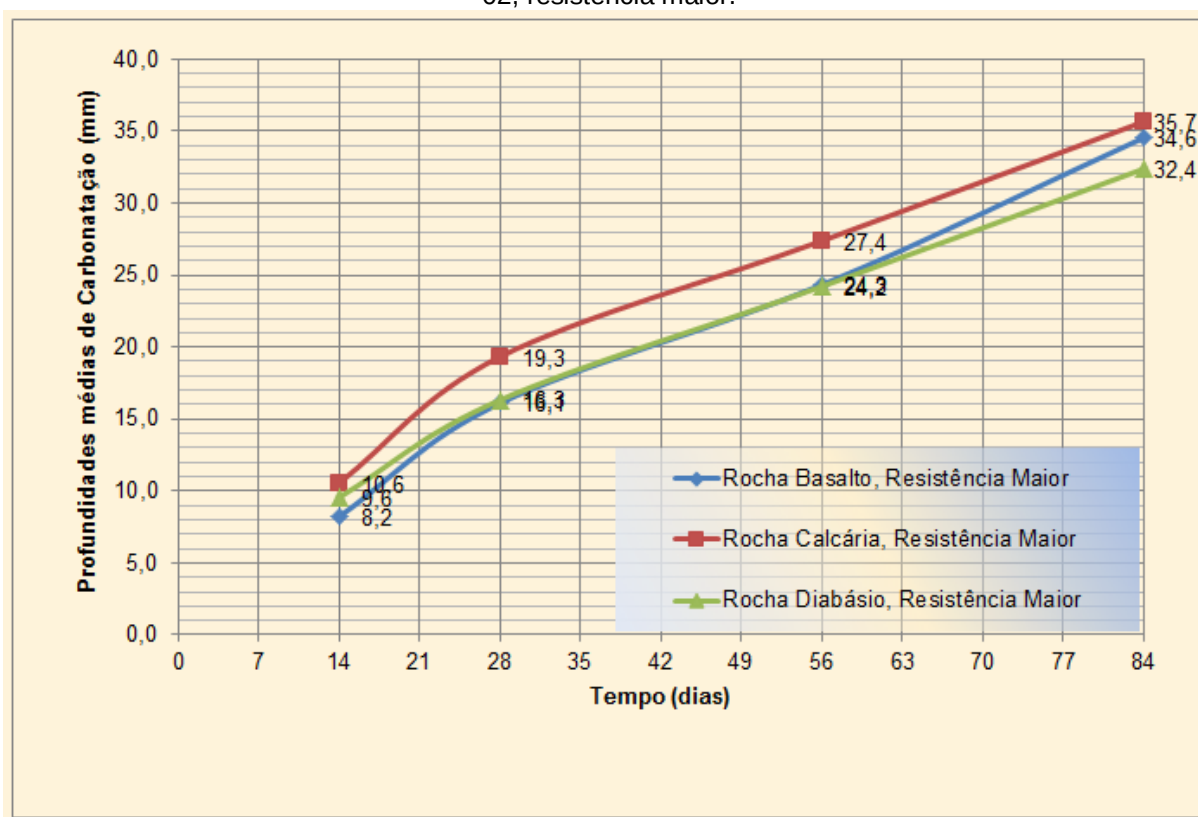
Fonte: Próprio autor, 2019.

O Gráfico 03 mostra a variação da profundidade de carbonatação para os concretos do traço 02, de resistência maior. Nota-se que neste caso de concreto de resistência mais elevada, dentro da faixa de concretos convencionais, a mudança de agregados não influenciou de forma considerável a velocidade de carbonatação.

Além disso, deve-se notar que a resistência do concreto influenciou sobremaneira a velocidade de carbonatação de modo que a total carbonatação dos corpos de prova, ao longo de 3 meses de ensaio acelerado, não foi atingida no caso do concreto de traço 02.

A seguir, o Gráfico 03 com a profundidade da frente de carbonatação para os concretos confeccionados com o traço 02, com maior resistência.

Gráfico 03 – Profundidade da frente de carbonatação ao longo do tempo, para os concretos do traço 02, resistência maior.



Fonte: Próprio autor, 2019

4.2 VELOCIDADE DE ULTRASSOM

A Tabela 17 a seguir apresenta os valores de velocidade de pulso ultrassônico (ultrassom) para os concretos do estudo.

Tabela 17 – Leituras da velocidade de ultrassom em m/s

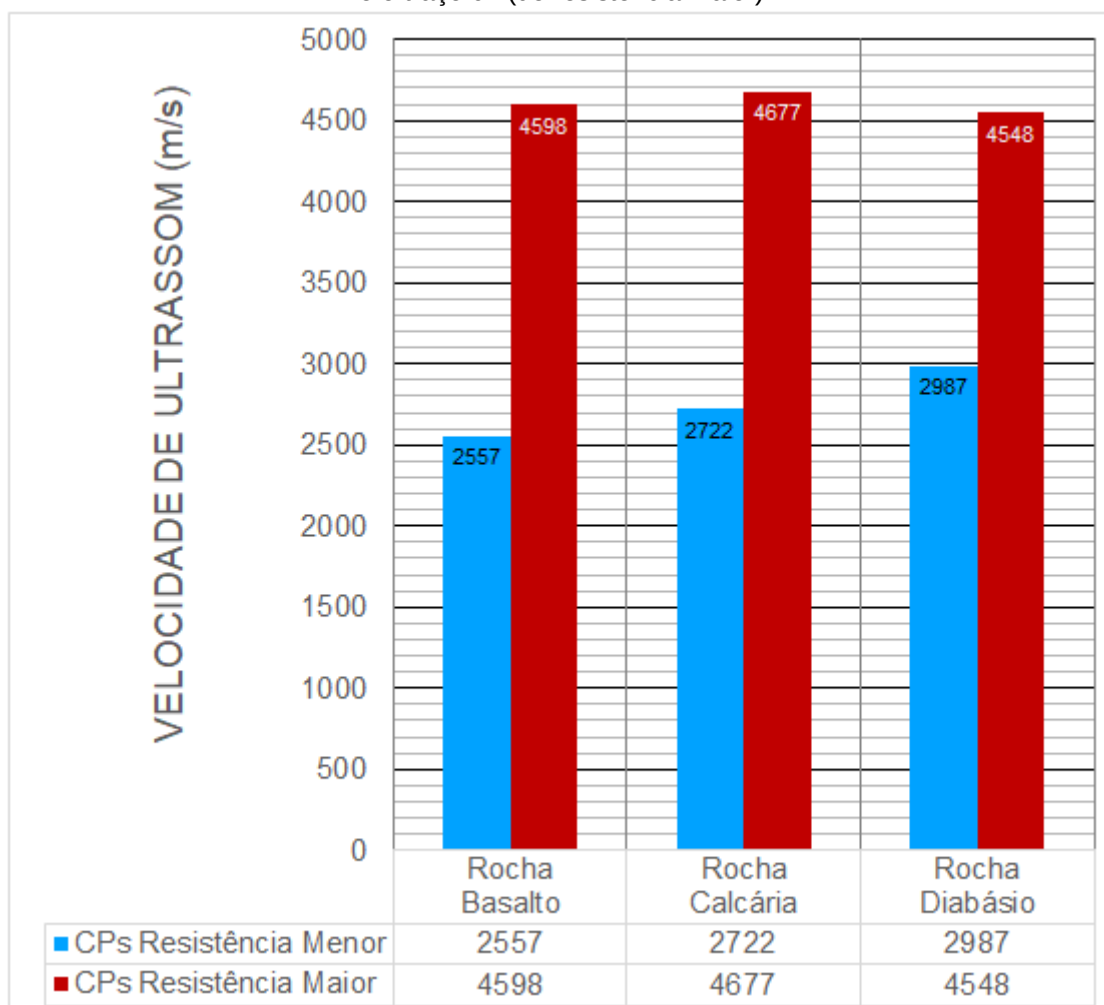
Corpos de prova	LEITURAS DAS VELOCIDADES DE ULTRASSOM (m/s)					
	Rochas e Resistências dos CPs					
	Basalto Resistência Menor	Calcária Resistência Menor	Diabásio Resistência Menor	Basalto Resistência Maior	Calcária Resistência Maior	Diabásio Resistência Maior
CP1	2546	2711	2953	4662	4684	4554
CP2	2546	2731	2984	4577	4662	4535
CP3	2578	2724	3024	4556	4684	4554
Médias das leituras	2557	2722	2987	4598	4677	4548

m/s

Fonte: Próprio autor, 2019

O Gráfico 04 a seguir mostra os valores de velocidade de ultrassom para os concretos do estudo. Verifica-se que a resistência à compressão influenciou a velocidade de ultrassom, assim como esperado. Os concretos realizados com o traço 02 se enquadraram como de qualidade excelente e os realizados com o traço 01 podem ser considerados como de qualidade regular. Além disso, o tipo de agregado não foi um fator de influência nos resultados, uma vez que os resultados são da mesma ordem de grandeza e classificação quanto à qualidade do concreto.

Gráfico 04 – Velocidade de ultrassom dos concretos do estudo para o traço 01 (de resistência menor) e o traço 02 (de resistência maior).



Fonte: Próprio autor, 2019.

4.3 PERMEABILIDADE AO AR

As tabelas a seguir apresentam os resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar pelo método Torrent para os concretos dos traços 01 e 02 usados neste trabalho de pesquisa. Os ensaios foram realizados para todos os CPs em dois momentos: antes de colocá-los na câmara de carbonatação e, após a carbonatação.

A seguir a Tabela 18 apresenta o ensaio de permeabilidade ao ar nos CPs, de maior e menor resistências para as agregados, basalto, calcário e diabásio, antes da carbonatação.

Tabela 18 – Leitura de permeabilidade ao ar para os agregados basalto, calcário e diabásio, resistências maior e menor, antes da carbonatação.

ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO AR ($E^{-16} m^2$)						
ANTES DA CARBONATAÇÃO						
	Rocha Basáltica Resist. Menor	Rocha Calcária Resist. Menor	Rocha Diabásio Resist. Menor	Rocha Basáltica Resist. Maior	Rocha Calcária Resist. Maior	Rocha Diabásio Resist. Maior
CP 1	7,280	9,120	5,620	0,583	0,840	0,451
CP 2	6,550	8,590	5,200	0,522	0,792	0,502
CP 3	6,980	9,330	4,850	0,539	0,868	0,485
MÉDIAS	6,937	9,013	5,223	0,548	0,833	0,479

Fonte: Próprio autor, 2019

A seguir a Tabela 19, com os resultados do ensaio de permeabilidade ao ar nos CPs de maior e menor resistências, após a carbonatação.

Tabela 19 – Leitura de permeabilidade ao ar para os agregados basalto, calcário e diabásio, resistências maior e menor, após a carbonatação.

ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO AR ($E^{-16} m^2$)						
APÓS A CARBONATAÇÃO						
	Rocha Basáltica Resist. Menor	Rocha Calcária Resist. Menor	Rocha Diabásio Resist. Menor	Rocha Basáltica Resist. Maior	Rocha Calcária Resist. Maior	Rocha Diabásio Resist. Maior
CP 1	2,890	4,530	1,680	0,105	0,233	0,054
CP 2	2,630	3,970	1,940	0,099	0,296	0,063
CP 3	2,800	4,380	2,320	0,097	0,330	0,050
MÉDIAS	2,773	4,293	1,980	0,100	0,286	0,056

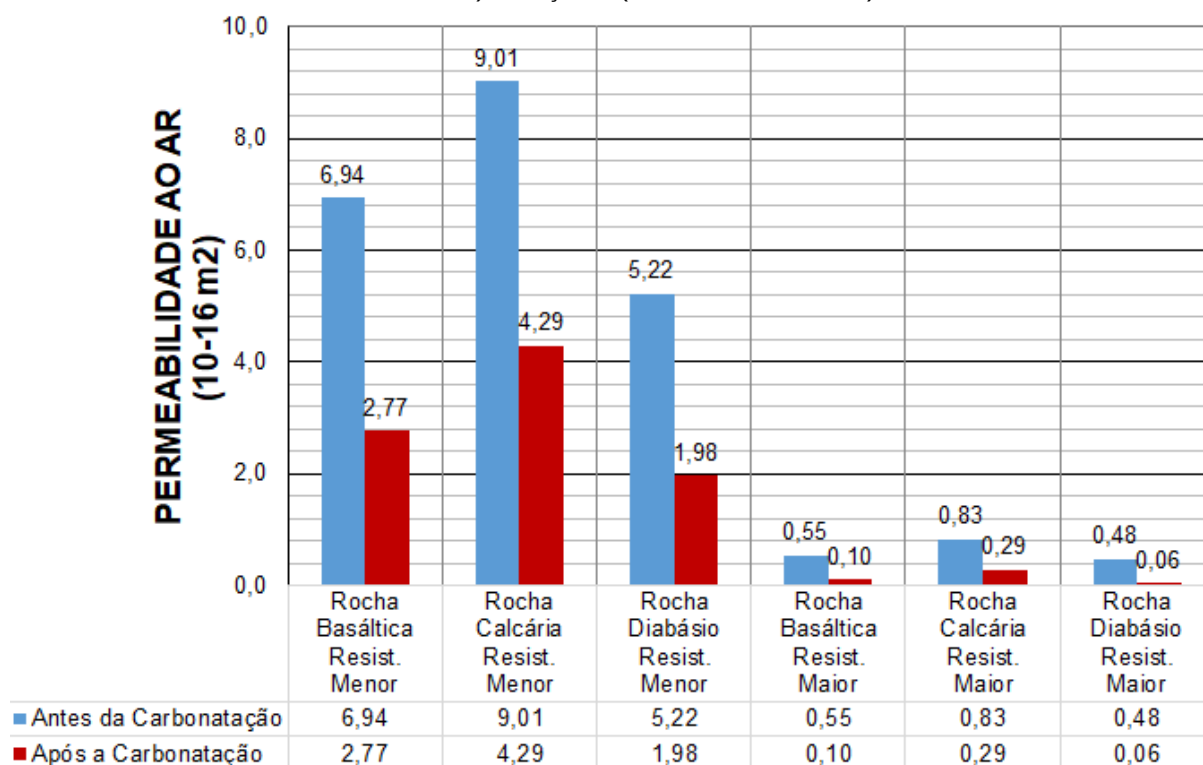
Fonte: Próprio autor, 2019

O Gráfico 05 mostra os valores de permeabilidade ao ar.

Mais uma vez ficou evidente que os concretos com maior resistência à compressão são muito menos permeáveis, sendo este um indicativo que estes concretos absorvem menos água e devem resultar em maior durabilidade na maioria das aplicações.

Também é possível notar que o processo de carbonatação reduziu a permeabilidade ao ar de todos os concretos. Isso ocorreu porque o processo de carbonatação colmata poros como relatado por MEDEIROS e HELENE (2001), gerando obstrução e dificultando a penetração de ar no ensaio.

Gráfico 05 – Permeabilidade ao ar pelo método Torrent para os concretos do traço 01 (de menor resistência) e traço 02 (de maior resistência).



Fonte: Próprio autor, 2019.

4.4 ANÁLISE DA CARBONATAÇÃO E DEMAIS ENSAIOS DOS CPS

Após os ensaios da frente de carbonatação iniciados 60 dias após a cura dos corpos de prova e, baseado nos resultados apresentados, temos a considerar que:

- Ensaio da velocidade do pulso ultrassônico (ultrassom):
 - A resistência à compressão influenciou a velocidade de ultrassom, como esperado.
 - Os concretos do traço 02 – de maior resistência – se enquadram como de qualidade excelente e os do traço 01 – de menor resistência – como de qualidade regular; isto se reflete também nos números encontrados nos ensaios de resistência à compressão.

- O tipo de agregado não influenciou nos resultados de velocidade de ultrassom, concluindo-se que o tipo de agregado não é fator determinante para alterar a homogeneidade do concreto.
- Ensaio de Permeabilidade ao ar:
 - Os concretos do traço 02 com maior resistência à compressão são muito menos permeáveis, sendo esse um indicativo de que estes concretos absorvem menos água e resultam em maior durabilidade na maior parte das aplicações;
 - O processo de carbonatação reduziu a permeabilidade ao ar de todos os concretos, conforme esperado, pois o processo de carbonatação colmata os poros e dificulta a penetração de ar.
- Ensaio da frente de carbonatação:
 - A resistência do concreto teve grande influência na velocidade de carbonatação, de tal modo que, os CPs do traço 02 (maior resistência) não se atingiu ainda a total carbonatação.
 - Para os CPs de traço 01 (menor resistência) o concreto com calcário foi o que apresentou a maior velocidade de carbonatação, seguido do basalto e diabásio.
 - Para os CPs do traço 02 a mudança de agregados não influenciou de forma considerável a velocidade de carbonatação.

4.5 RESULTADOS E ANÁLISES DO ROMPIMENTO DOS CPS

No dia 06 de Dezembro de 2019 foram rompidos os corpos de prova, do que resultaram os seguintes valores apresentados abaixo nas Tabelas 20 e 21:

Tabela 20 – Tabela de resultados de resistência à compressão para todos os traços e rochas utilizadas.

RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO					
Traços	Tipos de agregado	Carga de Ruptura à Compressão (kN)	Carga Média de Ruptura à Compressão (kN)	Seção Transversal dos CPs (cm²)	Resistências Médias Obtidas (MPa)
Traço 01 - Resistência Menor	Diabásio	88,4	89,0	78,5	11,3
		87,8			
		90,9			
	Calcária	91,2	90,5	78,5	11,5
		93,3			
		87,1			
	Basalto	85,8	92,3	78,5	11,8
		95,1			
		96,1			
Traço 02 - Resistência Maior	Diabásio	327,5	325,0	78,5	41,4
		340,7			
		306,7			
	Calcária	332,6	326,8	78,5	41,6
		333,6			
		314,3			
	Basalto	307,4	307,4	78,5	39,1
		308,0			
		306,7			

Fonte: Próprio autor, 2019.

Abaixo a Tabela 21 com o resumo das Resistências Médias obtidas (em MPa) na ruptura dos CPs e a classificação entre eles.

Tabela 21 – Tabela dos resultados médios de resistência à compressão

RESISTÊNCIAS MÉDIAS À COMPRESSÃO					
Traços	Tipos de agregado	Obtidas (MPa)	Classificação	Percentual em relação à resistência mais alta	Diferença percentual
Traço 01 - Resistência Menor	Diabásio	11,3	3 ^a	96%	4%
	Calcária	11,5	2 ^a	98%	2%
	Basalto	11,8	1 ^a	100%	-
Traço 02 - Resistência Maior	Diabásio	41,4	2 ^a	99%	1%
	Calcária	41,6	1 ^a	100%	-
	Basalto	39,1	3 ^a	94%	6%

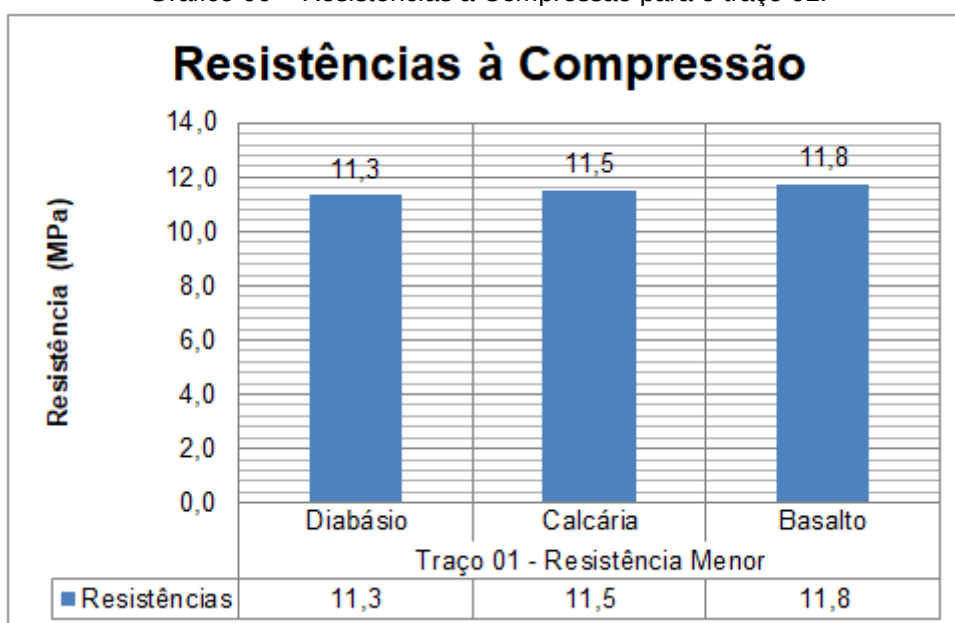
Fonte: Próprio autor, 2019.

Com base nos dados levantados acima verificou-se que os corpos de prova com resistências mecânicas esperadas iguais apresentaram resultados de resistência à compressão muito próximos. Para os concretos do traço 01 confeccionados com agregados de rocha calcária dolomítica, os valores ficaram na média entre os demais agregados, comprovando que a rocha calcária dolomítica possui propriedades de resistência semelhantes às demais rochas pesquisadas. Para os concretos do traço 02, a rocha calcária dolomítica obteve a maior resistência em relação às demais pesquisadas, novamente comprovando propriedades de resistência semelhantes às demais rochas pesquisadas.

Há que se observar ainda que a resistência alcançada para os CPs do traço 01 apresentaram resultados muito baixos, caracterizando deficiência na dosagem do concreto.

A seguir o Gráfico 06 com as leituras da resistência à compressão para os CPs confeccionados para o traço 01, de resistência menor.

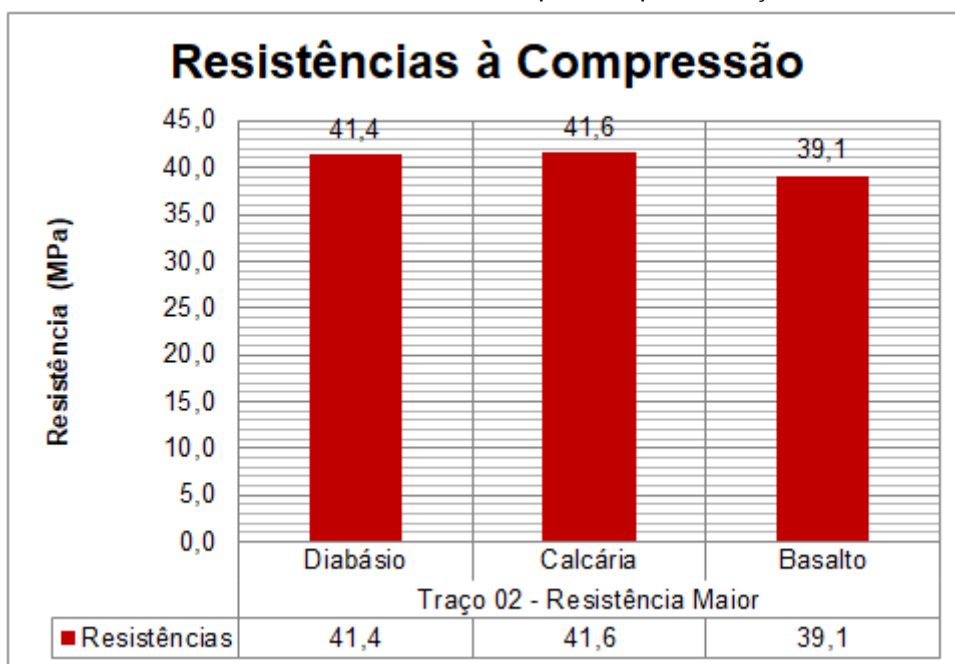
Gráfico 06 – Resistências à Compressão para o traço 01.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Por outro lado, o traço 02 – de resistência maior – apresentou resultados satisfatórios em torno de 40 MPa demonstrando ser um traço eficiente, como se apresenta a seguir no Gráfico 07.

Gráfico 07 – Resistências à Compressão para o traço 02.



Fonte: Próprio autor, 2019.

4.6 ANÁLISE DA TRABALHABILIDADE

Apresenta-se a seguir a Tabela 22 comparativa da trabalhabilidade do concreto fresco para os diferentes tipos de agregados e a correlação entre os traços utilizados.

Tabela 22 – Tabela de resultados de Abatimento

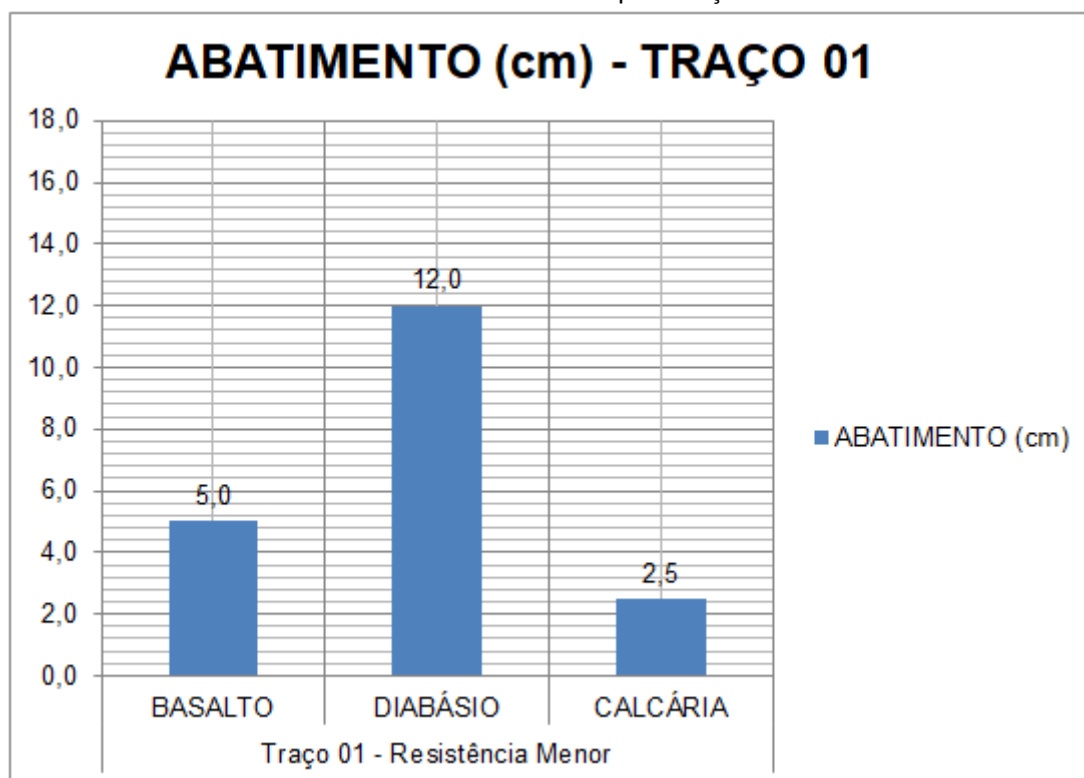
Traços adotados	Traço em volume	Tipo de Brita nº 1	Água (ml)	ABATIMENTO (cm)
Traço 01 - Resistência Menor	1 : 2 : 4	BASALTO	750	5,0
	1 : 2 : 4	DIABÁSIO	750	12,0
	1 : 2 : 4	CALCÁRIA	750	2,5
Traço 02 - Resistência Maior	1 : 1 : 4	BASALTO	1130	7,0
	1 : 1 : 4	DIABÁSIO	1130	16,0
	1 : 1 : 4	CALCÁRIA	1130	8,0

Fonte: Próprio autor, 2019.

Na sequência tem-se os gráficos de análise da trabalhabilidade do concreto em estado fresco para os traços 01 e 02.

A seguir o Gráfico 08 com resultados de Abatimento para o traço 01, de resistência menor.

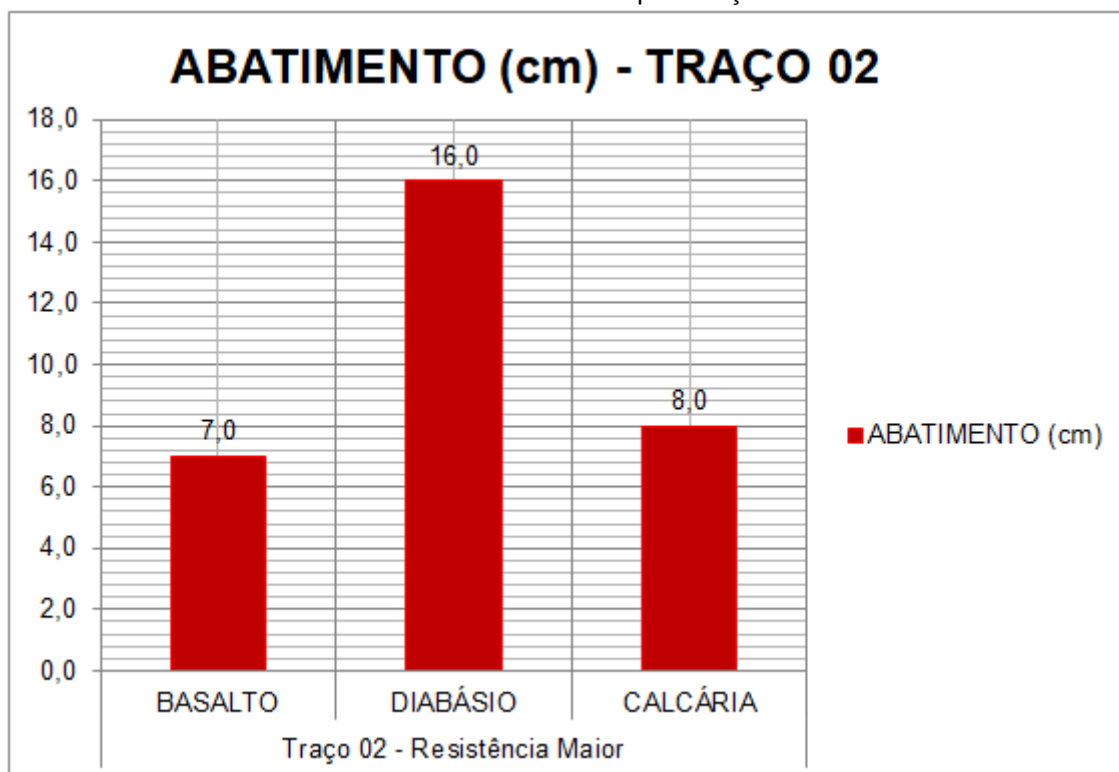
Gráfico 08 – Abatimento para traço 01.



Fonte: Próprio autor, 2019.

O Gráfico 09 tem os resultados de Abatimento para o traço 02, de resistência maior.

Gráfico 09 – Abatimento para traço 02.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Durante a confecção dos CPs observou-se que, para aqueles realizados com a brita da rocha calcária dolomítica, a aparência era de que não havia uma coesão adequada entre os materiais e, principalmente para os concretos obtidos por meio do traço 01 com rocha calcária, havia uma aparente dificuldade na trabalhabilidade, refletida no resultado de Abatimento baixo, da ordem de 2,5 cm. Isto poderia ter sido corrigido com o uso de aditivo; como adotou-se a premissa neste trabalho de que não se usaria qualquer aditivo, os CPs foram moldados com as pastas de concreto da forma original que se apresentaram.

Como foi utilizado para a moldagem de todos os CPs o mesmo traço, a mesma relação água/cimento, a mesma energia de adensamento e o não-uso de aditivos, obteve-se diferentes Abatimentos. Nessas condições, conforme Amorim (2010) sabe-se que os concretos resultantes dessa mistura que apresentam menor Abatimento apresentam mais vazios; essa maior porosidade do concreto está diretamente relacionada à facilidade de penetração do CO_2 no concreto, o que facilita o avanço da frente de carbonatação.

Apesar disso, todos os concretos aparentaram homogeneidade constante e viabilizaram a moldagem dos CPs.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O presente capítulo apresentará as considerações finais da pesquisa e recomendará pesquisas para trabalhos futuros.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se que foram atingidos os objetivos estabelecidos no início desta pesquisa, que a hipótese foi parcialmente corroborada e pôde-se observar que:

- Concretos dosados com diferentes agregados de diferentes tipos de rochas possuem diferentes profundidades de frente de carbonatação;
- Verificou-se que, para o traço 01 de resistência menor (aproximadamente 11 MPa) os concretos com agregado de rocha calcária dolomítica apresentaram profundidade da frente de carbonatação 14% maior que os concretos dosados com basalto e 32% em relação ao diabásio;
- Entretanto observou-se que, para os concretos dosados com o traço 02 – de resistência maior, os quais alcançaram resistências mecânicas em torno de 40 MPa – as diferenças nos resultados da frente de carbonatação foram pouco expressivos, ou seja, a profundidade da frente de carbonatação dos concretos com agregado de rocha calcária dolomítica foram de 3% e 9%, respectivamente em relação aos agregados basalto e diabásio. Demonstra isso que, concretos com maiores resistências mecânicas possuem maior resistência à frente de carbonatação, pois possuem menores quantidades de vazios e capilares. E que, as diferenças nas profundidades de carbonatação tendem a ficarem menores com o aumento da resistência à compressão, visto que o aumento da resistência reduz a porosidade, dificultando a penetração do CO_2 . Justifica-se com isso a argumentação de que a hipótese do objetivo geral desta pesquisa foi parcialmente corroborada.

No que contribui ainda as análises favoráveis com relação à homogeneidade através dos ensaios de velocidade de ultrassom e de permeabilidade ao ar. Tais ensaios mostraram que a rocha calcária dolomítica contribui com o mesmo grau de homogeneidade no concreto em comparação às demais rochas analisadas.

Quanto às resistências mecânicas obtidas através dos ensaios à compressão, tanto para o traço 01 quanto para o traço 02 os resultados foram equivalentes para as 3 rochas pesquisadas, ou seja, diferença máxima de 4% para os concretos de resistência menor (em torno de 11 MPa) e 6% para os concretos de resistência maior (em torno de 40 MPa).

A rocha calcária dolomítica sempre carregou o mito de que não seria um agregado apropriado para uso em concretos de alta resistência. Com os resultados obtidos através das análises dos corpos de prova com resistência de 40 MPa (traço 02), comprovou-se que o agregado de rocha calcária dolomítica teve um comportamento satisfatório e similar às demais rochas comparadas, colocando-a no mesmo patamar de aplicabilidade a concretos de alta resistência.

Deste modo, conclui-se que este aspecto verificado nos corpos de prova de maior resistência mecânica fornecem uma perspectiva favorável de que é possível obter bons resultados com a utilização da rocha calcária dolomítica.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho não tem a intenção de encerrar o assunto sobre possíveis limitações ao uso da rocha calcária dolomítica em concretos. Pelo contrário, abre precedentes para novos estudos mais aprofundados sobre o tema. Baseado nesses resultados e análises, ficam para posteriores estudos o desafio de serem desenvolvidos novos traços mais econômicos para resistências entre 20 MPa e 40 MPa, utilizando-se a rocha calcária dolomítica.

Tem-se que considerar também que este trabalho se ateve a comparar o comportamento da rocha calcária dolomítica em relação às rochas diabásio e basalto. Fica também o desafio para posteriores estudos em se analisar e comparar com outras rochas utilizadas como agregado graúdo em concreto, como por exemplo as rochas graníticas, gnaisses, etc., além de outros tipos cimentos.

As limitações impostas e/ou adotadas neste trabalho podem também ser revistas em trabalhos futuros. Para trabalhos que exigem maior precisão de resultados, como teses de mestrado ou doutorado, alguns procedimentos podem merecer maior grau de precisão e análise.

Sugere-se também para futuros estudos a análise dos mesmos traços com a mesma relação água/cimento e buscando-se a mesma trabalhabilidade entre eles,

alcançando-se isso com o uso de aditivos (plastificantes ou superplastificantes) para que seja possível obter com a mesma energia de adensamento igual índice de vazios para todos os CPs, visando padronizar a consistência dos concretos com a mesma relação água/cimento. Também pode-se sugerir a análise comparativa sobre a influência do tipo de agregado na permeabilidade, delimitar outras condições de contorno que podem influenciar negativamente nos resultados, e até estudar outros parâmetros deletérios com as reações álcali-carbonato e a formação de taumasita por ataque de sulfatos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, dez 2003.

_____. **NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro/RJ, 1994.

_____. **NBR 8802 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda**. Rio de Janeiro/RJ, 2013.

_____. **NBR-12654 – Controle tecnológico de materiais componentes do concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, jun 1992.

_____. **NBR-12655 – Controle de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR-NM-248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, jul 2003.

ADÁMEK, J.; JURÁNKOVÁ, V. **Evaluation of durability of concrete by measurement of permeability for air and water**. In: Modern Building Materials, Structures and Techniques. Proceedings of the International Conference. Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, 2010. p. 1.

ALHADAS, M. F. S. **Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto**. (Tese de Livre Docência). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

AMORIM, A. A. **Durabilidade das estruturas de concreto armado aparentes**. (Tese de Livre Docência). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

ANEPAC. **Agregados**. Disponível em: < <https://www.anepac.org.br/wp/agregados/>>. Acesso em: 20 abr. 2015.

ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994.

CARVALHO, R. C. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014**. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

CASTRO, P.; SANJUÁN, M. A.; GENESCÁ, J. **Carbonation of concretes in the Mexican Gulf. Building and environment**. Pergamon: 2000.

CIMENTO ITAMBÉ. **Carbonatação do Concreto**. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

CUNHA, A. C. Q.; HELENE, P. R. L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo: EPUSP, 2001.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário Mineral Brasileiro**. Brasília: DNPM/MME, 2010.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Balanço Mineral Brasileiro**. Brasília: DNPM/MME, 2001.

GLASSER, F. P.; MATSCHEI. **Interactions between Portland cement and carbondioxide**. 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Anais. Montreal: 2007.

GODINHO, J. P.; SOUZA JUNIOR, T. F.; MEDEIROS, M. H. F.; SILVA, M. S. A. **Fatores de influência na velocidade de pulso ultrassônico no concreto**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais (RIEM), 2020. (NO PRELO)

GOMES, M. **Norma de inspeção predial**. São Paulo: 2007, IBAPESP.

GUIMARÃES, A. C. T.; ANSCHAU, K. R.; LOPES, R. E. **Resistência à carbonatação de concretos dosados com diferentes tipos de cimento**. (Tese de Livre Docência). São Paulo: Instituto IDD, 2010.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. (Tese de Livre Docência). Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2013.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. (Tese de Livre Docência). São Paulo: Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

_____; ANDRADE, T. **Concreto de cimento portland**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2010.

_____; TUTIKIAN, B. **Dosagem dos concretos de cimento portland**. In: IBRACON Concreto: Ciência e Tecnologia. [S.l.]: [s.n.], Cap. 12. 2011.

_____; TERZIAN, P. R. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992

_____; PAZINI, E. P. et al. **Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto**. (Red Rehabilitar). São Paulo: Universidade de São Paulo, 1993.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto**. (Tese de doutorado) São Paulo: Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

IBRACON – INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010.

JOHN, V. M. **Avaliação da durabilidade de materiais, componentes e edificações, emprego do índice de degradação**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 1987.

LA SERNA, H.; REZENDE, M. **Sobre a associação nacional das entidades de produtores de agregados da construção civil**. Site da ANEPAC, 2009. Disponível em: <<http://>. Acesso em: 6 set 2013.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. R. L. **Estudo da carbonatação em concretos e argamassas**. Revista Engenharia, Ciência & Tecnologia, Vitória, Espírito Santo, v. 4, n. 4, p. 3-12, 2001.

MEHTA, P. K. **Durability of concrete – fifty years of progress? Durability of concrete Second International Conference. Anais...** (SP-126). p.1-31. Montreal: [s.1], ACI,1991

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2008.

MORAIS, A.A.C.; SILVA JÚNIOR, F.A.; ALCÂNTARA, C.S. **Análise comparativa da brita calcária, beneficiada de diferentes formas, para utilização em concreto como agregado graúdo**. Mossoró: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005.

_____; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Traduzido por CREMONINI, R. A. et al. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NUNES, F.W.G. **Resistência e módulo de elasticidade de concreto usados no rio de janeiro**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete**. In: Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1. 2003.

OLIVEIRA, D. P. **Gênese de cambissolos desenvolvidos de rocha calcária na chapada do Apodi-CE**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2012.

PAPADAKIS, V. G. **Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress**. Cement and Concrete Research, v. 30, p. 291299, 2000.

PARRAT, L.J. **Damage caused by carbonation of reinforced concret**. Materials and structures, v.23 p 230-234,1990.

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). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

PETER, M. A. MUNTEAN, A. MEIER, S. A. BOHM, M. **Competition of several carbonation reactions in concrete: a parametric study**. Cement and Concrete Research. V. 38, n. 12, p. 1385-1393, 2008.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande, 2010.

QUARESMA, L.F. **Perfil de brita para construção civil**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2010.

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

RICHARDSON, M.G. **Carbonation of reinforced concrete: Its causes and management**. New York: CITIS Ltd, Publishers, 1988.

RINCÓN, O. T.; CARRUYO, C. A.; HELENE, P.; Díaz, I. **Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion en estructuras de hormigon armado**.

DURAR: Red Tematica XV. B Durabilidad de la Armadura–Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo, 1998.

SAETTA, A.V.; SCHREFLER, B.A.; VITALINI, R.V. **The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials**. Cement and Concrete Research, v.26, n.10, p.1479-1484, 1993.

SENTONE, D. T. **Desenvolvimento de método para medida de permeabilidade superficial de superfície de revestimento de argamassa**. Dissertação. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2011.

SGANDERLA, Maíra S. **(Re) aproveitamento dos resíduos classe A da construção civil na substituição parcial do agregado miúdo do concreto**. Trabalho de conclusão de curso. Ijuí: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, 2015.

SILVA JÚNIOR, F. A; FERNANDES, A. C. **Análise comparativa dos agregados graúdos britas calcária e granítica e dos agregados miúdos resíduo de borracha de pneu e areia para utilização em concretos**. IBRACON, BRASIL, 2014.

SILVA, V. M; **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. (Tese de Livre Docência). São Carlos: Universidade de São Paulo (USP), 2007.

SMOLCZYK. H.G **Discussion of principal paper on carbonation of concrete by Hama da**. In. INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE CHEMISTRY OF CEMENT.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd Edition. London: Thomas Telford, 1997. 459 p.

THIÉRY, M. **Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons - Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique**. 2005. 347 f. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2005.

TORRENT, R.; FRENZER, G. **A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”**. Internacional symposium non-destructive testing in civil engineering, 1995.

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

VARELA, Marcio. **Mini curso de dosagem de concreto método ABCP/ACI – Congresso Científico Universidade Potiguar**. Natal: Universidade Potiguar Campus Mossoró, 2012.

7 ANEXOS

7.1 IMAGENS DE EXECUÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Figura 26 – Agregado Graúdo Calcário Dolomítico utilizados na confecção dos CPs.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 27 – Procedimento de separação dos materiais em equipamento quarteador conforme norma.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 28 – Equipamentos, seleção de agregado miúdo através do quarteador, separação de grãos para agregado miúdo utilizando peneira granulométrica e normas utilizadas no processo.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 29 – Balança de precisão para aferição e conferência de massa em Gramas (g) para realização dos traços desejados.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 30 – Agitador de peneiras, de modo a vibrar a peneira granulométrica e assim selecionar os agregados miúdos a serem utilizados e separar os grãos.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 31 – Pesagem do agregado graúdo, balança de precisão para aferição e conferência de massa em Gramas (g) para realização dos traços desejados.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 32 – Equipamento de secagem para remoção de umidade do agregado graúdo.



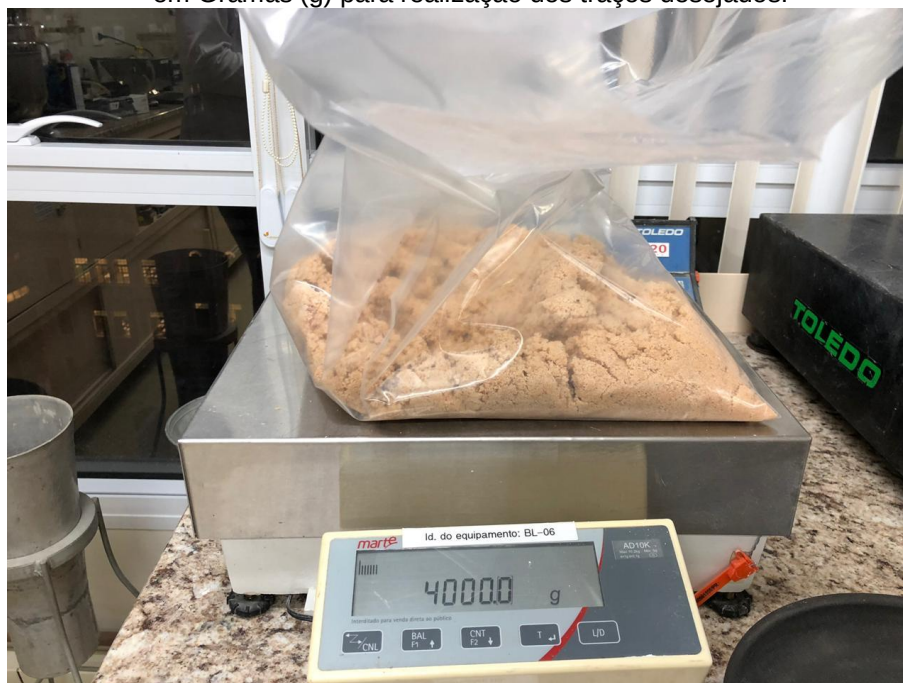
Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 33 – Execução de secagem do agregado miúdo, procedimentos de cálculos e análises.



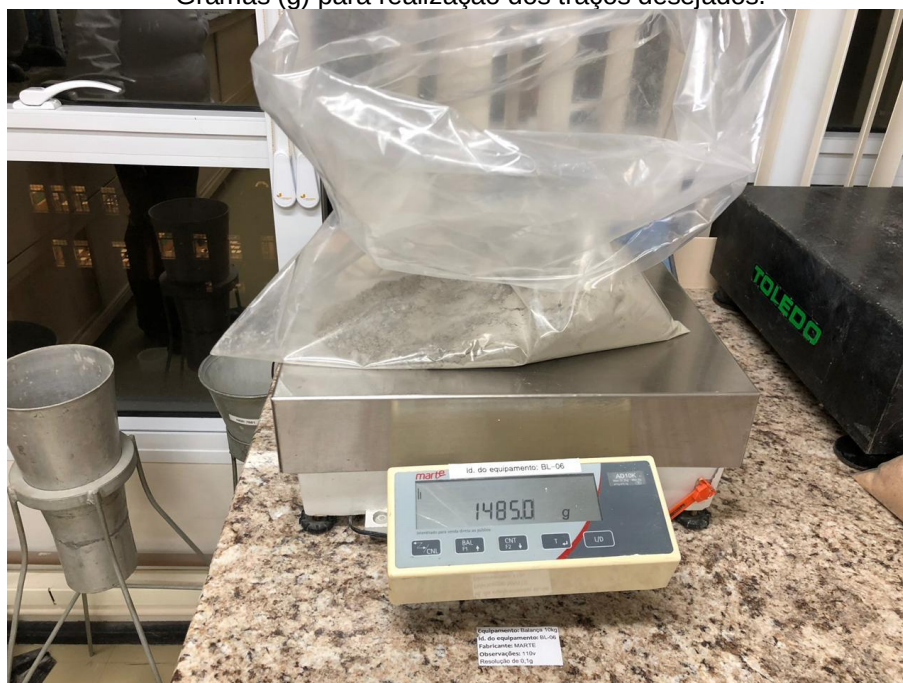
Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 34 – Pesagem do agregado miúdo, balança de precisão para aferição e conferência de massa em Gramas (g) para realização dos traços desejados.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 35 – Pesagem do cimento, balança de precisão para aferição e conferência de massa em Gramas (g) para realização dos traços desejados.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 36 – Betoneira utilizada para mistura dos materiais de modo a formar a pasta de concreto utilizada para fazer os corpos de prova (CPs).



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 37 – Aplicação de desmoldante nas peças de moldes metálicos, de modo a não danificar o corpo de prova na retirada e facilitar a desmoldagem.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 38 – Cronômetro para fiscalizar o tempo de mistura exato da pasta de concreto.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 39 – Cimento utilizado, CP-II F-32 todas as obras, convencional.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 40 – Etapa de procedimento do Teste de Abatimento.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 41 – Aferição do Abatimento.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 42 – Desmoldagem dos corpos de prova após um dia da moldagem, para imersão em água posteriormente.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 43 – Demarcação e identificação dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 44– Organização e classificação dos corpos de prova antes da colocação na câmara de carbonatação.



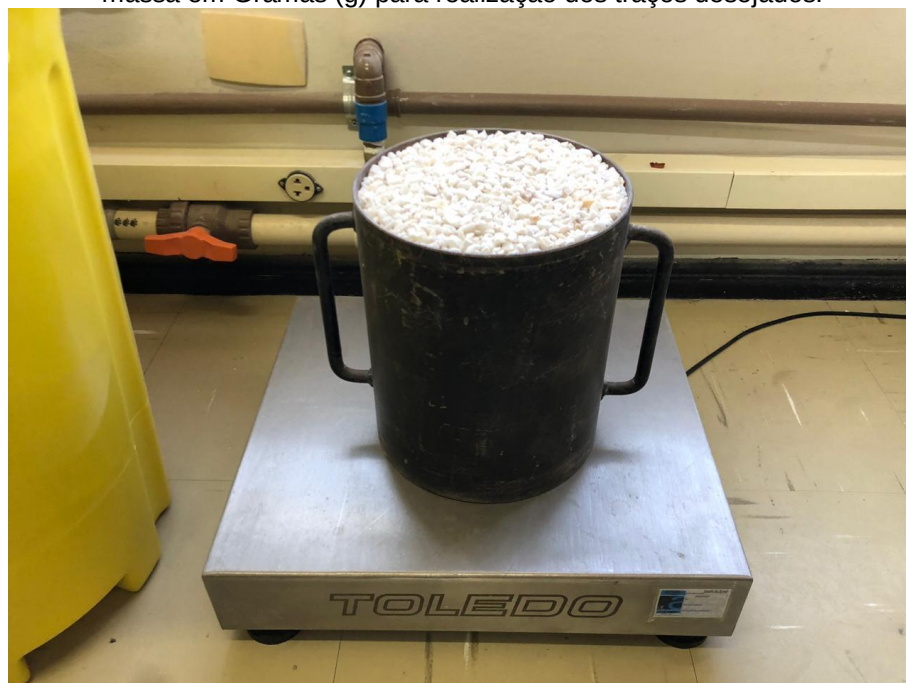
Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 45 – Preparativos das quantidades de agregado miúdo antes da pesagem, de modo a conferir ao trabalho porções exatas de medidas.



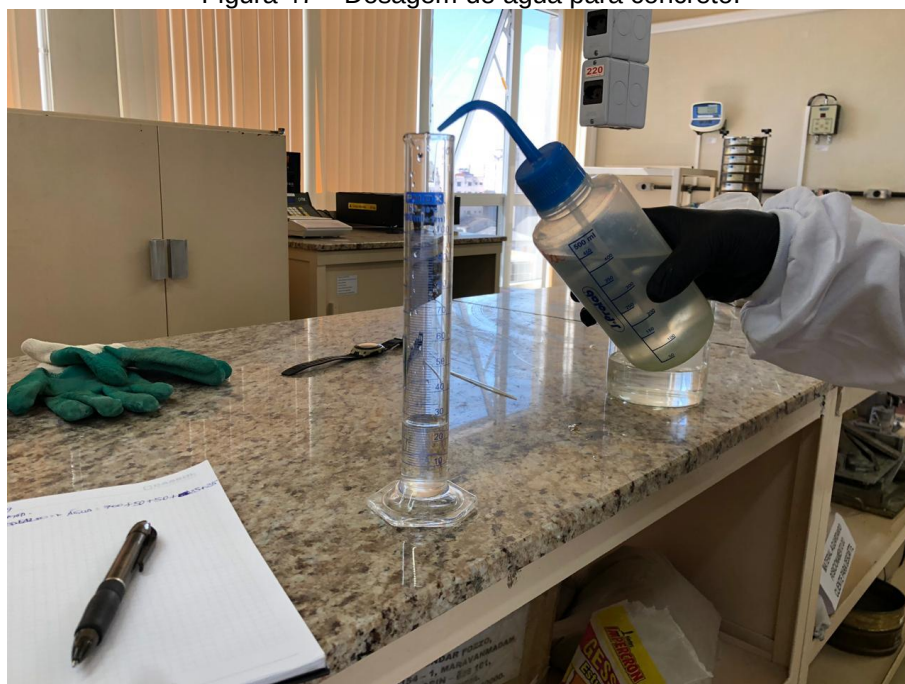
Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 46 – Pesagem do agregado graúdo, balança de precisão para aferição e conferência de massa em Gramas (g) para realização dos traços desejados.



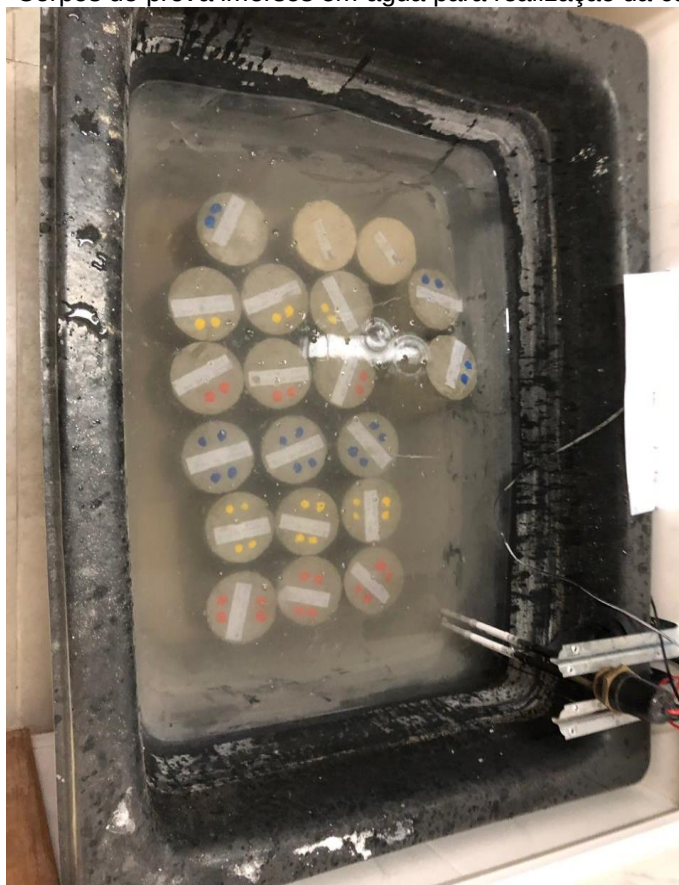
Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 47 – Dosagem de água para concreto.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 48 – Corpos de prova imersos em água para realização da cura submersa.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 49 – Apiloamento da pasta de concreto para teste de Abatimento, conforme norma NBR NM 67-1998 - Ensaio de Abatimento do Concreto (Slump Test)



Fonte: Próprio autor, 2019.

7.2 RELATÓRIO DE ENSAIOS – CARBONATAÇÃO, PERMEABILIDADE AO AR E VELOCIDADE DE ULTRASSOM

Em anexo segue transcrição completa do relatório técnico laboratorial desenvolvido pelo Laboratório da Universidade Federal do Paraná, sob responsabilidade técnica do Professor Marcelo Medeiros, relatório este já detalhado nos capítulos 3 e 4 deste trabalho.

Relatório de ensaios – Carbonatação, permeabilidade ao ar e velocidade de ultrassom

Autor Marcelo Medeiros

Este relatório registra os procedimentos e resultados desenvolvidos para dar suporte ao trabalho de final de curso de especialização dos alunos Gisele Neris, Rennan e Cláudio.

A seguir faz-se a apresentação de cada ensaio realizado.

1. VELOCIDADE DE ULTRASSOM

1.1 Procedimento do ensaio

As leituras foram realizadas com auxílio do equipamento Ultrasonic Pulse Velocity - Pundit Lab do fabricante Proceq, com os dois transdutores sendo um o emissor e o outro o receptor das ondas. O equipamento foi configurado com frequência de transmissão/recepção de 54 kHz, usando os transdutores de 50 mm de diâmetro.

As leituras foram conduzidas em acordo com a NBR 8802/2013 empregando o método de transmissão direta como ilustra a Figura 1. Antes de cada leitura, foi efetuada a limpeza da superfície. Em seguida, foi utilizado o gel de acoplamento indicado pelo fabricante para produzir o contato adequado entre os transdutores e as superfícies do concreto. Para centralizar os transdutores foi utilizado o aparado metálico indicado na Figura 1, assim como proposto no trabalho de Godinho et al. (2020).



Figura 1 - Esquema do posicionamento dos transdutores para as medidas de velocidade de ultrassom nos corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm (GODINHO et al. 2020).

Os dados obtidos foram usados como parâmetros de caracterização dos concretos e interpretados com base na Tabela 1, que apresenta faixas de valores e suas respectivas classificações quanto a qualidade do concreto.

Tabela 1 – Classificação relacionando a velocidade de ultrassom à qualidade do concreto (Rincon et al., 1998).

VELOCIDADE DE ONDA ULTRA-SÔNICA (m/s)	QUALIDADE DO CONCRETO
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Ótimo
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V < 2000$	Ruim

1.2 Resultados de velocidade de ultrassom

A Figura 2 mostra os valores de velocidade de ultrassom para os concretos do estudo. Verifica-se que a resistência à compressão influenciou a velocidade de ultrassom, assim como esperado. Os concretos de 40 MPa se enquadraram como de qualidade excelente e os de 20 MPa na faixa de qualidade regular, de acordo com a Tabela 1. Além disso, o tipo de agregado não foi um fator de influência nos resultados, uma vez que os resultados são da mesma ordem de grandeza e classificação quanto a qualidade do concreto.

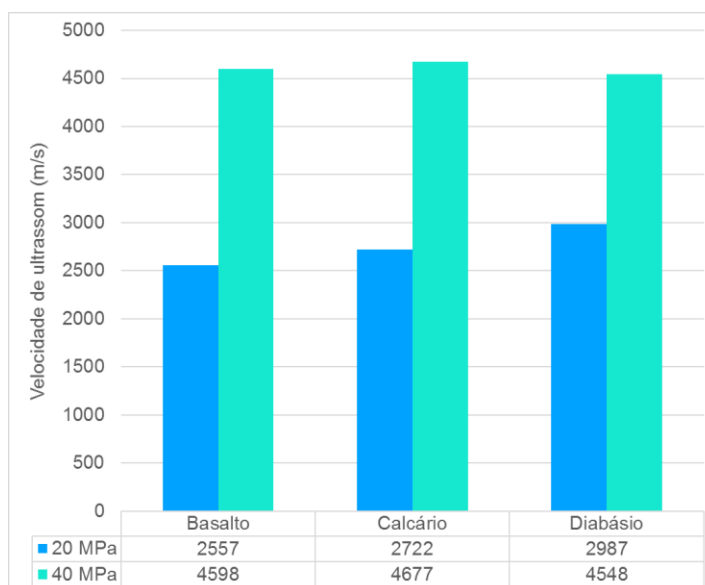


Figura 2 – Velocidade de ultrassom dos concretos do estudo para concretos de 20 MPa e 40 MPa.

2. CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

De acordo com Raisdorfer (2015), a maioria das estruturas executadas no Brasil é construída com o sistema estrutural em concreto armado, e pode-se dizer que os efeitos da carbonatação tem impacto sobre grande parte das obras da sociedade, sejam pontes, prédios, barragens, entre outras. Desse modo, quantificar os efeitos desse fenômeno de degradação é primordial para entender e estabelecer sua durabilidade.

O processo de carbonatação começa na face externa da peça de concreto e por difusão do CO_2 , avança para o interior do concreto. A interface entre o concreto carbonatado e o não carbonatado é denominada frente de carbonatação assim como pode ser visto na Figura 3 (HELENE, 1993; HOPPE FILHO, 2008).

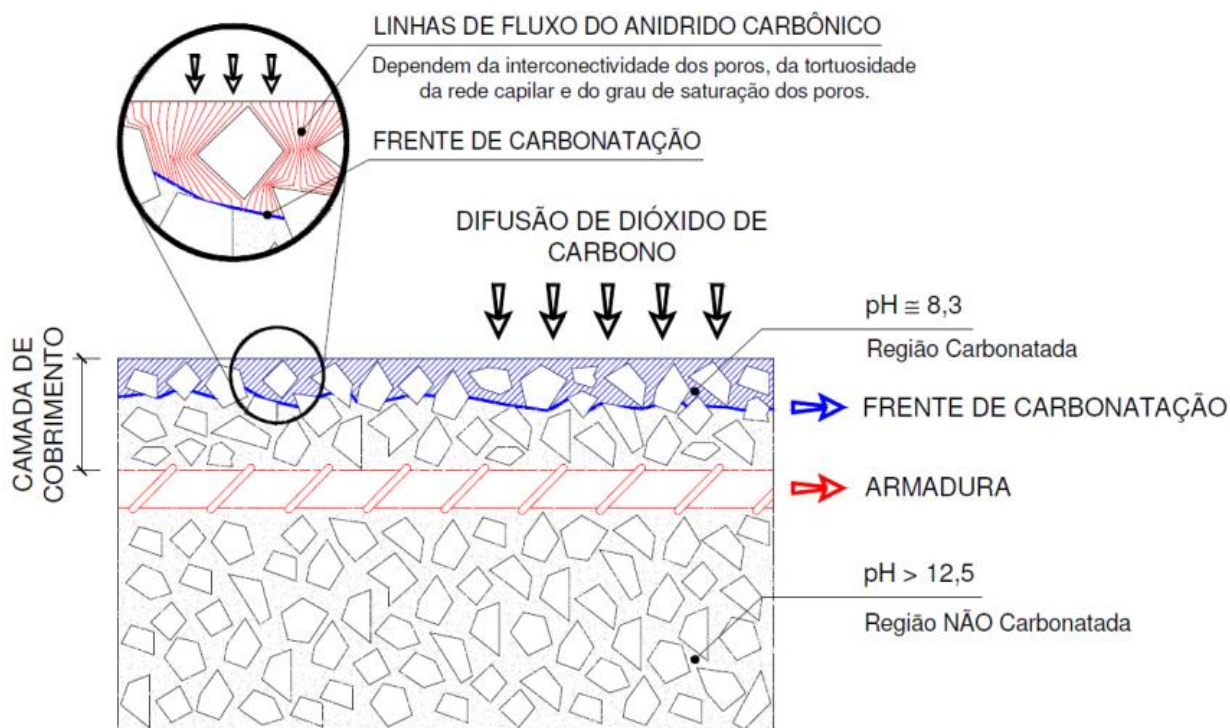


Figura 3 – Esquema do mecanismo de carbonatação (HOPPE FILHO, 2008 adaptado de MEDEIROS & HELENE 2001)

2.1 Procedimento do ensaio

A umidade interna do concreto tem grande importância na velocidade de avanço da frente de carbonatação. Assim, um processo de sazonalidade

incorreto pode modificar a velocidade de propagação da frente de carbonatação de maneira fora do padrão por haver regiões com umidades diferentes dentro do concreto, ou fazendo com que o excesso de umidade retarde o processo nas primeiras idades de carbonatação acelerada (RAISDORFER, 2015).

Por este motivo, antes de introduzir os corpos de prova na câmara de carbonatação, foi aplicado um processo de condicionamento em uma sala climatizada, com umidade relativa de $60 \pm 5\%$ e temperatura de 23 ± 3 °C. Os corpos de prova ficaram neste ambiente até que sua variação do peso foi menor que 0,10 g em 24 horas.

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado em uma câmara de carbonatação (Figura 4), com controle automatizado de teor de dióxido de carbono, umidade relativa e temperatura do ambiente interno. A câmara foi ajustada para ter concentração interna de CO_2 de $5 \pm 0,5\%$, umidade relativa de $65 \pm 1,0\%$, temperatura de 23 ± 1 °C.



Figura 4 – Câmara de carbonatação do laboratório LAME/DCC/CESEC da UFPR.

A frente de carbonatação foi mensurada com aspersão de solução de fenolftaleína sobre as superfícies de concreto recém fraturadas de corpos de prova Ø10 x 20 cm. As leituras foram realizadas a partir da face externa em direção ao centro da circunferência, como ilustra a Figura 5. Para cada secção do corpo de prova recém fraturado foram realizadas seis leituras, uma a cada 60°.

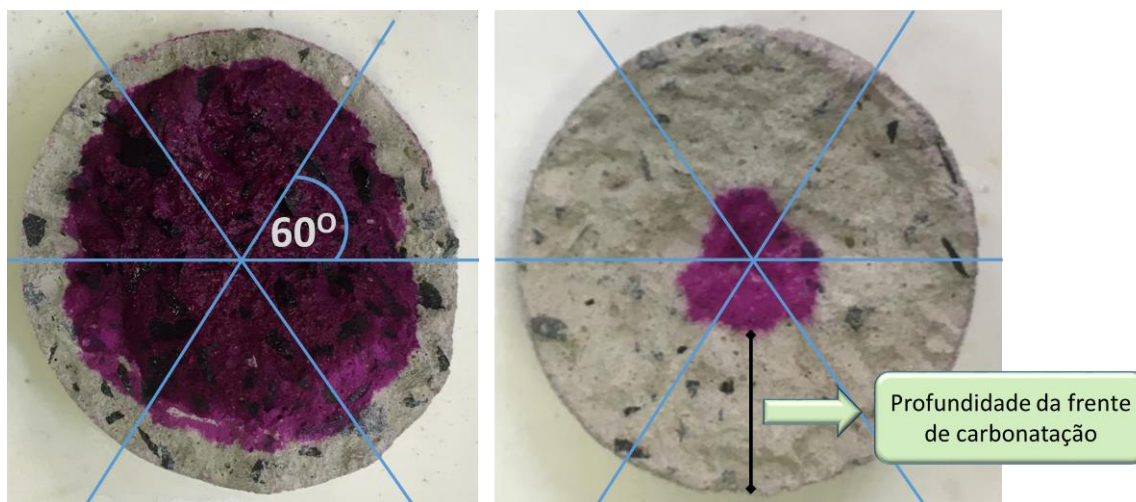


Figura 5 – Esquema das leituras realizadas nos corpos de prova deste estudo de carbonatação acelerada.

2.2 Resultados de carbonatação

A Figura 6 mostra a evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo para concretos de 20 MPa com 3 tipos de agregados, basalto, calcário e diabásio. Os resultados indicam que o concreto com calcário apresentou a maior velocidade de carbonatação, seguido de basalto e diabásio.

A Figura 7 mostra a variação da profundidade de carbonatação para os concretos de 40 MPa. Nota-se que neste caso de concreto de resistência mais elevada, dentro da faixa de concretos convencionais, a mudança de agregados não influenciou de forma considerável a velocidade de carbonatação.

Além disso, deve-se notar que a resistência do concreto influenciou sobremaneira a velocidade de carbonatação de modo que a total carbonatação

dos corpos de prova, ao longo de 3 meses de ensaio acelerado, não foi atingida no caso do concreto de 40 MPa.

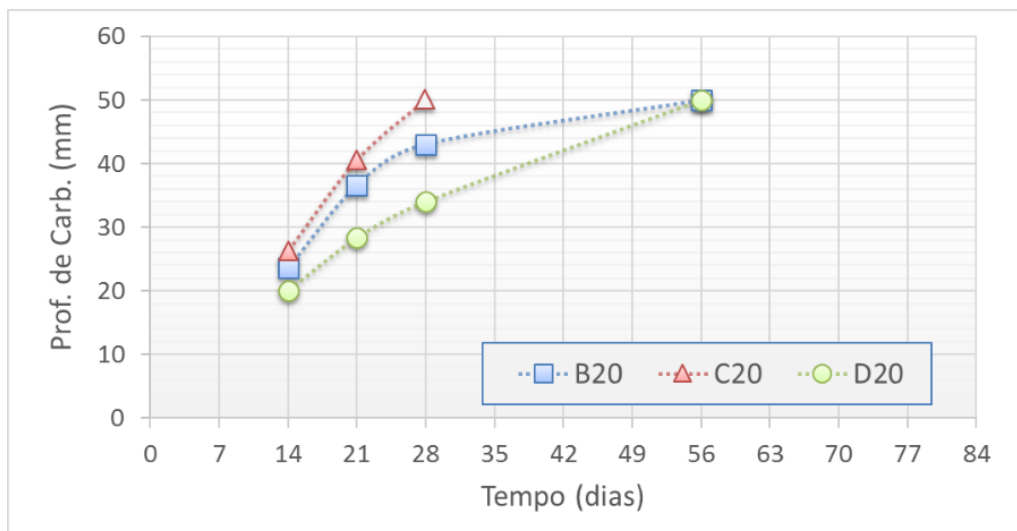


Figura 6 – Profundidade de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de 20 MPa (B = basalto, C = calcário, D = diabásio).

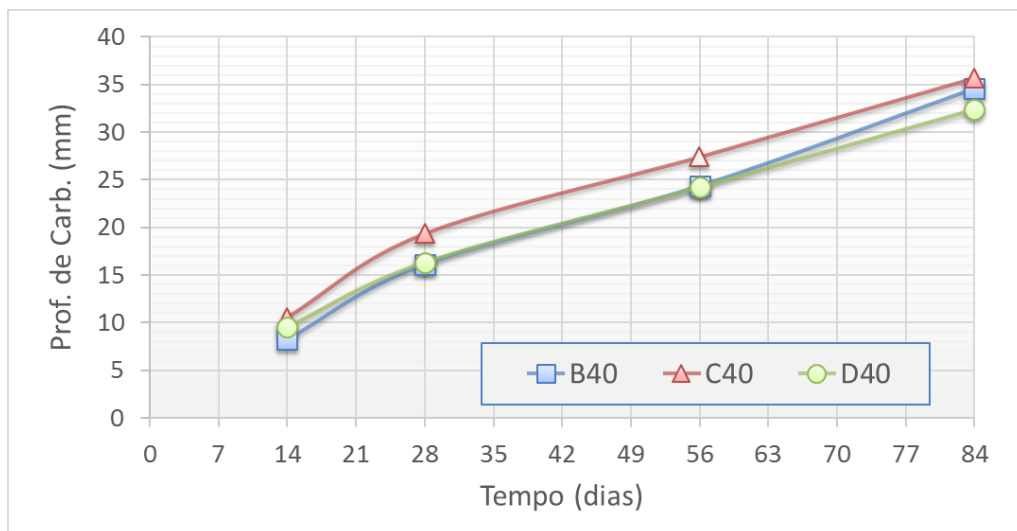


Figura 7 – Profundidade de carbonatação ao longo do tempo para os concretos de 40 MPa (B = basalto, C = calcário, D = diabásio).

3. PERMEABILIDADE AO AR

O método desenvolvido por Torrent e Frenzer (1995) consiste no uso de uma câmara de célula dupla, onde se produz uma pressão negativa sob a

superfície do material com o auxílio de uma bomba a vácuo, como ilustra a Figura 8. A partir da aplicação deste método não destrutivo, se obtém dados do coeficiente de permeabilidade do concreto (k_T) (SENTONE, 2011).

Torrent e Frenzer (1995) propuseram a Tabela 2 para a avaliação da qualidade do concreto baseado nos resultados do k_T no método da permeabilidade ao ar. Esta mesma classificação também foi usada no trabalho de Adámek e Juránková (2010).

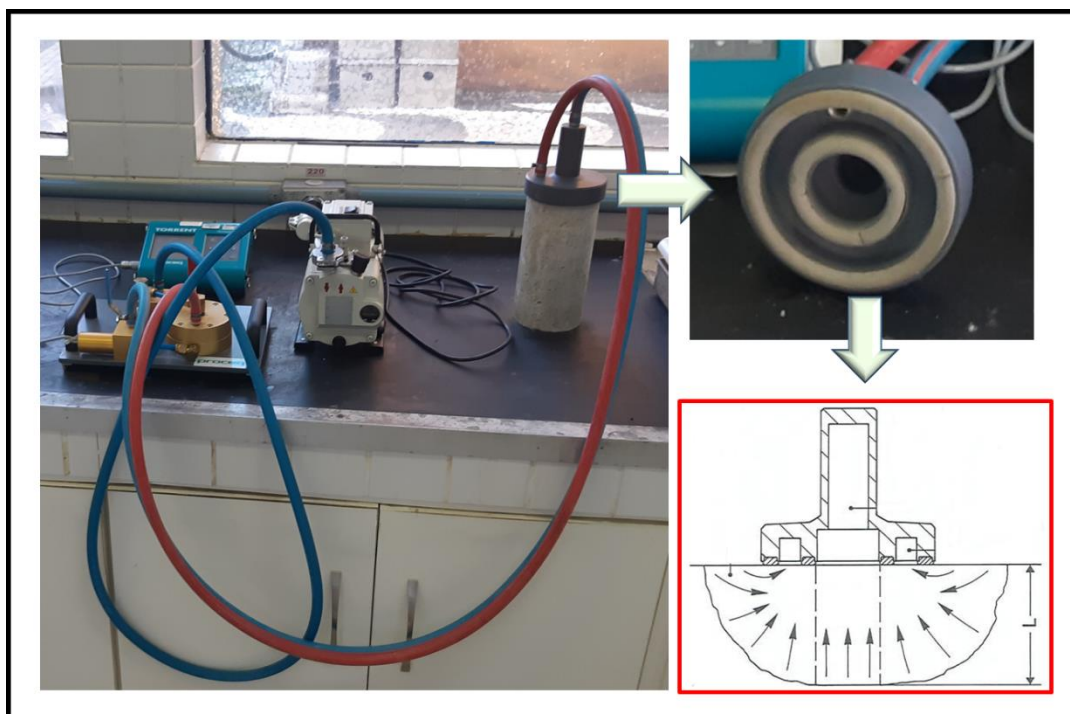


Figura 8 - Ilustração do equipamento utilizado na leitura de k_T pelo método de Torrent.

Tabela 2 - Qualidade de concretos pelo Método Torrent (TORRENT E FRENZER, 1995).

QUALIDADE DE COBERTURA DO CONCRETO	ÍNDICE	k_T (10^{-16} m^2)
Muito ruim	5	> 10
Ruim	4	1,0 – 10
Normal	3	0,1 – 1,0
Bom	2	0,01 – 0,1
Muito bom	1	$< 0,01$

3.1 Procedimento do ensaio

Um equipamento Torrent da marca Proceq foi usado para a realização das medições de permeabilidade. As medidas foram efetuadas nas condições ambientais de laboratório de 23 ± 3 °C e em umidade relativa de UR $70 \pm 5\%$.

3.2 Resultados de permeabilidade ao ar

A Figura 9 mostra os valores de permeabilidade ao ar pelo método Torrent para os concretos com 20 e 40 MPa usados neste trabalho de pesquisa. Mais uma vez, ficou evidente que os concretos com maior resistência à compressão são muito menos permeáveis, sendo este um indicativo que estes concretos absorvem menos água e deve resultar em maior durabilidade na maioria das aplicações.

Também é possível notar que o processo de carbonatação reduziu a permeabilidade ao ar de todos os concretos. Isso ocorreu porque o processo de carbonatação colmata poros como relatado por Medeiros e Helene (2001), gerando obstrução e dificultando a penetração de ar no ensaio.

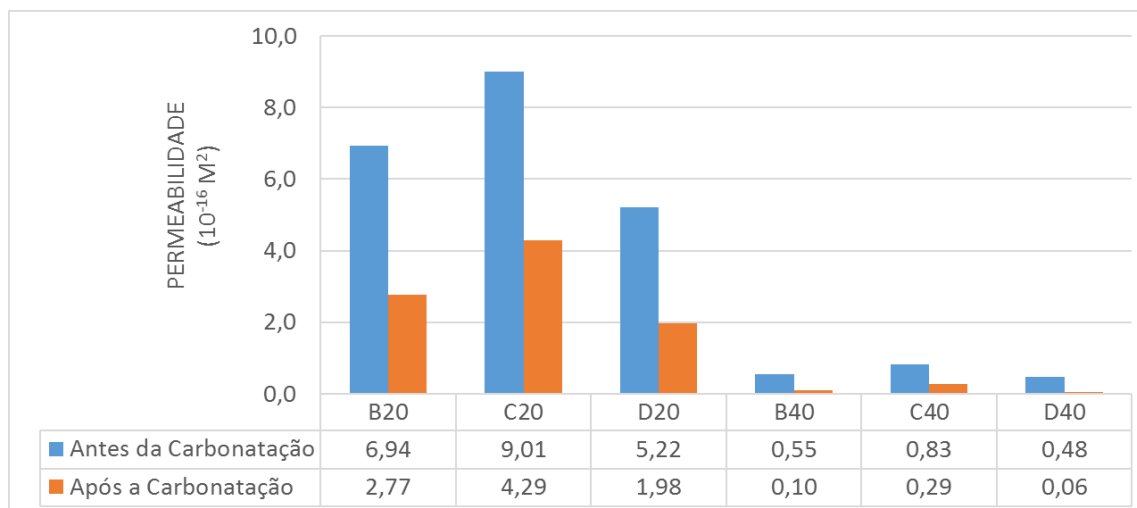


Figura 9 – Permeabilidade ao ar pelo método Torrent para os concretos de 20 MPa e 40 MPa (B = basalto, C = calcário, D = diabásio).



4. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ADÁMEK, J.; JURÁNKOVÁ, V. Evaluation of durability of concrete by measurement of permeability for air and water. In: Modern Building Materials, Structures and Techniques. Proceedings of the International Conference. Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, 2010. p. 1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 8802 - Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda," Rio de Janeiro/RJ, 2013.

GODINHO, J. P.; SOUZA JUNIOR, T. F.; MEDEIROS, M. H. F.; SILVA, M. S. A. Fatores de influência na velocidade de pulso ultrassônico no concreto. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais (RIEM), 2020. (NO PRELO)

HELENE, P. R. L.; **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** – (Tese de Livre Docência) Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto** – (Tese de doutorado) – Escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. R. L. Estudo da carbonatação em concretos e argamassas. Revista Engenharia, Ciência & Tecnologia, Vitória - Espírito Santo, v. 4, n. 4, p. 3-12, 2001.

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

RINCÓN, O. T.; CARRUYO, C. A.; HELENE, P.; Díaz, I. Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion en estructuras de hormigon armado, DURAR: Red Tematica XV. B Durabilidad de la Armadura– Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo, 1998.

SENTONE, D. T. Desenvolvimento de método para medida de permeabilidade superficial de superfície de revestimento de argamassa. Dissertação, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

TORRENT, R.; FRENZER, G. A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”. Internacional symposium non-



Universidade Federal do Paraná
Setor de Tecnologia
Centro de Estudos em Engenharia Civil
(CESEC)



destrutive testing in civil engineering, 1995.