

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA, ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DO PRECONDICIONAMENTO PARA O
ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA DO
CONCRETO**

MÔNICA ENGEL JUNGBLUT

D0222C19
GOIÂNIA
2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ **Dissertação** ☐ **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

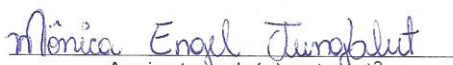
Nome completo do autor: Mônica Engel Jungblut

Título do trabalho: Estudo do condicionamento para o ensaio de carbonatação acelerada do concreto

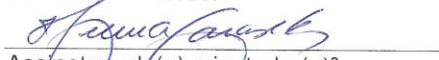
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento ☐ SIM ☒ NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 02 / 12 / 19

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ **Dissertação** [] **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Nome completo do autor: *Mônica Engel Jungblut*

Título do trabalho: *Estudo de pré-condicionamento para o ensaio de carbonatação acelerada do concreto.*

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento ☒ **SIM** [] **NÃO**¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

Mônica E. J.

Assinatura do (a) autor (a) ²

Data: *24 / 02 / 23*

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

² A assinatura deve ser escaneada.

MÔNICA ENGEL JUNGBLUT

ESTUDO DO PRECONDICIONAMENTO PARA O ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA DO CONCRETO

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para aprovação em Exame de Qualificação de mestrado.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof.^a Dr.^a Helena Carasek

Co-orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

D0222C19

GOIÂNIA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)
GPT/BC/UFG.

Jungblut, Mônica Engel.

Estudo do condicionamento para o ensaio de carbonatação acelerada do concreto [manuscrito] / Mônica Engel Jungblut. - 2019.
CX, 110 f.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Helena Carasek; Co-orientador: Oswaldo Cascudo

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2019.

Bibliografia. Apêndices.

Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas, tabelas, gráficos e fotografias.

1. concreto 2. durabilidade 3. carbonatação acelerada 4. condicionamento 5. metodologia I. Carasek, Helena, orient. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 222 da sessão de Defesa de Dissertação de **Mônica Engel Jungblut** que confere o título de Mestre(a) em **Geotecnia, Estruturas e Construção Civil**, na área de concentração em **Construção Civil**.

Ao/s **dezoito dias do mês de dezembro do ano de dois mil e dezenove**, a partir da(s) **08:30**, no(a) **sala de reuniões do LABITECC da Escola de Engenharia Civil e Ambiental**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**Estudo do condicionamento para o ensaio de carbonatação acelerada do concreto**”. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Professor(a) Doutor(a) **Helena Carasek Cascudo (GECON/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor(a) Doutor(a) **Andrielli Moraes de Oliveira (GECON/UFG)**, membro titular interno; Professor(a) Doutor(a) **Edna Possan (UNILA)**, membro titular externo, **cujas participações ocorreram através de videoconferência**. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação tendo sido(a) o(a) candidato(a) **aprovado(a)** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo(a) Professor(a) Doutor(a) Helena Carasek Cascudo, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **dezoito dias do mês de dezembro do ano de dois mil e dezenove**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Helena Carasek Cascudo, Diretora**, em 18/12/2019, às 11:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edna Possan, Usuário Externo**, em 18/12/2019, às 11:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andrielli Moraes de Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 18/12/2019, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **MÔNICA ENGEL JUNGBLUT, Discente**, em 19/12/2019, às 17:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Ângela e Antônio, por sempre me incentivarem, apoiarem e cuidarem de mim para que pudesse chegar até aqui e seguir minha trajetória. Ao meu companheiro Lucas que me inspira e me incentivou nessa trajetória, acompanhando minhas angústias durante o mestrado e me dando coragem para seguir.

À professora Helena Carasek pela oportunidade de aprender com ela e ser sua orientanda, por ter me acolhido e me ensinado para além do mestrado, me inspirando como ser humano e professora. Ao professor Oswaldo Cascudo também pela paciência e acolhimento, e pelos ensinamentos transmitidos.

Aos professores do PPGGECON que me inspiram e fizeram a diferença na minha formação como pesquisadora e pessoa.

Aos colegas e amigos nesse período do mestrado: Paulo, Sara, Hana, Ana Paula, Raquel, Nayara, Daniela. Sou grata pela oportunidade de tê-los conhecido, pois em cada momento que precisávamos estávamos juntos e nos ajudando no que era possível. Agradeço muito ao Paulo também pelos ensinamentos transmitidos que foram de suma importância para o desenvolvimento da minha pesquisa, e pela disponibilidade em ajudar.

Aos técnicos do Labitecc (UFG): Antônio, Vitor e Walter pela ajuda no desenvolvimento da pesquisa e pela amizade.

Às minhas amigas de longa data: Isana, Luciana e Ana Terra que me inspiram e me incentivam sempre, me ajudando tanto emocionalmente quanto no que precisava para passar por essa etapa.

À Furnas Centrais Elétrica S.A., sobretudo ao Alexandre, Elizabeth, Alfredo, André, Edson (Jeguinho), Edson (Mão de Onça), Aloísio, Alício, Gilberto, Renato e o corpo técnico que deram todo o suporte para a realização da pesquisa, principalmente na execução do programa experimental. Agradeço também pela atenção e carinho com que fui recebida lá.

Agradeço a todos que fizeram parte dessa minha trajetória no mestrado de forma direta ou indiretamente.

RESUMO

Os indicadores de durabilidade são parâmetros indispensáveis para avaliação e previsão da durabilidade do elemento e da estrutura como um todo e devem ser facilmente quantificáveis por meio de ensaios de laboratório. Porém, no Brasil ainda não há uma norma que padronize o ensaio de carbonatação acelerada e, portanto, os ensaios são realizados com base em normas internacionais ou em dados da literatura. O ensaio de carbonatação acelerada é utilizado para obter o indicador de durabilidade quanto à carbonatação. Uma das etapas importantes para o ensaio de carbonatação acelerada é o condicionamento, que deve ocorrer após a cura e antes do início da carbonatação acelerada e tem o objetivo de alcançar um grau de saturação apropriado do corpo de prova para que as reações de carbonatação ocorram de forma acelerada. Em virtude da falta de padronização e da variedade de metodologias encontradas na literatura para realização desta etapa, propôs-se estudar a influência de diferentes métodos de condicionamento nos resultados de carbonatação com vistas à proposição de metodologia. Para tal, foram moldados quatro tipos de concreto: sendo três sem adição mineral com relações a/c de 0,40; 0,55 e 0,70; e um com substituição de 10%, em massa de cimento, por metacaulim de relação a/c 0,55. Os concretos foram condicionados por meio de quatro métodos diferentes, seguindo as recomendações das normas ISO 1920-12 (2015), NF EN 13295 (2004), XP P 18-458 (2008) e RILEM TC 116-PDC (1999). Posteriormente foi realizado o ensaio de carbonatação acelerada com 3% de CO₂, 22°C e 65% de umidade relativa. Os resultados mostraram que o tipo de condicionamento influenciou significativamente na profundidade de carbonatação, sendo que, para os métodos das normas ISO 1920-12 (2015) e NF EN 13295 (2004) as profundidades medidas foram menores, enquanto que, para os métodos conforme as normas XP P 18-458 (2008) e RILEM TC 116-PDC (1999) foram maiores, considerando o mesmo tipo de concreto. Além disso, foi observado que os concretos com menores profundidades de carbonatação apresentavam maiores umidades superficiais no início do ensaio, sendo essa umidade reduzida ao final do ensaio, indicando que, para esses concretos, o equilíbrio entre umidade interna e umidade do ambiente ainda não havia sido estabelecido durante o condicionamento; isto exerceu influência significativa nos resultados de profundidade de carbonatação. Assim, o método de condicionamento mais simples e com menor influência da umidade interna no ensaio de carbonatação acelerada foi o da norma XP P 18-458 (2008).

Palavras-chave: Concreto; Durabilidade; Carbonatação Acelerada; Condicionamento; Metodologia.

ABSTRACT

Durability indicators are indispensable parameters for assessing and predicting the durability of the element and structure as a whole and must be easily quantifiable by laboratory testing. However, in Brazil there is not yet a standard to standardize the accelerated carbonation test and, therefore, the tests are performed based on international standards or literature data. The accelerated carbonation test is used to obtain the durability indicator for carbonation. One of the important steps for the accelerated carbonation test is preconditioning, which must occur after curing and prior to the onset of accelerated carbonation and aims to achieve an appropriate degree of saturation of the specimen so that the carbonation reactions can occur accelerated form. Due to the lack of standardization and the variety of methodologies found in the literature to perform this step, it was proposed to study the influence of different preconditioning methods on the carbonation results with a view to proposing a methodology. For this, four types of concrete were molded: three of them being without mineral addition, with water/binder of 0,40; 0,55 and 0,70; and one concrete with replacement of 10% by weight of cement with metakaolin with 0,55 water/binder. The concretes were preconditioned by four different methods, following the recommendations of the ISO 1920-12 (2015), NF EN 13295 (2004), XP P 18-458 (2008) e RILEM TC 116-PDC (1999). Subsequently, the accelerated carbonation test was performed with 3% of CO₂, 22°C and 65% of relative humidity. The results showed that the preconditioning type had a significant influence on the carbonation depths, and for the methods of ISO 1920-12 (2015) and NF EN 13295 (2004) the measured depths were smaller, while for the methods according to XP P 18-458 (2008) and RILEM TC 116-PDC (1999) were higher, considering the same type of concrete. In addition, it was observed that concretes with lower carbonation depths presented higher surface humidity at the beginning of the test, and this humidity was reduced at the end of the test, indicating that, for these concretes, the balance between internal humidity and ambient humidity had not yet been established during preconditioning ; this had a significant influence on the carbonation depth results. Thus, the simplest preconditioning method with the least influence of internal humidity in the accelerated carbonation test was XP P 18-458 (2008).

Key words: Concrete; Durability; Accelerated Carbonation; Preconditioning; Methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fatores intervenientes na carbonatação do concreto (CASCUDO; CARASEK, 2011).....	22
Figura 2.2 – Profundidade de carbonatação do G30 com diferentes níveis de concentração de CO ₂ em diferentes idades de ensaio (CUI <i>et al.</i> , 2015)	32
Figura 2.3 – Comparação dos resultados entre o ensaio acelerado e o armazenamento em laboratório a longo prazo. As amostras foram curadas durante 7 dias (HO; LEWIS, 1987) .32	
Figura 2.4 – Teores de CO ₂ adotados nas pesquisas da revisão da literatura	33
Figura 2.5 – Teores de CO ₂ mais utilizados pelos autores da revisão da literatura	33
Figura 2.6 – Umidade relativa adotada nas pesquisas da revisão da literatura	34
Figura 2.7 – Umidades relativas mais utilizadas pelos autores da revisão da literatura	34
Figura 2.8 – Temperatura adotada nas pesquisas da revisão da literatura.....	35
Figura 2.9 – Temperaturas mais utilizadas pelos autores da revisão da literatura	35
Figura 2.10 – Relação entre as profundidades de carbonatação em corpos de prova cilíndricos x prismáticos (CARASEK <i>et al.</i> – em fase de elaboração)	36
Figura 2.11 – Tipo de forma empregado nas pesquisas da revisão da literatura.....	36
Figura 2.12 – Profundidades de carbonatação 1D, 2D e 3D (CHEN <i>et al.</i> , 2008)	43
Figura 2.13 – Identificação das faces dos corpos de prova	44
Figura 2.14 – Principais indicadores de pH usados no estudo de carbonatação do concreto (adaptado de CASTRO, 2003).....	47
Figura 2.15 – Correlação entre as profundidades medidas com o uso dos indicadores de pH, fenolftaleína e amarelo de alizarina GG (CASTRO, 2003)	48
Figura 2.16 – Relação entre a profundidades de carbonatação determinada pelos indicadores fenolftaleína e timolftaleína, em ensaio de carbonatação natural (KAZMIERCZAK; LINDENMEYER, 1996) e acelerado (CARASEK <i>et al.</i> – em fase de elaboração)	48
Figura 2.17 – Correlação entre as profundidades medidas com o uso de ruptura manual e corte refrigerado (FERREIRA, 2013) - adaptada pelo autor	49
Figura 2.18 – Correlação entre as profundidades de carbonatação medidas com o indicador aplicado com spray e com pincel (FERREIRA, 2013) - adaptada pelo autor	50
Figura 3.1 – Fluxograma geral da pesquisa	53

Figura 3.2 – Moldagem dos corpos de prova para os ensaios de caracterização e carbonatação acelerada	57
Figura 3.3 – Medida da umidade superficial dos concretos.....	60
Figura 3.4 – Fluxograma dos tipos de acondicionamento	64
Figura 3.5 – Posicionamento dos CP's na câmara de carbonatação.....	65
Figura 3.6 – Materiais utilizados para a) preparo da fenolftaleína e b) materiais para medida da profundidade de carbonatação	66
Figura 3.7 – Exemplo da localização dos pontos de medida de profundidade de carbonatação em uma face	66
Figura 3.8 – “Campos de visão” marcados em uma face de cada corpo de prova a) EN/ISO56 e b) XP56	68
Figura 4.1 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação – análise global do efeito da dosagem	71
Figura 4.2 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação – análise global do efeito do tempo de exposição.....	72
Figura 4.3 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação – análise global do efeito do acondicionamento.....	73
Figura 4.4 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação – análise global do efeito do acondicionamento por tipo de concreto	74
Figura 4.5 – Análise na Lupa Estereoscópica – XP56.....	76
Figura 4.6 – Gráfico da correlação entre a perda de umidade superficial (%) e perda de massa (%) durante os procedimentos de acondicionamento	78
Figura 4.7 – Gráfico da profundidade de carbonatação (em barras) e umidade superficial (em linhas) dos concretos a) 40R, b) 70R, c) 55R e d) 55MK	80
Figura 4.8 – Relação entre profundidade de carbonatação e umidade superficial dos concretos a) 40R, b) 70R, c) 55R e d) 55MK.....	81

Figura 4.9 – Aplicação da fenolftaleína e análise do tempo para realização das medidas. .	83
Figura B.1 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo	101
Figura B.2 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	101
Figura B.3 – Comparação múltipla de médias da resistência à compressão aos 28 dias de idade	102
Figura B.4 – Comparação múltipla de médias do módulo de elasticidade aos 28 dias de idade	104
Figura B.5 – Comparação múltipla de médias do coeficiente de Poisson.....	105
Figura C.1 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação obtidas com cinco e com duas medidas no concreto 70MK – condicionamentos a) ISO28, b) EN56, c) XP56 e d) RILEM56	107
Figura C.2 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação obtidas com cinco e com duas medidas no concreto 40MK – condicionamentos a) ISO28, b) EN56, c) XP56 e d) RILEM56.....	108
Figura D.1 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação dos condicionamentos EN56 e ISO56 – análise global	110
Figura E.1 – Correlação entre medidas de umidade superficial nas faces lateral e fundo dos corpos de prova.....	112
Figura E.2 – Correlação entre medidas de umidade superficial nas faces lateral e de acabamento dos corpos de prova.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo das variáveis de ensaio adotadas pelos diversos autores	23
Tabela 2.2 – Tipos de condicionamentos empregados nas pesquisas da revisão da literatura	39
Tabela 2.3 – Resumo das variáveis de ensaio adotadas pelas normas internacionais	45
Tabela 3.1 – Caracterização do agregado miúdo	55
Tabela 3.2 – Caracterização do agregado graúdo.....	55
Tabela 3.3 – Caracterização do cimento.....	56
Tabela 3.4 – Propriedades físicas e químicas do metacaulim	56
Tabela 3.5 – Composição dos concretos do estudo.....	58
Tabela 3.6 – Quantidade de CP's moldados por traço e tipo de condicionamento	58
Tabela 3.7 – Código adotado para identificação dos corpos de prova de acordo com o tipo de condicionamento e tempo de cura	59
Tabela 3.8 – Resumo dos resultados de caracterização mecânica dos concretos aos 28 dias de idade.....	59
Tabela 4.1 – Resultado da análise de variância realizado com as profundidades de carbonatação de todos os concretos e condicionamentos, considerando todas as idades de medida.....	70
Tabela 4.2 – Média dos coeficientes de variação das medidas de profundidade de carbonatação	75
Tabela 4.3 – Resultado da medida de massa no início e fim da etapa de condicionamento	77
Tabela 4.4 – Resultado da medida de umidade superficial no início e fim da etapa de condicionamento.....	77
Tabela 4.5 – Tabela com as equações das retas obtidas com os dados da perda de umidade superficial (%) x perda de massa (%).....	78
Tabela 4.6 – Tabela com as equações das retas para cada traço e condicionamento e seus respectivos R^2	82
Tabela 4.7 – Resumo da metodologia abordada por cada método de condicionamento	

.....	84
Tabela 4.8 – Vantagens e desvantagens dos métodos de condicionamentos realizados ..	85
Tabela B.1 – Resultado da análise de variância realizado com a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade	102
Tabela B.2 – Resultado da análise de variância realizado com o módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias de idade	103
Tabela B.3 – Resultado da análise de variância realizado com o coeficiente de Poisson dos concretos aos 28 dias de idade	104
Tabela D.1 – Análise de variância dos concretos condicionados pelo método EN56 e ISO56, considerando todos os traços	110
Tabela F.1 – Resultados individuais de resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade	114
Tabela F.2 – Resultados individuais de módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias de idade	114
Tabela F.3 – Resultados individuais de coeficiente de Poisson	114
Tabela F.4 – Resultados individuais de profundidade de carbonatação com 14 dias de exposição.....	114
Tabela F.5 – Resultados individuais de profundidade de carbonatação com 28 dias de exposição.....	115
Tabela F.6 – Resultados individuais de profundidade de carbonatação com 42 dias de exposição.....	116
Tabela F.7 – Resultados individuais de umidade superficial durante condicionamento	118
Tabela F.8 – Resultados individuais de umidade superficial obtidas durante as leituras de profundidade de carbonatação	119

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a/lig – água/ligante

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AFNOR - *Association Française de Normalisation*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANOVA – Análise de variância

CP's - Corpos de prova

CaCO₃ – Carbonato de cálcio

CH - Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio ou Portlandita

CO₂ - Dióxido de carbono

C-S-H – xCaO.SiO₂.yH₂O - Silicato de cálcio hidratado

CP II-F-40 – Cimento Portland Composto, com fíler, classe 40

DRX – Difractometria de Raios X

FTIR - Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier

ISO – *International Organization for Standardization*

JCR – *Journal Citation Reports*

m³ - Metro cúbico

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

MK - Metacaulim

NBR – Norma Brasileira Registrada

NORIE - Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

PIM - Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

RILEM – *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*

T - Temperatura

TG – Termogravimetria

UFG – Universidade Federal de Goiás

UR – Umidade Relativa

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	13
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVO	21
CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1. ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA.....	22
2.1.1. Parâmetros do ensaio de carbonatação acelerada utilizados por diversos pesquisadores	23
2.1.2. Métodos normalizados de ensaio de carbonatação acelerada	45
2.2. FORMAS DE AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	46
2.2.1 Indicadores químicos de pH	46
2.2.2 Ensaios complementares	50
2.3. DISCUSSÃO GERAL SOBRE A REVISÃO DA LITERATURA.....	51
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1. VARIÁVEIS ESTUDADAS.....	53
3.2. MATERIAIS.....	54
3.2.1 Dosagem.....	56
3.2.2 Caracterização dos concretos estudados	59
3.3 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO.....	60
3.3.3 Análise Estatística.....	67
3.3.4 Análise na Lupa Estereoscópica	67

CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1 CARBONATAÇÃO ACELERADA	69
4.1.1 Análise Estatística	69
4.1.2 Influência da Dosagem.....	70
4.1.3 Influência do Tempo de Exposição	71
4.1.4 Influência dos Tipos de Condicionamento	72
4.1.5 Umidade Superficial e massa dos corpos de prova durante o condicionamento....	76
4.1.6 Correlação entre Umidade Superficial e profundidade de carbonatação –durante leituras de profundidade de carbonatação	79
4.1.7 Análise do tempo de espera entre aplicação do indicador de pH e medida de profundidade de carbonatação	82
4.1.8 Discussão global sobre os métodos de condicionamentos	84
CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
5.1 CONCLUSÕES	87
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIAS	90
APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	100
B.1. AGREGADO MIÚDO	101
b.2 AGREGADO GRAÚDO.....	101
APÊNDICE C – DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE MEDIDAS DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	106
APÊNDICE D – ANOVA E TESTE DE DUNCAN PARA CONCRETOS PRECONDICIONADOS CONFORME ISO56 E EN56.....	109
APÊNDICE E – CORRELAÇÃO ENTRE AS MEDIDAS DE UMIDADE SUPERFICIAL OBTIDAS EM DIFERENTES FACES DO CORPO DE PROVA.	111
APÊNDICE F – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, MÓDULO	

DE ELASTICIDADE, COEFICIENTE DE POISSON, PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO,
UMIDADE SUPERFICIAL E ANÁLISES DE VARIÂNCIA. 113

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Esta pesquisa insere-se no contexto da durabilidade das estruturas de concreto armado, temática principal estudada pelo Grupo de Estudos em Durabilidade (GEDur) da Universidade Federal de Goiás e integraliza o projeto “Modelagem Matemática Computacional dos Sistemas Eólicos e Hidroelétricos com Avaliação da Durabilidade por meio de Modelos Preditivos de Vida Útil” realizado em parceria entre a UFG e Furnas/ANEEL.

As características físicas e químicas do concreto conferem-lhe propriedades importantes que levam à sua boa aceitação e uso em nível mundial. A combinação entre o concreto e o aço, caracterizando o concreto armado, permite um sistema que agrega propriedades mecânicas – como a resistência à compressão do concreto em conjunto com a resistência à tração do aço; e de durabilidade – como a resistência à corrosão devido à alta alcalinidade do concreto.

Contudo, a preocupação com a degradação precoce das estruturas de concreto armado, principalmente no que tange à corrosão das armaduras, tem levado à consecução de diversas pesquisas no âmbito da durabilidade; bem como à prescrição de normas que regulamentem a qualidade do concreto de acordo com as condições ambientais a que serão expostos, como a NBR 6118 (2014), com objetivo de garantir a durabilidade do concreto durante o período de vida útil da estrutura.

O desempenho de estruturas de concreto armado pode ser afetado por diversos mecanismos de degradação, que podem ser de origem física (ex.: a ação de gelo-degelo), mecânica (ex.: abrasão, erosão e cavitação) e química (ex.: ação de íons agressivos, como cloretos e CO_2) (NEVILLE; BROOKS, 2010). De maneira geral, o mecanismo de corrosão dá-se, basicamente, pela despassivação da fina película protetora das armaduras, composta por óxidos que protegem, por barreira, o aço do acesso à umidade, oxigênio e agentes agressivos (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Segundo Cascudo e Carasek (2011), o fenômeno da carbonatação consiste na reação entre o CO_2 , presente na atmosfera, e os álcalis presentes na solução do poro. Por meio do mecanismo de difusão e dissolução do gás carbônico, o CO_2 reage principalmente com o hidróxido de cálcio, dissolvido na solução do poro, produzindo CaCO_3 . Este fenômeno ocorre naturalmente devido à exposição do concreto à atmosfera e pode ser tanto prejudicial, quando se trata de concreto armado, quanto benéfico para o concreto maciço, sem uso de armação.

A carbonatação em elementos apenas de concreto melhora a resistência do material, contribui para a colmatação dos poros e ainda para o meio ambiente (POSSAN *et al.*, 2017). Diversos pesquisadores estudam o fenômeno da carbonatação no processo de “sequestro de carbono” com objetivo de fixar o CO₂ no concreto e assim, fechar o ciclo de vida da produção de cimento com redução na taxa de emissão de CO₂ (PADE; GUIMARAES, 2007; GALAN *et al.*, 2010; NEVES JÚNIOR *et al.*, 2019). Por outro lado, nas estruturas de concreto armado os compostos alcalinos da pasta de cimento são consumidos pela carbonatação, levando à redução do pH do poro, responsável pela manutenção da camada protetora do aço e, assim, ao atingir o nível das armaduras a carbonatação inicia o processo de corrosão.

Com o objetivo de compreender os fenômenos de degradação do concreto, os indicadores de durabilidade surgem como uma ferramenta capaz de possibilitar condições para tomada de decisões quanto à produção de concretos mais duráveis, sob a ótica da abordagem de desempenho. De acordo com Baroghel-Bouny, Cussigh e Rougeau (2014), os indicadores de durabilidade são parâmetros indispensáveis para avaliação e previsão da durabilidade do elemento e da estrutura como um todo e, para isso, devem ser facilmente quantificáveis a partir de ensaios de laboratório, com métodos bem definidos e reproduzíveis. A partir desses ensaios é possível classificar os concretos quanto à sua resistência aos fenômenos de degradação.

O coeficiente de carbonatação acelerada é considerado um indicador de durabilidade e pode ser obtido por meio de ensaio acelerado ou natural. Como a carbonatação natural ocorre de maneira lenta devido às baixas concentrações de gás carbônico presentes na atmosfera, o ensaio acelerado torna-se uma alternativa para avaliar os concretos frente ao fenômeno da carbonatação. Porém, existem divergências entre os parâmetros do ensaio acelerado que dificultam a comparação entre os resultados obtidos em diferentes pesquisas, sendo um dos principais fatores a realização ou não da etapa de condicionamento, seu tipo e duração (SILVA *et al.*, 2009).

Uma revisão da literatura, abordando a temática da carbonatação acelerada, realizada por Pauletti *et al.* (2007), aponta o condicionamento como sendo um dos aspectos que ainda necessita ser pesquisado. Alguns dos questionamentos a respeito desta etapa, segundo as autoras, são: Qual o melhor procedimento? Por quanto tempo? De que forma esse procedimento pode garantir o equilíbrio da umidade interna do corpo de prova, permitindo que a difusão do CO₂ ocorra de maneira uniforme?

No Brasil ainda não há uma norma que padronize o ensaio de carbonatação acelerada e, por isso, alguns autores utilizam normas internacionais (RILEM, 1988; NORDTEST METHOD,

1989; AFNOR, 2004; AFNOR, 2008; ISO, 2015) ou outras metodologias propostas na literatura. Contudo, ainda há divergências entre as normas com relação a parâmetros como: concentração de CO_2 ; a realização e o tipo de condicionamento; o formato dos corpos de prova e a realização ou não de uma selagem em algumas faces do corpo de prova antes da entrada na câmara de carbonatação.

Dessa forma, os estudos envolvendo os parâmetros de ensaio de carbonatação acelerada, que ainda geram dúvidas no meio acadêmico e que também são divergentes entre as normas internacionais de carbonatação acelerada, devem ser avaliados e pesquisados. Um desses parâmetros é a etapa de condicionamento enfocada nesta pesquisa, buscando entender qual a influência dos diferentes métodos de condicionamento no ensaio de carbonatação acelerada.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo geral analisar a influência de diferentes tipos de condicionamento dos corpos de prova de concreto nos resultados de carbonatação, com vistas à proposição de metodologia de ensaio de carbonatação acelerada.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar a influência do proporcionamento (traço) do concreto na difusão do CO_2 .
- Verificar a possibilidade de uso de equipamentos que medem a umidade superficial do concreto para estimação da umidade interna do corpo de prova;
- Analisar a influência do tempo de espera após aplicação da fenolftaleína na medida da profundidade de carbonatação e propor a melhor maneira de fazer as medidas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

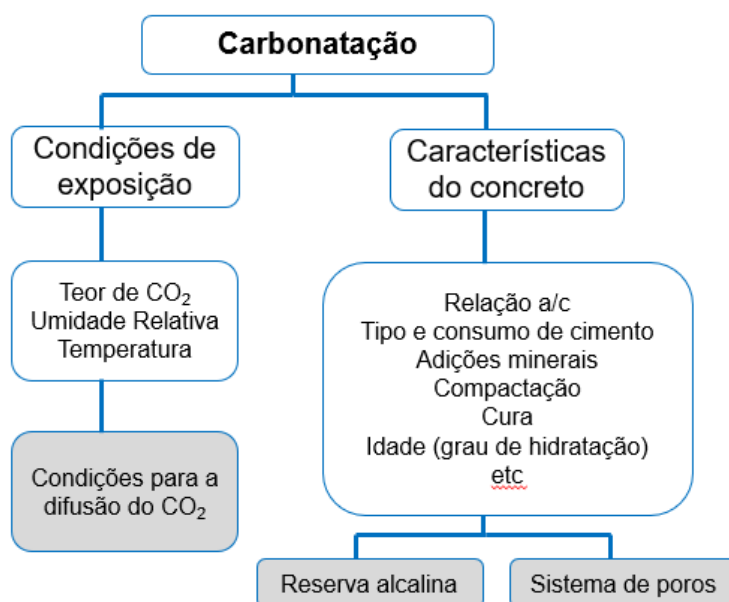
Neste capítulo é discutido, com base na revisão da bibliografia, o ensaio de carbonatação acelerada do concreto dando ênfase às variáveis necessárias para sua realização. Também são expostas as principais normas internacionais existentes sobre o tema.

2.1. ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

O ensaio de carbonatação acelerada, como o próprio nome sugere, consiste em expor o material (concreto ou argamassa) a condições de temperatura, umidade relativa e concentração de CO_2 de tal forma que acelere o processo de degradação para obter resultados da frente de carbonatação em um curto período.

Alguns fatores influenciam a velocidade e o mecanismo da carbonatação, a exemplo disso, os fatores de exposição, ou seja, as condições necessárias para a difusão do gás carbônico, que são: a concentração de CO_2 , a temperatura e umidade relativa do ambiente à qual a estrutura está inserida. Além das características do concreto, como a relação a/lig, a utilização de adições minerais, o tipo e consumo de cimento, as condições de cura entre outros, responsáveis principalmente pela porosidade e reserva alcalina do concreto, como ilustra a Figura 2.1 (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Figura 2.1 – Fatores intervenientes na carbonatação do concreto (CASCUDO; CARASEK, 2011)



2.1.1. Parâmetros do ensaio de carbonatação acelerada utilizados por diversos pesquisadores

A discussão dos tópicos deste capítulo tem como base a revisão da literatura onde foram levantados artigos, dissertações e teses, entre outras bibliografias que realizaram o ensaio de carbonatação acelerada. Como o foco desta pesquisa está nos parâmetros do ensaio acelerado, a revisão da literatura trata de maneira mais aprofundada estes parâmetros adotados pelos pesquisadores, apresentando a discussão realizada no estado da arte sobre tais parâmetros. Assim, os resultados de profundidade de carbonatação das diferentes pesquisas não podem ser comparados, visto a vasta diferença de traços de concreto e das variáveis adotadas pelos pesquisadores. A Tabela 2.1 apresenta um resumo das variáveis adotadas pelos autores, referente ao ensaio de carbonatação acelerada.

Tabela 2.1 – Resumo das variáveis de ensaio adotadas pelos diversos autores

Pesquisador	Ano	Forma/dim. dos CPs (mm)	Quant. de CPs	Norma ensaio	CO ₂ (%)	UR (%)	T (°C)	Precondiciona.?	Tempo de exposição
Ho; Lewis	1987	Prisma (75x75x300mm)	2	-	4±0,5	50	23	Sim	1, 4, 9 e 16 semanas
Papadakis; Vayenas; Fardis	1991	Prisma (100x100x300mm)	-	-	50	-	-	Não	1, 3, 5, 10, 15 e 20 dias
Ceukelaire; Nieuwenburg	1993	Cubo (100x100x100mm)	-	-	10	40, 50, 60, 70, 80 e 90	20	Não	21 dias
Chan; Dhir; Chang	1994	Cubo (100x100x100mm)	-	-	4	55	20	Não	em intervalos regulares por 20 semanas
Jones; Dhir; Magee	1997	Cubo (100x100x100mm)	-	-	4	50	20	Não	30 semanas
Roy; Poh; Northwood	1999	Prisma (80x80x300mm) e (100x100x500mm)	5	-	6	52, 64, 75, 84 e 92	-	Não	1, 4, 8 e 16 semanas
Papadakis	2000	Cilindro (100x200mm)	2	NT BUILD	3	61	25	Sim	100 dias

Pesquisador	Ano	Forma/dim. dos CPs (mm)	Quant. de CPs	Norma ensaio	CO ₂ (%)	UR (%)	T (°C)	Precond ici.?	Tempo de exposição
Cunha; Helene	2001	Prisma (279x152x114mm)	-	-	≈ 100%	65-70	-	Sim	2h e 4h, até despassivação das armaduras
Sanjuán; Olmo	2001	Cilindro (75x150mm)	-	-	5, 20 e 100%	70	-	Não	7 meses
Bauer; Nepomuceno; Pozzan	2002	Cilindro (50x100mm)	-	-	99,4	50	20	Sim	Até carbonatação total
Kulakowski	2002	Prisma (100x100x250mm) Prisma (40x40x160mm)	Conc.: 2. Argam.: 3	-	5	70±2	25±1	Sim	Concreto: 7, 28, 63 e 98. Argam.: 28, 63 e 98 dias
Lo; Lee	2002	Cilindro (100x200mm)	8	-	2	-	21	Não	30, 60, e 90 dias
Silva	2002	Cilindro (50x100mm)	4	-	≈ 97%	60±5	25±5	Não	7, 14, 28, 63 e 91 dias
Atis	2003	Cubo (50x50x50mm)	2	-	5	65±5	20	Não	2 semanas
Castro	2003	Prisma (120x300x75mm)	3	RILEM CPC-18	entre 5 e 6	65	28±1	Não	7, 21, 35, 49, 63, 77 e 91 dias
Kirchheim	2003	Prisma (60x60x180mm)	2	-	≈ 100%	70±5	25±2	Sim	Variável
Sanjuán; Andrade; Cheyrez	2003	Cilindro (75x150mm)	-	-	5 e 100	60	25±2	Não	1, 2 e 5 e 38 dias
Sulapha <i>et al.</i>	2003	Prisma (100x100x400mm)	2	RILEM CPC-18	6,5±0,2	65±1	30±0,5	Sim	14, 28, 42, 56, 72, 102, 132, 162, 192, 212, 252, 282, 312 e 342 dias

Pesquisador	Ano	Forma/dim. dos CPs (mm)	Quant. de CPs	Norma ensaio	CO ₂ (%)	UR (%)	T (°C)	Precond ici.?	Tempo de exposição
Abreu	2004	Prisma (100x100x60mm)	2	-	5 e >50	70±5 ¹	25±2	Sim	63 e 195 dias
Chang <i>et al.</i>	2004	Cilindro (100x50mm)	5	RILEM CPC-18	1 atm - 0,03%	50	23±1	Sim	1 atm - 7, 14, 21 e 28 dias.
Pauletti	2004	Prisma (40x40x160mm)	3	-	6 e ≥60	70±5	20±1	Sim	2; 7; 14; 21; 28; 42; 63; 91; 119; 168; 252 dias
Basheer; Basheer; Long	2005	Cilindro (100x100mm)	-	-	5±0,1	65±1	20±0,5	Sim	3 semanas
Vagheti	2005	Prisma (75x75x50mm)	1	RILEM CPC-18	10	75±2	23±2	Sim	4, 8, 12, 16, 20 e 21 semanas
Chang; Chen	2006	Cilindro (150x300mm)	-	-	20	70	23	Não	8 e 16 semanas
Khunthongkeaw; Tangtermsirikul; Leelawat	2006	Cubo (100x100x100mm)	-	RILEM CPC-18	4	55	40	Não	4 e 8 semanas
Song <i>et al.</i>	2006	Cilindro (100x200mm)	-	-	10	65±5	25±0,5	Sim	14, 28 e 42 dias
Villain; Thiery	2006	Cilindro (100x200mm) Prisma (70x70x140mm)	-	-	45±5	53±5	20±2	Sim	3, 7, 14, 28 e 56 dias
Gonen; Yazicioglu	2007	Cubo (100x100x100mm)	3	RILEM CPC-18	40	35, 55 e 80	-	Não	0,25; 1 e 3 dias
Kim; Lee; Moon	2007	-	-	KS F 2596	5	60	30	Não	7, 14, 28 e 56 dias

¹ Umidade Relativa e Temperatura medidas no ambiente em que a câmara estava instalada.

Pesquisador	Ano	Forma/dim. dos CPs (mm)	Quant. de CPs	Norma ensaio	CO ₂ (%)	UR (%)	T (°C)	Precond ici.?	Tempo de exposição
Sisomphon; Franke	2007	Cilindro (100x200mm)	1	-	3	65	20	Não	1, 4 e 9 semanas
Thiery <i>et al.</i>	2007	Cilindro (110x220mm e 32x80mm)	2	-	50±5	53±5	21±1	Sim	3, 7, 14 e 28 dias
Villain; Thiery; Platret	2007	Cilindro (110x220mm) Prisma (70x70x140mm)	2 (cili.) e 6 (pris.)	-	45±5	53±5	20±2	Sim	7, 14 e 28 dias
Barin	2008	Cilindro (100x200mm)	2	-	2	75±2	23±1	Sim	3, 6, 9 e 12 semanas
Cadore	2008	Cilindro (100x200mm)	3	RILEM CPC-18	5	75	22±2	Sim	3, 4, 6, 8, 9 e 12 semanas
Hoppe Filho	2008	Cilindro (80x150mm)	-	RILEM CPC-18	5	75±2	20±1	Sim	4, 8, 12, 16 e 20 semanas
Castellote; Fernandez;	2009	Cilindro (9x30mm)	3	-	3, 10 e 100	65	22	Não	103 dias
Kulakowski; Pereira; Dal Molin	2009	Prisma (100x100x300mm)	2	RILEM CPC-18	5	70±2	25±1	Sim	7, 28, 56 e 98 dias
McPolin; Basheer; Long	2009	Cilindro (60x100mm)	3	RILEM CPC-18	5±0,2	65±1	20±1	Sim	10 semanas
Bernal <i>et al.</i>	2010	Cubo (50,8x50,8x50,8mm)	2	-	3±0,2	65±5	20±2	Não	340 ou 540 horas
Vejmelková <i>et al.</i>	2010	Prisma (100x100x50mm)	3	-	65±5	85±5	-	Não	60 dias
Wolf	2010	Prisma (40x40x160mm)	3	EN 13295	1	65	23	Sim	28 e 91 dias
McPolin <i>et al.</i>	2011	Cubo (100x100x100mm)	8	-	5	55	20	Não	-

Pesquisador	Ano	Forma/dim. dos CPs (mm)	Quant. de CPs	Norma ensaio	CO ₂ (%)	UR (%)	T (°C)	Precond ici.?	Tempo de exposição
Werle; Kazmierczak; Kulakowski	2011	Prisma (60x60x180mm)	2	-	1	70±5	-	Sim	147 dias
Younsi <i>et al.</i>	2011	Cilindro (110x220mm)	-	XP P 18-458	50±5	65±5	20±2	Sim	7, 14, 21, 28, 42 e 120 dias
Bernal; Gutiérrez; Provis	2012	Cilindro de Ø 76,2mm	-	-	3±0,2	65±5	20±2	Não	250, 500, 750 e 1000 horas
Bernal <i>et al.</i>	2012	Cilindro (concreto - 76,2x152mm) Cubo pasta (pasta -50x50x50mm)	-	-	7 (concr eto) 1, 3 e 5 (pasta)	65 (concreto) 65±5 (pasta)	25 (concr eto) 23±2 (pasta)	Não	10 e 16 dias (concreto) e 7 dias (pasta)
Carrasco; Martín; Ramírez	2012	-	-	-	4	75	20	Não	14 e 90 dias
Zhang; Li	2012	Cubo (100x100x100mm)	-	GB 11974	20±3	70±5	20±5	Sim	24 dias
Aït-mokhtar <i>et al.</i>	2013	Cilindro (113x226mm)	4	XP P 18-458	50±5	65	20±2	Sim	28 dias
Duan <i>et al.</i>	2013	Prisma (100x100x400mm)	-	-	20±3	70±5	20±3	Sim	3, 28 e 180 dias
Frías; Goñi	2013	Prisma (10x10x60mm)	-	UNE- 112-011	100	65	20±1	Sim	30 dias
Gruyaert; Heede; Belie	2013	Cubo (100x100x100mm)	3	RILEM CPC-18	10	60	20	Não	2, 4, 8, 16 e 24 semanas
Perim	2013	Prisma (100x100x50mm)	2	-	6	75±2	20±1	Sim	1, 3, 6, 9, 12 e 16 semanas
Rabehi; Mezghiche; Guettala	2013	Cubo (100x100x100mm)	-	XP P 18-458	50	66	20±2	Não	180 dias

Pesquisador	Ano	Forma/dim. dos CPs (mm)	Quant. de CPs	Norma ensaio	CO ₂ (%)	UR (%)	T (°C)	Precond ici.?	Tempo de exposição
Rabehi; Mezghiche; Guettala	2013	Cubo (100x100x100mm)	-	XP P 18-458	50	66	20±2	Não	180 dias
Younsi <i>et al.</i>	2013	Cilindro (110x220mm)	-	XP P 18-458	50±5	65±5	20±2	Sim	7, 14, 21, 28, 42 e 123 dias
Zhang; Li	2013	Cubo (100x100x100mm)	15	GB 11974	20±3	70±5	20±5	Sim	24 dias
Dong <i>et al.</i>	2014	Prisma (40x40x160mm)	24	GB 50082	20	65-70	29-31	Sim	3, 14, 21, 28, 36, 60, 90, 120 e 150 dias
Duprat; Vu; Sellier	2014	Cilindro (100x50mm)	-	-	50% da pressão atm	65±5	20±0,5	Sim	5, 7 e 10 dias
Nicolas; Cyr; Escadeillas	2014	Prisma (70x70x280mm)	-	AFGC-AFREM ²	50	65	20	Não	28 dias
Tian <i>et al.</i>	2014	Prisma (100x100x400mm)	2	GB 50082	20±3	70±5	20±5	Sim	7, 14, 21, 28, 42, 60, 75 e 90 dias
Turcry <i>et al.</i>	2014	Cilindro (110x220mm)	2	XP P 18-458	50±5	65±5	20±2	Sim	0,5; 1; 3; 5; 7; 14; 21; 28 e 42 dias
Wan <i>et al.</i>	2014	Prisma (40x40x100mm)	-	-	20	70±5	20±2	Sim	7 e 14 dias
Bernal; Provis; Gutiérrez; Deventer	2015	Cilindro (76,2x152,4mm)	2	-	1±0,2 e 3±0,2	50±5, 65±5, 80±5	25±2	Não	250, 500, 750 e 1000 h
Cui <i>et al.</i>	2015	Cubos (100x100x100mm)	15	GB 50082	2, 10, 20, 50 e 100	70	20	Não	7, 14, 28 e 56 dias

² Relatório técnico - AFPC-AFREM. Compte-rendu des journées techniques - Durabilité des bétons. Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité Toulouse: Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions; 1997.

Pesquisador	Ano	Forma/dim. dos CPs (mm)	Quant. de CPs	Norma ensaio	CO ₂ (%)	UR (%)	T (°C)	Precondici.?	Tempo de exposição
Dong <i>et al.</i>	2015	Prisma (40x40x160mm)	24	GB 50082 e GB 11969	20	29-31	65-70	Sim	7, 14, 21, 28, 36, 60, 90 e 120 dias
Grist <i>et al.</i>	2015	Prisma (100x100x400mm)	1	EN DD CENTS 12390-10	4	60	20	Não	14, 28, 42, 56, 70, 84 e 98 dias
Leemann; Nygaard; Kaufmann; Loser	2015	Prisma (40x40x160mm) cubo (150x150x150mm)	3	-	1 e 4	57	20	Sim	7, 35 e 91 dias
Morandea; Thiéry; Dangla	2015	Cilindro (70x60mm)	2	-	10	63±5	25±0,5	Sim	1, 2, 4, 8 e 16 semanas
Neves <i>et al.</i>	2015	Cilindro (150x50mm)	-	E 391	5	65	20	Não	Intervalos regulares de 3 a 242 dias
Salvoldi; Beushausen; Alexander	2015	Prisma (100x90x85mm)	4	FIB Bulletin 34 ³	2±0,1	65±5	20±2	Sim	3, 6, 9 e 12 semanas
Cheng <i>et al.</i>	2016	Prisma (300x150x150mm)	-	GB 50082	20±2	70±5	20±2	Sim	10 e 20 dias
Shi <i>et al.</i>	2016	Prisma (40x40x160mm)	-	-	1	57±1	20	Não	7, 14, 21, 28, 56, 91 e 280 dias
Ahmed; Benharzallah	2017	Cubos (100x100x100mm)	4	XP P 18-458	50	65	20	Sim	7, 14 e 28 dias
Cheng <i>et al.</i>	2017	Cubos (100x100x100mm)	-	GB 50082	20±2	65±5	20±3	Não	3, 7, 14 e 28 dias
Dérobot; Villain	2017	Cilindro (700x750mm)	2	-	50	50	20	Sim	30, 60 e 90 dias

³ Federation International du Beton. fib Bulletin 34: model code for service life design; 2007

Pesquisador	Ano	Forma/dim. dos CPs (mm)	Quant. de CPs	Norma ensaio	CO ₂ (%)	UR (%)	T (°C)	Precond ici.?	Tempo de exposição
Ghantous <i>et al.</i>	2017	Prisma (70x70x280mm)	-	XP P 18-458	3 e 50	55	25	Sim	3, 7, 14, 21, 30, 49, 60 e 90 dias
Qiu <i>et al.</i>	2017	Prisma (40x40x160mm)	3	GB 50082	20	29-31	65-70	Sim	3, 7, 14, 36, 60, 90 e 120 dias
Wang <i>et al.</i>	2017	Prisma (500x500x80mm)	2	-	5±0,1	65±2	20±1	Sim	1, 2 e 3 meses
Mikhailenko <i>et al.</i>	2018	Cilindro (30x100mm)	-	AFGC–AFREM	50	65	-	Sim	42 dias ou até carbonatação total das pastas
Miranda	2018	Prismático (100X100X400)	2	ISO 1920-12	3±0,5	65±5	27±2	Sim	56, 63 e 70 dias
Yue <i>et al.</i>	2018	Cilindro (50x80mm)	-	-	5±0,5	60±5	20±1	Sim	6 semanas

2.1.1.1. Concentração de CO₂

As diferentes concentrações de CO₂ podem provocar alterações no mecanismo de transporte do gás no concreto, bem como alterar sua microestrutura de tal maneira que não represente as condições reais a qual o concreto é submetido em condições de serviço. Assim, para um ensaio acelerado ter validade, é necessário que ele reproduza as condições naturais em um período reduzido, sem alterar a qualidade do produto formado (ANDRADE, 1992⁴ *apud* WOLF, 2010).

Alguns autores estudaram, especificamente, a influência dos diferentes teores de CO₂ no fenômeno da carbonatação. Auroy *et al.* (2018) analisaram a microestrutura e os compostos formados a partir do ensaio acelerado (3% de CO₂) comparando com o ensaio natural e concluíram que um teor de gás carbônico de 3% é representativo da carbonatação natural a longo prazo.

Similar ao trabalho anteriormente referido, Castellote *et al.* (2009) realizaram análises químicas por meio de técnicas como Difractometria de Raios X, Termogravimetria e

⁴ ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992.

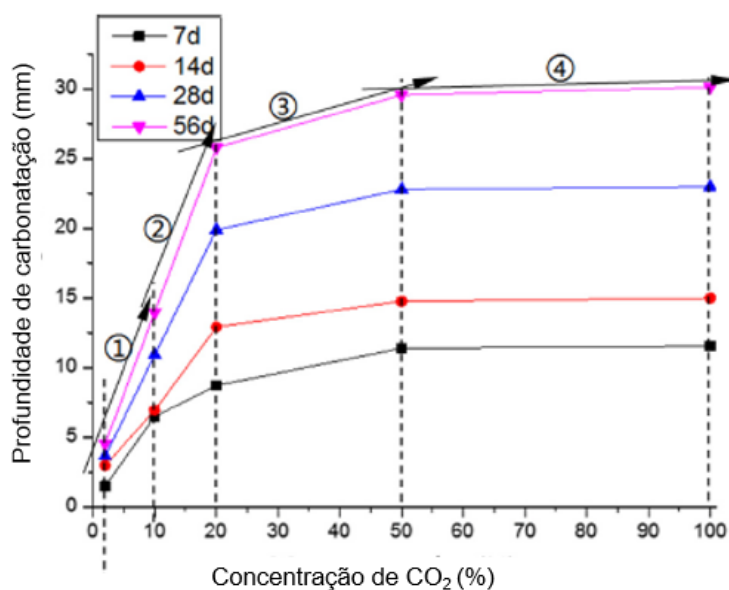
Ressonância Magnética Nuclear, comparando amostras sujeitas à carbonatação acelerada nos teores de 3%, 10% e 100% com amostras sujeitas à carbonatação natural. Os autores concluem que até teores de 3% a microestrutura não é alterada drasticamente, o que não é o caso para teores mais elevados de CO_2 .

Pauletti (2004) avaliando duas concentrações diferentes de CO_2 – 6% e superior a 60% - encontrou resultados de profundidades de carbonatação 2 vezes maiores quando as amostras foram submetidas a 6% do que as amostras submetidas acima de 60% de CO_2 . Além disso, a autora conclui que as amostras expostas a 6% de CO_2 apresentaram uma frente de carbonatação mais definida, com maior facilidade de medição.

A utilização de teores muito elevados de gás carbônico pode levar a alterações no mecanismo físico-químico da carbonatação, proporcionando a ocorrência de bicarbonato de cálcio ou a intensa decomposição do C-S-H (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Em discordância com essa afirmação, ao avaliar o comportamento dos concretos frente aos teores 1, 5, 20, 50, 70 e 100% de CO_2 , Rougeau (1997) sugere a utilização de 50% de CO_2 visto que o coeficiente de carbonatação foi menor para teores próximos a 100% e muito instável às pequenas variações de teores abaixo que 5%.

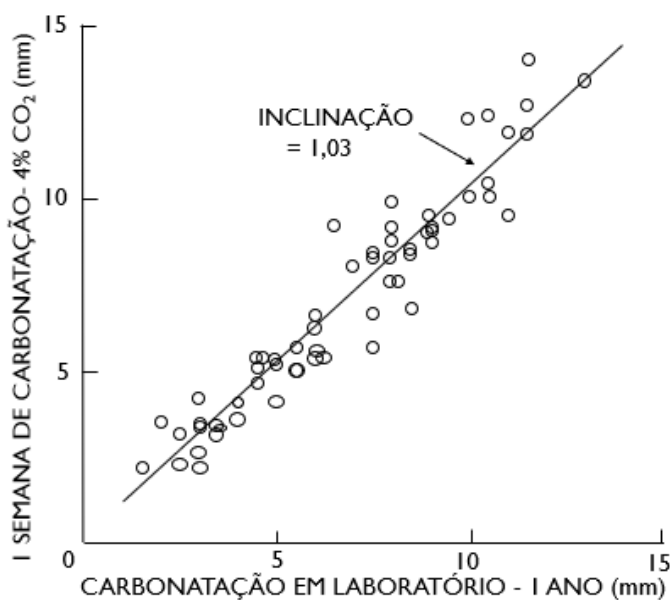
Sanjuán e Olmo (2001), analisando a carbonatação em concretos sob diferentes concentrações de dióxido de carbono (5%, 20% e 100%), encontraram cristais de carbonato de cálcio (CaCO_3) menores, quando submetidos a altas concentrações de CO_2 , do que aqueles formados quando o processo de carbonatação ocorre lentamente e, portanto, não recomendam a utilização de 100% de CO_2 para se obter coeficientes de carbonatação com vistas ao cálculo de vida útil. Os autores sugerem a utilização de concentrações inferiores a 20%. Resultado similar foi encontrado por Cui *et al.* (2015), que avaliaram a porosidade, a morfologia e a profundidade de carbonatação dos concretos expostos a concentrações de 2%, 10%, 20%, 50% e 100% e concluíram que acima de 20% de CO_2 o mecanismo de difusão se altera. Dessa forma, de modo geral, os autores aconselham a utilização de teores CO_2 de até 20%. A Figura 2.2 apresenta o gráfico da relação entre a profundidade de carbonatação e o teor de CO_2 para cada idade de medida. Nota-se no exemplo dado, que a inclinação da reta muda a partir dos 20% de CO_2 o que indica a mudança na cinética da reação, sendo quase constante para teores acima de 50%.

Figura 2.2 – Profundidade de carbonatação do G30 com diferentes níveis de concentração de CO_2 em diferentes idades de ensaio (CUI *et al.*, 2015)



Um estudo realizado por Ho e Lewis (1987), mostrou uma boa correlação entre os resultados de profundidade de carbonatação obtido para corpos de prova expostos à carbonatação acelerada com teor de 4% de CO_2 , por um período de uma semana, e os resultados da carbonatação natural em ambiente de laboratório, durante um ano. A Figura 2.3 apresenta o gráfico obtido pelos autores.

Figura 2.3 – Comparação dos resultados entre o ensaio acelerado e o armazenamento em laboratório a longo prazo. As amostras foram curadas durante 7 dias (HO; LEWIS, 1987)



É possível notar que ainda há uma variação entre os teores adotados pelos pesquisadores, mas a tendência levantada pelas pesquisas é que baixas concentrações de CO_2 , ou seja,

entre 1% e 20% são teores considerados apropriados. Além das pesquisas que estudaram a influência das concentrações de gás carbônico, outros autores que realizaram ensaios de carbonatação em seus estudos adotaram teores entre 1% a 100%, como mostra a Figura 2.4. A Figura 2.5 destaca os teores mais utilizados pelos autores.

Figura 2.4 – Teores de CO₂ adotados nas pesquisas da revisão da literatura

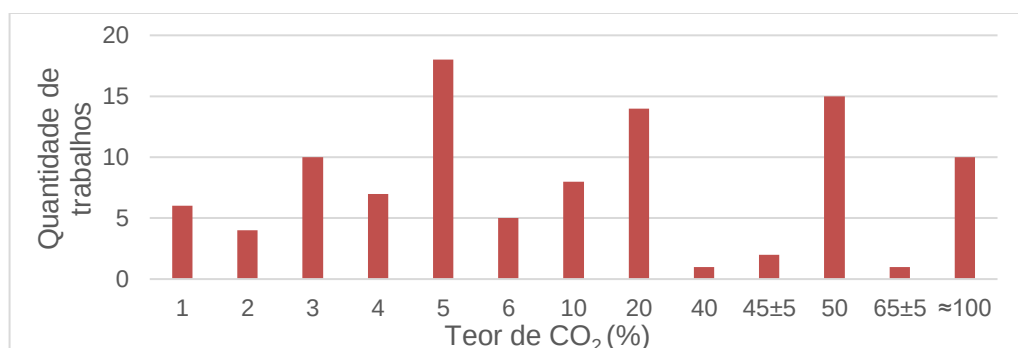
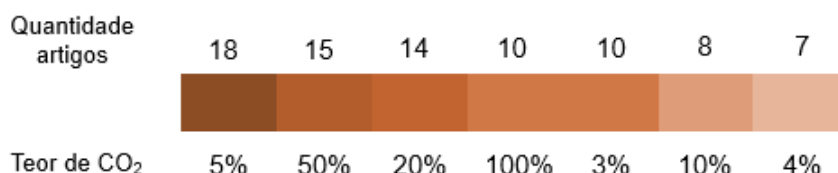


Figura 2.5 – Teores de CO₂ mais utilizados pelos autores da revisão da literatura



É importante entender que, a concentração de CO₂ é dada em percentual de volume contido na câmara, por exemplo, um teor de 100% significa que a câmara está totalmente preenchida com gás carbônico e um teor de 50% significa dizer que a câmara contém 50% de CO₂ e 50% de ar.

2.1.1.2. Umidade Relativa e Temperatura

O transporte do dióxido de carbono para o interior do concreto ocorre pelo mecanismo de difusão. A taxa de difusão, ou seja, a velocidade com que o gás carbônico permeia o concreto varia conforme o estado de umidade dos poros do concreto. Segundo Bakker (1998⁵ *apud* CASCUDO; CARASEK, 2011) o gás carbônico difunde-se mais rapidamente no ar do que na água (cerca de 10⁴ vezes mais rápido). Porém, para que as reações de carbonatação ocorram, é necessário que o CO₂ dissolva na água e, por isso, para que a velocidade das

⁵ BAKKER, R. F. M. Initiation period. *In*: SCHIESSL, P., ed. Corrosion of steel in concrete. London, Chapman and Hall, 1988. Cap. 3, p. 22-55.

reações de carbonatação seja alta a umidade relativa interna do concreto deve estar em torno de 60 a 70% (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Segundo Pauletti, Possan e Dal Molin (2007), em um artigo realizado a partir de levantamento da literatura brasileira sobre o ensaio de carbonatação acelerada, a temperatura e a umidade relativa são parâmetros já consolidados entre as pesquisas. Nesse levantamento, os valores adotados pelos pesquisadores para umidade relativa estão entre 50% e 85%, sendo 70% um percentual muito utilizado; enquanto a temperatura adotada encontra-se entre 20°C e 27°C. Pereira (2019) também constatou que o ensaio acelerado de carbonatação, considerando 3% de CO₂, 65% de UR e 27°C de temperatura apresentou uma frente de carbonatação maior e de melhor compreensão do que o ensaio sob condições de 15% de CO₂, 75% de UR e 23°C de temperatura. O autor explica que o aumento de 10% de umidade relativa, levou a maior quantidade de água nos poros do concreto, o que influenciou nos menores coeficientes de carbonatação.

De acordo com Lazar (2000), a velocidade de carbonatação é acelerada quando a umidade relativa interna do concreto se encontra entre 60% e 70%, enquanto outros autores encontraram uma faixa de umidade um pouco mais ampla, entre 50 e 70% (FATTUHI, 1988; CEUKELAIRE; NIEUWENBURG, 1993). As Figuras 2.6 e 2.7 apresentam a umidade relativa adotada por diversos pesquisadores, nacionais e internacionais, onde é possível notar que a faixa de umidade relativa mais utilizada pelos autores está entre 60 e 70%.

Figura 2.6 – Umidade relativa adotada nos diversos estudos avaliados

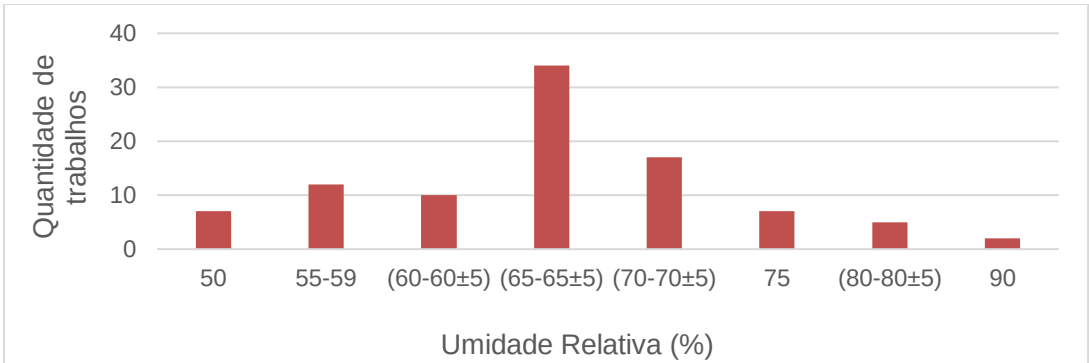
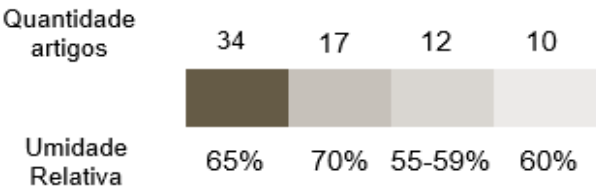


Figura 2.7 – Umidades relativas mais utilizadas pelos autores da revisão da literatura



Com relação à temperatura, sabe-se que a ação desta variável é responsável por acelerar as reações químicas e, portanto, a velocidade das reações aumentam à medida que a temperatura aumenta (CASCUDO; CARASEK, 2011). Papadakis, Vayenas e Fardis (1991⁶, *apud* PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007) afirmam que entre 20°C e 40°C a temperatura não influencia na carbonatação, visto que o fenômeno ainda é controlado pela difusão, contudo, na etapa de propagação da corrosão das armaduras, a temperatura tem influência. Nota-se que a temperatura adotada pelos pesquisadores varia dentro dessa faixa, de 20°C a 30°C, sendo 20°C e 25°C os teores mais adotados, como pode ser visto nas Figuras 2.8 e 2.9.

Figura 2.8 – Temperatura adotada nas pesquisas da revisão da literatura

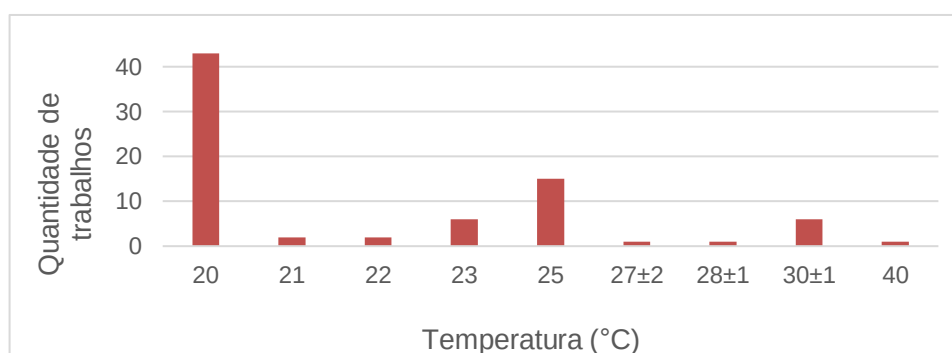
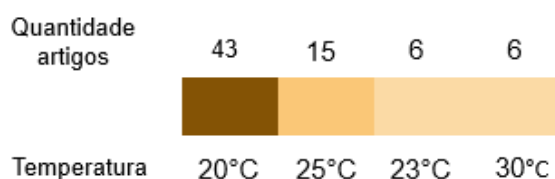


Figura 2.9 – Temperaturas mais utilizadas pelos autores da revisão da literatura



2.1.1.3. Formato dos corpos de prova

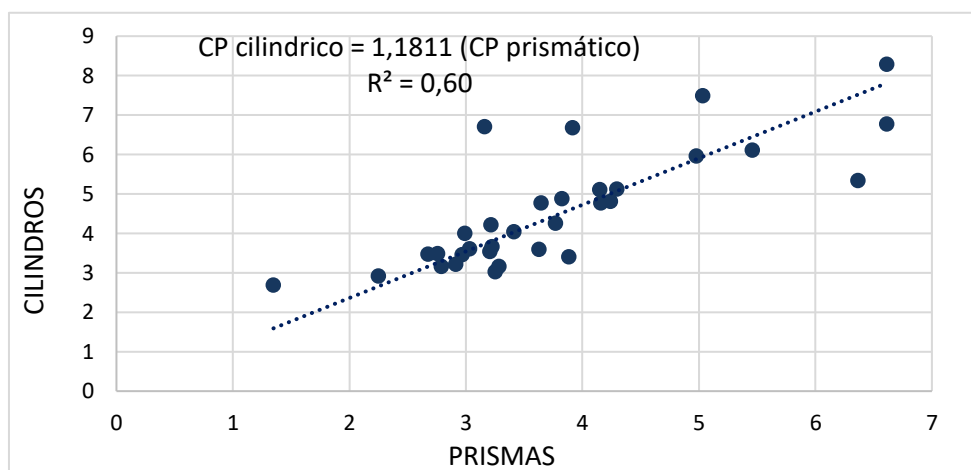
O formato do corpo de prova pode influenciar na profundidade de carbonatação. Segundo Kulakowski (2002), analisando corpos de prova (CPs) de argamassa em formato prismático (40x40x160mm) e cilíndrico (50x100mm), constatou que os corpos de prova cilíndricos apresentaram profundidades de carbonatação 50% maiores do que os prismáticos. O mesmo comparativo foi realizado por Carasek *et al.*⁷ (em fase de elaboração), que correlacionaram a

⁶ PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal** n. 88, p. 363-373, Jul./Aug. 1991b.

⁷ CARASEK, H; JUNGBLUT, M. E.; PASSOS, P. M.; CASCUDO, O. Effect of Carbonation in Mortars with Different Types of Metakaolin and Curing Procedures. Em fase de elaboração.

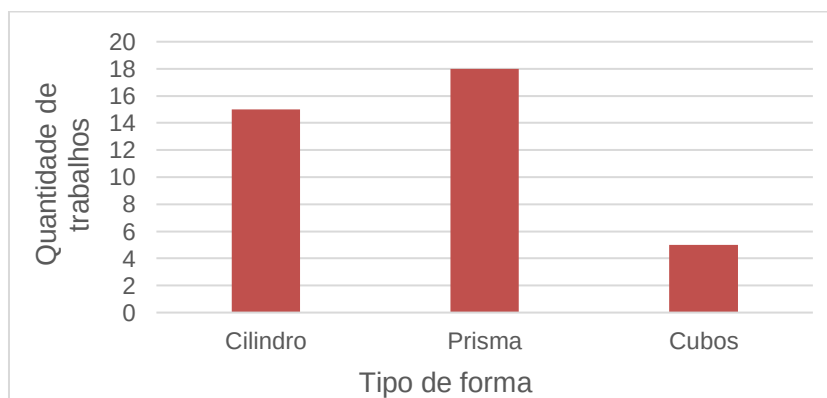
profundidade carbonatada de corpos de prova de argamassa cilíndricos e prismáticos e obtiveram uma correlação moderada, com resultados de carbonatação dos CPs prismáticos cerca de 20% superiores aos CPs cilíndricos (ver Figura 2.10).

Figura 2.10 – Relação entre as profundidades de carbonatação em corpos de prova cilíndricos x prismáticos (CARASEK *et al.* – em fase de elaboração)



A diferença entre os resultados de profundidades obtidos em corpos de prova cilíndricos e prismáticos é explicada pela ocorrência da soma de vetores decorrentes do formato cilíndrico. Por isso, a frente de carbonatação no formato cilíndrico é maior do que em formato prismático (ROUGEAU, 1997; KULAKOWSKI, 2002; SILVA *et al.*, 2009). Porém, a utilização de CPs cilíndricos abertos na direção diametral para medição da profundidade (onde tem-se um retângulo) é um método muito utilizado por pesquisadores a fim de evitar a influência da soma de vetores deste formato e aproveitar a maior disponibilidade destes moldes do laboratório. Dessa forma, pelo levantamento dos dados retirados da literatura, não há um consenso entre qual formato utilizar, como mostra a Figura 2.11.

Figura 2.11 – Tipo de forma empregado nas pesquisas da revisão da literatura



2.1.1.4. Precondicionamento

Em face do exposto no item 2.1.1.2, a umidade relativa exerce influência na difusão do gás carbônico e, por conseguinte, na velocidade das reações do fenômeno. Dessa forma, para realização do ensaio de carbonatação acelerada se faz necessário o equilíbrio da umidade interna do material. Essa etapa é denominada de condicionamento, que consiste na secagem do corpo de prova até a umidade relativa requerida para o ensaio, de tal forma que a umidade interna entre em equilíbrio com a umidade relativa requerida. O condicionamento ocorre após a cura do corpo de prova e antes da sua exposição ao CO₂.

As diferenças microestruturais dos concretos exercem influência nas condições de umidade interna do corpo de prova. Ou seja, para mesma condição de umidade relativa do ambiente e temperatura, diferentes umidades internas serão encontradas ao comparar concretos mais ou menos porosos, pois, sob mesma condição de umidade relativa e dependendo do grau de refinamento da microestrutura dos concretos, pode ocorrer ou não a saturação dos poros (SATO, 1998), influenciando a velocidade de carbonatação.

Diversos são os métodos utilizados na literatura para a etapa de condicionamento, dentre eles a secagem do corpo de prova em estufa por um período determinado. Ao comparar o método de secagem em estufa a 60°C por 48 horas e o método de secagem em câmara climática (T = 20±1°C e UR = 65%) por 6 meses, Cui, Sun e Banthia (2018) verificaram que a secagem em câmara climática distribuiu melhor a umidade interna dos corpos de prova e a secagem em estufa reduziu muito a umidade das camadas superficiais, resultando em maiores profundidades de carbonatação nas primeiras idades. Os autores explicam que esse aumento na profundidade é causado pela maior velocidade de difusão do CO₂ nas camadas superficiais (por causa da baixa umidade), ocorrendo a reação já em profundidades mais avançadas, onde a UR é maior. Essa mesma explicação é dada por Turcry *et al.* (2014) ao analisar o condicionamento segundo a norma XP P 18-458 (2008). Os autores observaram uma maior profundidade de carbonatação pelo mesmo motivo que Cui, Sun e Banthia (2018).

Outros autores verificaram que a secagem em estufa sob altas temperaturas (como 105°C) altera a microestrutura e a interconectividade dos poros, além de aumentar o gradiente de umidade relativa entre superfície e núcleo do concreto (PARROT, 1994; BAHADOR; JONG, 2006). Contudo, Parrot (1994) propõe um método de secagem em estufa a 50°C e posterior redistribuição da umidade interna ao embalar os corpos de prova e deixá-los novamente na

estufa com a mesma temperatura e, posteriormente, Thiery (2000⁸ *apud* THIERY, 2005), baseado no método de Parrot (1994) realiza um condicionamento similar. O autor notou que, mesmo para concretos mais porosos, a taxa de saturação se mantém próxima a 80% com a metodologia baseada em Parrot (1994). Com base nesses resultados o autor testou novos métodos e verificou que para classes de resistência do concreto entre 40 MPa e 50 MPa o método mais eficaz foi: 1 semana em estufa a 45°C + 1 semana em estufa a 60°C + 1 semana em estufa a 45°C, onde a taxa de saturação obtida foi inferior a 80%.

Segundo Pauletti (2004), os diferentes tipos de sazonalidade interferem tanto na velocidade do fenômeno da carbonatação, quanto nos resultados dos ensaios. A quantidade de água a ser perdida bem como o tempo e a forma como essa água será perdida podem afetar a hidratação dos ligantes e, como consequência, sua porosidade.

Ao comparar o condicionamento conforme RILEM TC 116-PCD - Tests for gas permeability of concrete (1999) e o método proposto pelo grupo de estudos do NORIE da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pauletti (2004) conclui que o procedimento da RILEM (1999) transmite a sensação de maior confiabilidade em relação às condições necessárias para o ensaio, ou seja, a umidade interna do corpo de prova desejada para o ensaio acelerado. O condicionamento proposto pela RILEM (1999) foi adotado por outros autores brasileiros, sob o mesmo ponto de vista da autora e pelo fato de não se ter norma brasileira que padronize o ensaio de carbonatação acelerada (VAGHETTI, 2005; BARIN, 2008; CADORE, 2008; HOPPE FILHO, 2008; SILVA *et al.*, 2009; WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011; PERIM, 2013)

Contudo, o condicionamento da RILEM (1999) necessita de um tempo maior para sua execução devido à realização de um pré-ensaio para determinar a massa a ser perdida pelo corpo de prova (que será submetido à carbonatação) durante a etapa de secagem em estufa. De acordo com Rougeau (1997), esse método mostra-se incompatível com a necessidade de reduzir a duração do ensaio de carbonatação acelerada; assim, ele propõe um método padrão de secagem em estufa a 40°C durante dois dias, independentemente do tipo de concreto. Para cada grupo de amostra, o método pode levar a um estado higroscópico do concreto variável dependendo da porosidade dos materiais.

Grande parte dos autores não realizaram ou não citaram em seus trabalhos a etapa do

⁸ THIERY, M. Etude de la durabilité liée aux transferts gazeux pour deux bétons très différents. Em fase de elaboração. Rapport technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Division Bétons et Composites Cimentaires, Paris, 2000.

precondicionamento (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1991; CEUKELAIRE; NIEUWENBURG, 1993; CHAN; DHIR; CHANG, 1994; JONES; DHIR; MAGEE, 1997; ROY; POH; NORTHWOOD, 1999; SANJUÁN; OLMO, 2001; SILVA, 2002; LO; LEE, 2002; CASTRO, 2003; SANJUÁN; ANDRADE; CHEYREZY, 2003; ATIS, 2003; CHANG; CHEN, 2006; KHUNTHONGKEAW; TANGTERMSIRIKUL; LEELAWAT, 2006; KIM; LEE; MOON, 2007; SISOMPHON; FRANKE, 2007; GONEN; YAZICIOGLU, 2007; CASTELLOTE *et al.*, 2009; VEJMELOVÁ *et al.*, 2010; BERNAL *et al.*, 2010; MCPOLIN *et al.*, 2011; BERNAL; GUTIÉRREZ; PROVIS, 2012; BERNAL *et al.*, 2012; CARRASCO; MARTÍN; RAMÍREZ, 2012; GRUYAERT; HEDE; BELIE, 2013; RABEHI; MEZGHICHE; GUETTALA, 2013; NICOLAS; CYR; ESCADEILLAS, 2014; NEVES *et al.*, 2015; GRIST *et al.*, 2015; BERNAL *et al.*, 2015; CUI *et al.*, 2015; SHI *et al.*, 2016; CHENG *et al.*, 2017).

Em contrapartida, os autores citados na Tabela 2.2 realizaram condicionamentos de diversas maneiras:

Tabela 2.2 – Tipos de condicionamentos empregados nas pesquisas da revisão da literatura

Pesquisador	Ano	Precondicionamento local/tempo	T (°C)	UR (%)	Observações
Qiu <i>et al.</i>	2017	Estufa	40	-	Não especifica o tempo
Dong <i>et al.</i>	2014; 2015; 2016	Estufa/ 24 horas	40	-	-
Yue <i>et al.</i>	2018	Estufa/ 14 dias	40±1	-	Depois do condicionamento foram selados e colocados novamente na estufa por mais 14 dias
Wang <i>et al.</i>	2017	1°) Estufa até UR estar entre 60-70% 2°) Redistribuição de umidade	1°)40±2 2°)50±2	60-70	Não especifica o tempo
Younsi <i>et al.</i>	2011	Estufa ventilada/ 2,5 e 14 dias	45	-	Comparação entre os dois tempos de duração
Thiery <i>et al.</i>	2007	Estufa/ 1 mês	45	-	-

Pesquisador	Ano	Precondicionamento local/tempo	T (°C)	UR (%)	Observações
Morandeau, Thiéry e Dangla	2014; 2015	1°) Estufa/ 56 dias 2°) Dessecador com solução de NH_4NO_3	1°) 45 2°) 20	2°) 62±5	Não especifica o tempo da 2° etapa
Villain e Thiery; Villain, Thiery e Platret	2006; 2007	1°) Estufa/ 1 mês 2°) Câmara climática/ 1 mês	1°) 45 2°) 20	2°) 53	-
Younsi <i>et al.</i> ; Turcry <i>et al.</i>	2013; 2014	Estufa/ 14 dias	45±3	-	-
Aït-Mokhtar <i>et al.</i>	2013	Estufa/ 14 dias	45±5	-	-
Wolf	2010	Estufa/ constância de massa	50	-	-
Mikhailenko <i>et al.</i>	2018	Estufa/ 1 semana	50	-	-
Bauer, Nepomuceno e Pozzan	2002	1°) Estufa/ 14 dias 2°) Laboratório/ constância de massa	1°) 50 2°) 20	2°) 50	-
Wan <i>et al.</i>	2014	Estufa/ 48 horas	50	-	-
Cheng <i>et al.</i>	2016	Estufa/ 24 horas	60	-	-
Zhang e Li; Zhang e Li; Duan <i>et al.</i> ; Tian <i>et al.</i>	2012; 2013; 2013; 2014	Estufa/ 48 horas	60	-	-
Duprat, Vu e Sellier	2014	1°) Estufa/ até grau de saturação médio igual a 65% 2°) Câmara climática/ 28 dias	1°) 60 2°) 20	2°) 65	-
Dérobot e Villain	2017	1°) Estufa 2°) Câmara climática	1°) <80 2°) 20	2°) 50	Não especifica o tempo
Chang <i>et al.</i>	2004	Estufa/ 1 dia	105	-	-
McPolin, Basheer e Long	2009	1°) Saturação/ 3 dias 2°) Estufa/ 2 dias 3°) Embalados e Estufa/ até constância de umidade interna	2°) 40 3°) 40	-	-
Kulakowski	2002	Câmara climática/ constância de massa ou até 28 dias	-	-	-

Pesquisador	Ano	Precondicionamento local/tempo	T (°C)	UR (%)	Observações
Kirchheim	2003	1°) Câmara climática/ constância de massa 2°) Embalados e Câmara climática/ 21 dias	-	-	-
Kulakowski, Pereira e Dal Molin	2009	Câmara climática/ 14 dias	-	-	-
Abreu	2004	Câmara climática/ 21 dias	-	-	-
Ghantous <i>et al.</i>	2017a; 2017b	Câmara climática/ 1 mês	20±1	60±5	-
Pauletti	2004	1°) Laboratório/ constância de massa 2°) Embalados e laboratório/ 14 dias	-	-	-
Frías e Goñi	2013	Laboratório/ 15 dias	-	65	-
Cunha e Helene	2001	Laboratório/ 15 dias	23-24	65-70	-
Sulapha <i>et al.</i>	2003	Laboratório/ 14 dias	30±2	75±5	-
Leemann <i>et al.</i>	2015	Laboratório/ 28 dias	20±1	57±2	-
Salvoldi, Beushausen e Alexander	2015	1°) Laboratório/ 60 dias 2°) Câmara climática/ 14 dias	1°)20±2 2°)20±2	1°)45±2,5 2°)65±5	-
Ho e Lewis	1987	Laboratório/ 21 dias	-	-	-
Papadakis	2000	Laboratório/ 1 mês	-	-	-
Basheer, Basheer e Long	2005	Sala climatizada/ 14 dias	40	20	-
Song <i>et al.</i>	2006	Câmara climática/ 14 dias	-	65	-
Miranda	2018	Dessecador/ 20 dias	-	-	utilização de sílica gel e solução de carbonato de cálcio

2.1.1.5. Tempo de exposição ao CO₂

O tempo determinado para a exposição dos corpos de prova às condições de ensaio é estipulado de maneira diferente por cada autor, atendendo aos seus respectivos objetivos das pesquisas. As idades podem variar entre horas, dias, semanas ou anos. Dentre as idades

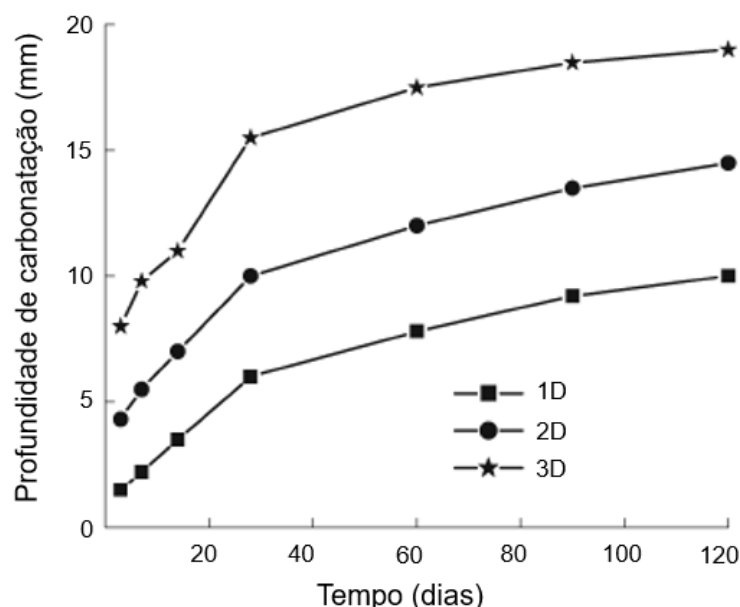
mais utilizadas pelos autores estão aquelas compatíveis com as idades comuns ao ensaio de resistência à compressão, que são: 7, 14 e 28 dias (HO; LEWIS, 1987; ROY; POH; NORTHWOOD, 1999; KULAKOWSKI, 2002; SILVA, 2002; ATIS, 2003; CASTRO, 2003; SULAPHA *et al.*, 2003; PAULETTI, 2004; POSSAN, 2004; VAGHETTI, 2005; HOPPE FILHO, 2008; KULAKOWSKI; PEREIRA; DAL MOLIN, 2009; WOLF, 2010; AÏT-MOKHTAR *et al.*, 2013; GRUYAERT; HEEDÉ; BELIE, 2013; PERIM, 2013; DONG *et al.*, 2014; MORANDEAU; THIÉRY; DANGLA, 2014; TURCRY *et al.*, 2014; CUI *et al.*, 2015; LEEMANN *et al.*, 2015; AHMED; BENHARZALLAH, 2017).

Porém, como visto no estudo de Cui *et al.* (2015), o teor de CO₂ influencia no tempo que irá levar à colmatção dos poros e redução do avanço da frente de carbonatação, visto que as reações podem ocorrer de forma mais acelerada em maiores concentrações de CO₂. Assim, o ensaio de carbonatação acelerada com menores teores de CO₂ necessitam de períodos mais prolongados de exposição para melhor visualização da frente de carbonatação. Seguindo esta linha de raciocínio, as normas ISO 1920-12 (2015) e NF EN 13295 (2004) adotam teor de CO₂ de 3% e 1%, respectivamente, e tempos de exposição mínimo de 56 dias.

2.1.1.6. Selagem do corpo de prova

Após o período de condicionamento e antes da exposição ao dióxido de carbono, alguns autores optam por selar determinadas faces dos corpos de prova. Dessa forma, a difusão do gás ocorrerá somente nas faces determinadas (não seladas). Essa técnica evita a difusão multidirecional do gás carbônico, como no caso da soma de vetores que ocorre nos corpos de prova cilíndricos e do efeito de canto que ocorre nos corpos de prova prismáticos.

A difusão multidirecional do CO₂ foi estudada por Chen *et al.* (2008). Os autores avaliaram a entrada do CO₂ em uma, duas e três direções (1D, 2D e 3D, respectivamente) nos corpos de prova e constataram que o comportamento dos concretos, para cada situação, foi semelhante em relação à profundidade *versus* tempo de exposição. Porém, as profundidades aumentaram à medida que se aumentaram as possibilidades de entrada do CO₂, sendo a profundidade em 3D cerca de 30% maior do que em 2D e esta, por sua vez, cerca de 45% maior do que a 1D, como pode ser visto na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Profundidades de carbonatação 1D, 2D e 3D (CHEN *et al.*, 2008)

A figura mostra que para efeito de comparação entre diferentes pesquisas, deve-se verificar se as condições dos corpos de prova à exposição ao CO_2 (1D, 2D ou 3D) são as mesmas, a fim de evitar comparar dados diferentes.

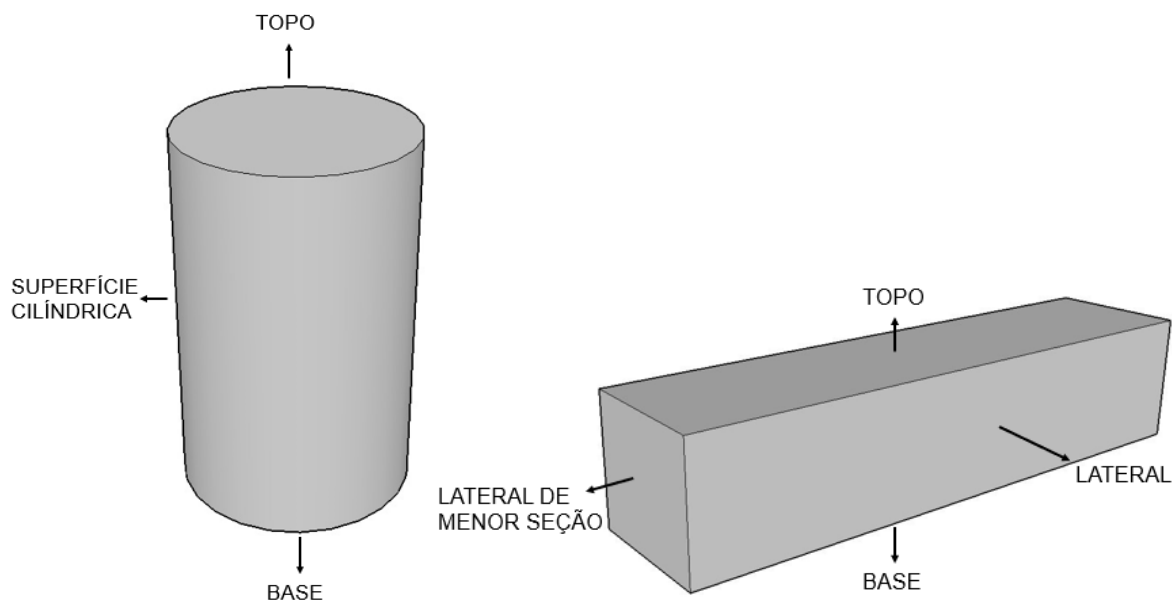
Na literatura verifica-se que há diversos tipos de materiais empregados para selagem dos corpos de prova, bem como a seleção das faces a serem seladas. Os materiais empregados pelos autores foram:

- **Cera/ parafina:** Kirchheim (2003), Song *et al.* (2006), Duan *et al.* (2013), Dong *et al.* (2014), Tian *et al.* (2014), Wan *et al.* (2014), Dong *et al.* (2015), Grist *et al.* (2015), Cheng *et al.* (2016), Dong *et al.* (2016), Qiu *et al.* (2017), Miranda (2018);
- **Cera de abelha e breu:** Cunha e Helene (2001);
- **Fita adesiva de alumínio:** Villain e Thiery (2006), Thiery *et al.* (2007), Villain, Thiery e Platret (2007), Younsi *et al.* (2011), Aït-mokhtar *et al.* (2013), Younsi *et al.* (2013), Morandea, Thiéry e Dangla (2014), Turcry *et al.* (2014), Neves *et al.* (2015), Ahmed e Benharzallah (2017), Mikhailenko *et al.* (2018);
- **Epóxi:** Ho e Lewis (1987), Lo e Lee (2002), Chang *et al.* (2004), Basheer, Basheer e Long (2005), Chang e Chen (2006), Sisomphon e Franke (2007), McPolin, Basheer e Long (2009), Salvoldi, Beushausen e Alexander (2015), Leemann *et al.* (2015);
- **Resina Acrílica:** Bernal *et al.* (2015);
- **Tinta à prova de gás:** Papadakis (2000);
- **Tinta Acrílica:** Yue *et al.* (2018);
- **Verniz:** Vaghetti (2005);

- **Verniz bicomponente à base de poliuretano:** Barin (2008), Cadore (2008), Hoppe filho (2008), Perim (2013);

A Figura 2.13 apresenta a nomenclatura adotada para identificação das faces seladas dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos nas diversas pesquisas.

Figura 2.13 – Identificação das faces dos corpos de prova



Com relação aos corpos de prova cilíndricos, as faces seladas foram:

- **Topo e base:** Chang *et al.* (2004), Chang e Chen (2006), Sisomphon e Franke (2007), Younsi *et al.* (2011), Younsi *et al.* (2013), Turcry *et al.* (2014), Bernal *et al.* (2015), Mikhailenko *et al.* (2018);
- **Superfície cilíndrica:** Papadakis (2000), Lo e Lee (2002), Villain e Thiery (2006), Thiery *et al.* (2007), Villain, Thiery e Platret (2007), Hoppe filho (2008); McPolin, Basheer e Long (2009), Aït-mokhtar *et al.* (2013), Morandeau, Thiéry e Dangla (2015), Neves *et al.* (2015);
- **Superfície cilíndrica e topo:** Basheer, Basheer e Long (2005), Song *et al.* (2006), Barin (2008), Cadore (2008), Yue *et al.* (2018).

E para os corpos de prova prismáticos e/ou cúbicos, as faces seladas foram:

- **Todas as faces, exceto uma (não especifica qual):** Ho e Lewis (1987), Jones, Dhir e Magee (1997), McPolin *et al.* (2011), Gruyaert, Heede e Belie (2013), Tian *et al.* (2014);

- **Faces laterais, exceto topo e base:** Cunha e Helene (2001), Duan *et al.* (2013), Dong *et al.* (2014), Wan *et al.* (2014), Grist *et al.* (2015), Salvoldi, Beushausen e Alexander (2015), Cheng *et al.* (2016), Miranda (2018);
- **Faces laterais de menor seção:** Kirchheim (2003), Vaghetti (2005);
- **Faces laterais, exceto as faces de menor seção:** Dong *et al.* (2015), Dong *et al.* (2016), Qiu *et al.* (2017);
- **Topo e base:** Wolf (2010), Perim (2013), Leemann *et al.* (2015), Ahmed e Benharzallah (2017).

2.1.2. Métodos normalizados de ensaio de carbonatação acelerada

A partir da revisão da literatura foi possível levantar algumas normas internacionais existentes com a metodologia para realização do ensaio de carbonatação. Dentre elas, foram selecionadas as normas de organizações internacionais que são mundialmente aplicadas. A Tabela 2.3 apresenta um resumo das variáveis de ensaio adotadas por essas normas.

Tabela 2.3 – Resumo das variáveis de ensaio adotadas pelas normas internacionais

	ISO 1920-12 (2015)	XP P 18-458 (2008)	NT BUILD 357 (1989)	NF EN 13295 (2004)
Nº de CPs	2	4	2 ou 3	2
Forma e dimensão	Cubos (100 mm) ou prisma (100x100x400 mm)	Prismas ou Cilindros	Cilindro (100x200 mm) ou prisma (100x100x300 mm)	Prismas (100x100x400 mm) ou (40x40x160)
Teor. CO ₂ (%)	3,0±0,5	50	3	1
Temp. (°C)	22±2	20±3	-	21±2
UR (%)	55±5	65±5	55-65	60±10
Tempo de exposição	70 dias (cubos) e 56, 63 e 70 dias (prismas)	3, 7, 14 e 28 dias	1 vez por mês ⁹	56 dias
Precondicionamento?	Sim	Sim	Não	Sim
Selagem?	Sim	Opcional	Não	Não
Forma de medida	Indicador Químico (Fenolftaleína)	Indicador Químico (Fenolftaleína)	Indicador Químico (Fenolftaleína)	Indicador Químico (Fenolftaleína)

⁹ Não estipula o tempo de exposição, apenas comenta que a profundidade de carbonatação deve ser medida pelo menos uma vez por mês.

A norma NF EN 13925 (2004), explica que a adoção da concentração de 1% de CO₂ se justifica pelo fato de se obter os mesmos produtos de carbonatação que em ambiente natural com 0,03% de concentração, permitindo assim uma aproximação do fenômeno em condições naturais. Além disso, a norma explica que a adoção da UR de 60±10% permite alcançar maiores taxas de carbonatação. Por outro lado, as outras normas não explicam o motivo da adoção dos teores de CO₂.

Quanto ao tipo e tempo de cura, as normas adotam diferentes tipos e tempos de cura, a saber: a norma NF EN 13295 (2004) recomenda manter os corpos de prova em água a (21±2)°C até completar 28 dias de idade ou após a desmoldagem e, depois, embalar em filme plástico por 48 horas, retirar da embalagem e armazenar por 25 dias em atmosfera de laboratório com (60±10)% de UR e (21±2)°C. Já as normas ISO 1920-12 (2015) e a XP P 18-458 (2008) adotam a cura submersa ou em câmara úmida por 28 dias. A NT BUILD 357 (1989) considera uma cura submersa por 14 dias e depois colocadas em ambiente exposto ao ar, com umidade relativa de (50±5)% e temperatura de (20±2)°C por mais 14 dias, finalizando em 28 dias todo o processo.

Em apenas duas normas o processo de selagem dos corpos de prova é realizado, a ISO 1920-12 (2015) e a XP P 18-458 (2008). O procedimento da ISO 1920-12 (2015) consiste em selar as faces laterais, com exceção do topo e da base (de acordo com a nomenclatura adotada na Figura 2.14 do tópico 2.1.1.5), enquanto o procedimento da XP P 18-458 (2008) deixa livre para escolha a selagem dos corpos de prova. Caso o objetivo seja avaliar a profundidade de carbonatação de forma unidirecional, os corpos de prova devem ser selados nas faces que não correspondem àquelas expostas ao gás carbônico, utilizando fita adesiva de alumínio.

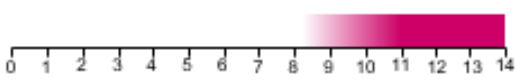
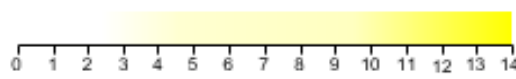
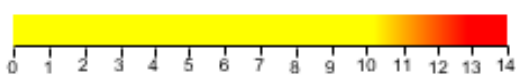
2.2. FORMAS DE AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Este tópico aborda os métodos utilizados para medir a carbonatação, como os indicadores químicos de pH e outras técnicas comumente utilizada pelos autores. Alguns métodos são qualitativos e outros permitem medir a profundidade que a frente de carbonatação avançou.

2.2.1 Indicadores químicos de pH

A técnica mais utilizada para medida da frente de carbonatação é a aplicação de um indicador de pH, que em contato com a solução alcalina do concreto exibem colorações típicas para determinadas faixas de pH, como mostra a Figura 2.14.

Figura 2.14 – Principais indicadores de pH usados no estudo de carbonatação do concreto (adaptado de CASTRO, 2003)

Indicador de pH	Intervalo de mudança de cor
Fenolftaleína	 incolor/vermelho carmim faixa de pH 8,3 – 10,0
Timolftaleína	 incolor/azul faixa de pH 9,3 – 10,5
Amarelo de alizarina GG	 amarelo claro/amarelo escuro faixa de pH 10,1 – 12,0
Amarelo de alizarina R	 amarelo/vermelho alaranjado faixa de pH 10,1 – 12,0

Dentre os indicadores, o mais utilizado é a fenolftaleína (CEUKELAIRE; NIEUWENBURG, 1993; BAUER; NEPOMUCENO; POZZAN, 2002; KULAKOWSKI, 2002; SILVA, 2002; ATIS, 2003; CASTRO, 2003; KIRCHHEIM, 2003; ABREU, 2004; PAULETTI, 2004; POSSAN, 2004; VAGHETTI, 2005; CHANG; CHEN, 2006; BARIN, 2008; CADORE, 2008; HOPPE FILHO, 2008; CASTELLOTE *et al.*, 2009; WOLF, 2010; GRUYAERT; HEEDÉ; BELIE, 2013; PERIM, 2013; DONG *et al.*, 2014; MORANDEAU; THIÉRY; DANGLA, 2014; TURCRY *et al.*, 2014; BERNAL *et al.*, 2015; CUI *et al.*, 2015; LEEMANN *et al.*, 2015; AHMED; BENHARZALLAH, 2017; MIRANDA, 2018). Porém, como as faixas de pH são diferentes entre os indicadores, pode ocorrer uma influência nos resultados da profundidade de carbonatação. Castro (2003) em sua dissertação, realizou uma correlação entre os resultados de profundidade obtidos com a fenolftaleína e amarelo de alizarina e encontrou uma boa correlação entre eles, com 96% de confiança ($R^2 = 0,96$). Outro trabalho que correlacionou os resultados foi o de Kazmierczak e Lindenmeyer (1996), onde os autores comparam a fenolftaleína com a timolftaleína e obtiveram 98% de confiança ($R^2 = 0,98$). Esses resultados indicam que as diferenças encontradas nas medidas de profundidade, utilizando diferentes indicadores, não são significativas e, portanto, pode-se utilizar qualquer um dos indicadores.

As Figuras 2.15 e 2.16 apresentam os gráficos das correlações de Castro (2003) e de

Kazmierczak e Lindenmeyer (1996), respectivamente.

Figura 2.15 – Correlação entre as profundidades medidas com o uso dos indicadores de pH, fenolftaleína e amarelo de alizarina GG (CASTRO, 2003)

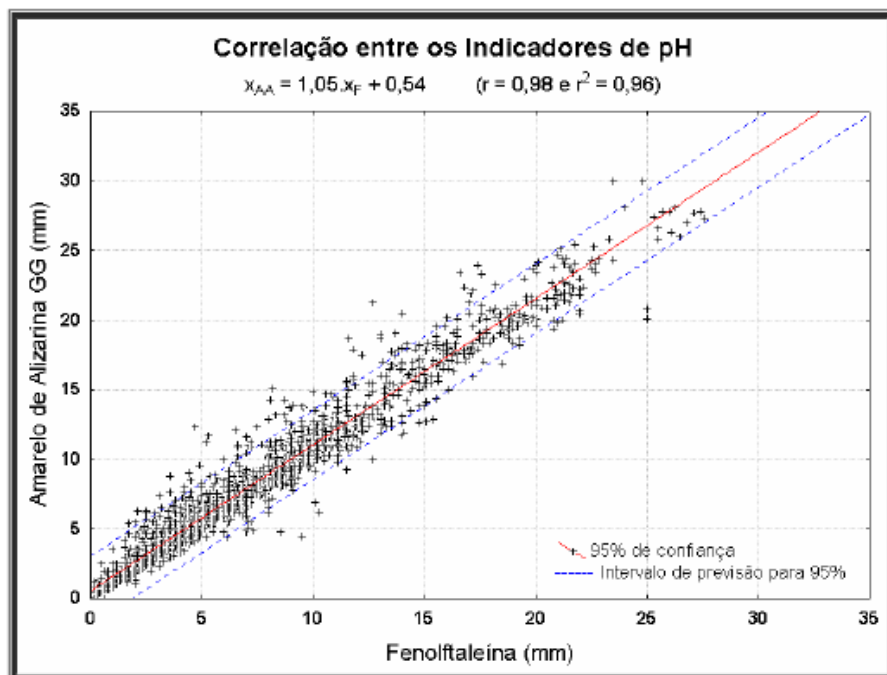
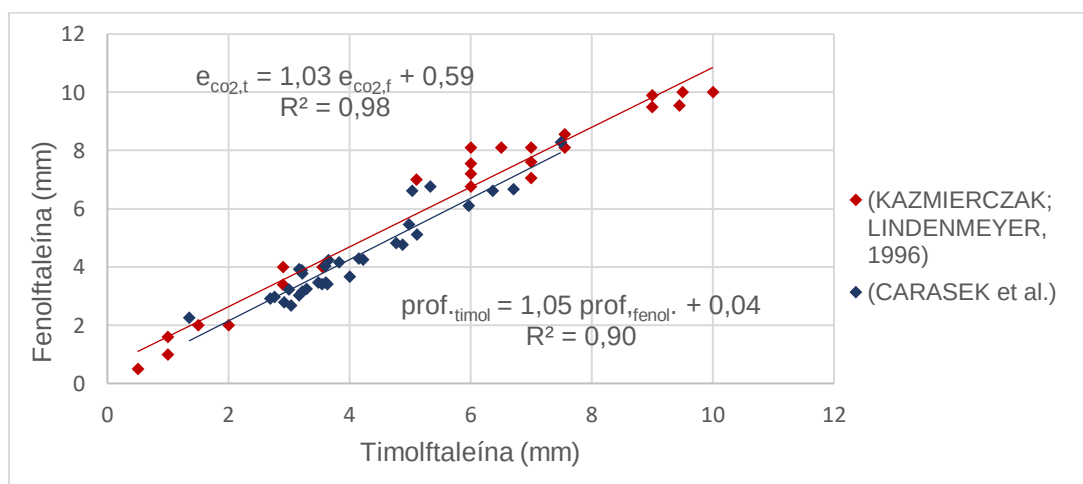


Figura 2.16 – Relação entre a profundidades de carbonatação determinada pelos indicadores fenolftaleína e timolftaleína, em ensaio de carbonatação natural (KAZMIERCZAK; LINDENMEYER, 1996) e acelerado (CARASEK *et al.* – em fase de elaboração)

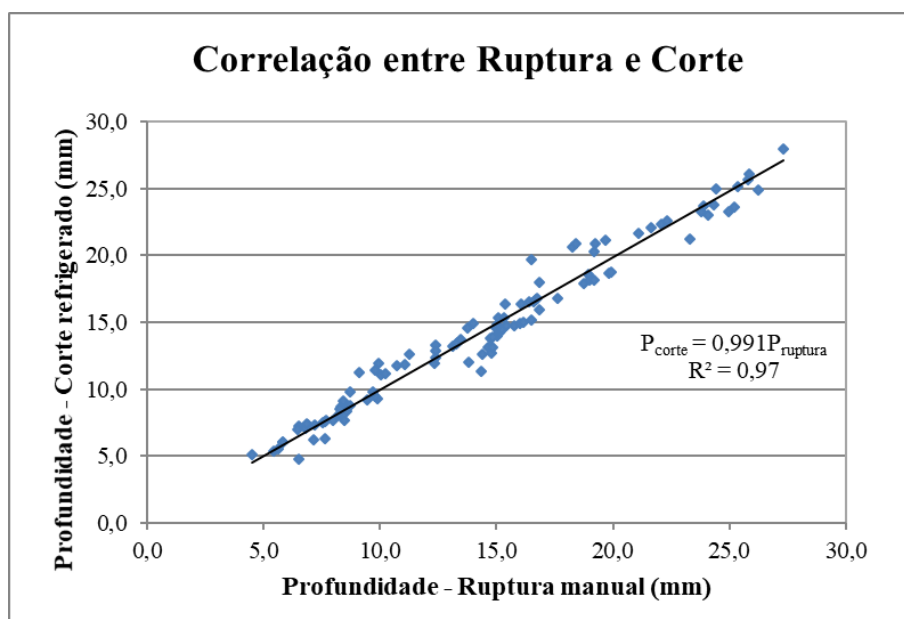


Vale ressaltar que a norma CPC-18 (RILEM, 1988), apresenta um método para medir a profundidade de carbonatação, tanto para concretos submetidos a ensaios em laboratório quanto *in loco*. O método consiste em fraturar a amostra, limpar as faces recém fraturadas de poeira e partículas soltas e aspergir a solução de fenolftaleína. Após a aspersão a norma pede que se espere um período de 24h para realização da medida da profundidade carbonatada.

Por ser um método de fácil aplicação e permitir uma boa visualização da frente de carbonatação, a fenolftaleína é utilizada por todas as normas internacionais abordadas no presente trabalho. Segundo as normas, para realizar a medida, uma fatia do corpo de prova, na seção transversal deve ser quebrada, a poeira e partículas soltas devem ser retiradas da superfície e, em seguida, é aplicada a fenolftaleína por aspersão.

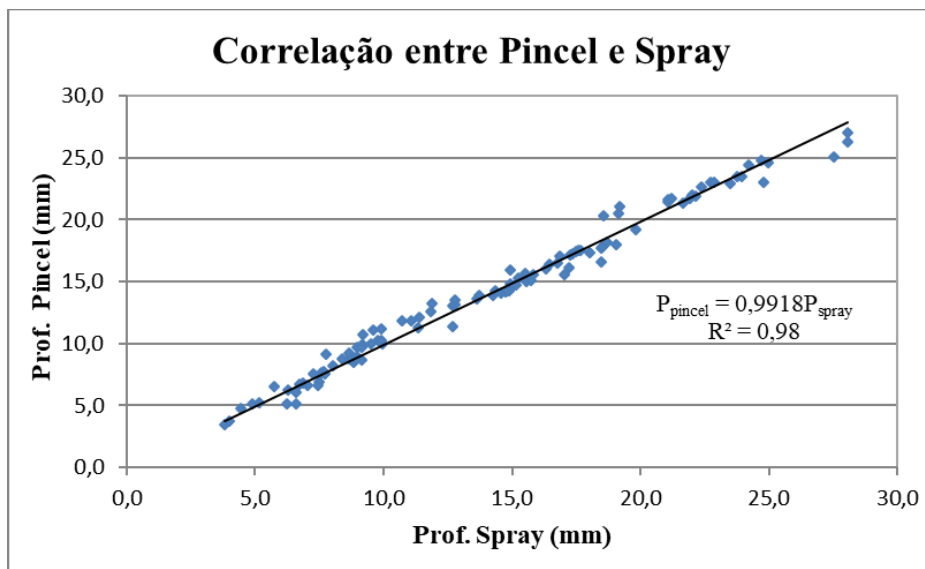
Ferreira (2013) fez uma comparação entre o método de retirada de fatia dos CPs para medição da profundidade carbonatada, utilizando a quebra manual com talhadeira e marreta e corte refrigerado com água com disco diamantado e obteve uma correlação de $R^2 = 0,97$, como mostra a Figura 2.17, indicando a possibilidade de utilizar o método de corte refrigerado.

Figura 2.17 – Correlação entre as profundidades medidas com o uso de ruptura manual e corte refrigerado
(FERREIRA, 2013) - adaptada pelo autor



Além disso, o autor correlacionou o modo de aplicação do indicador de pH: aspersão por spray e aplicação com pincel. O resultado da correlação, $R^2 = 0,99$, indica que as medidas de profundidade também foram muito próximas, não havendo diferença entre os dois métodos de aplicação (Figura 2.18).

Figura 2.18 – Correlação entre as profundidades de carbonatação medidas com o indicador aplicado com spray e com pincel (FERREIRA, 2013) - adaptada pelo autor



2.2.1.1 Tempo para medida da profundidade após aspersão de fenolftaleína

O procedimento CPC-18 (1988) determina que a medida deve ser obtida após 24h da aspersão da fenolftaleína. No entanto, segundo Pauletti (2004) a coloração rosa carmim que a fenolftaleína apresenta perde intensidade após esse período, dificultando a medição. Castro (2003), realiza a correlação entre o tempo de leitura estipulado pela norma e após 10 minutos da aspersão e obtém uma boa correlação ($R^2 = 0,97$), indicando que a medida após 10 min da aspersão não interfere nos resultados e, portanto, esse tempo é considerado aceitável e mais prático.

Algumas normas não estipulam o tempo de espera, após a aplicação do indicador de pH, para a medida da frente de carbonatação (NT BUILD 357, 1989; XP P 18-458, 2008). Já as outras normas que definem esse tempo o fazem de forma diferente uma das outras:

- NF EN 13295 (2004): (60 ± 5) min após aspersão;
- ISO 1920-12 (2015): Após estabilização de cor;
- CPC-18 (1988): 24 horas após aspersão.

2.2.2 Ensaios complementares

Segundo Pauletti (2004), a determinação da carbonatação já possui métodos consagrados como: a aspersão de indicadores químicos, análise petrográfica, análise térmica diferencial,

variação de massa e outros. Além disso, outras técnicas também são utilizadas a fim de analisar a microestrutura do concreto carbonatado, como: Microscopia eletrônica de varredura (MEV), Difractometria de Raios X (DRX), Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) (LO, LEE, 2002), Espectroscopia Raman, Análise do pH do poro, Impedância eletroquímica (DONG *et al.*, 2014), Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) e Gamadensimetria (VILLAIN, THIERY, PLATRET, 2007).

2.3. DISCUSSÃO GERAL SOBRE A REVISÃO DA LITERATURA

A partir da revisão e discussão da literatura abordada, é possível inferir que ainda há lacunas quanto a alguns parâmetros do ensaio de carbonatação acelerada. Dentre eles, pode-se elencar o tipo de condicionamento e o tempo necessário para garantir a umidade interna esperada para o ensaio; o formato do corpo de prova, o teor de CO₂ e o tempo de exposição ao ensaio acelerado para realizar as medidas de profundidade.

A respeito do teor de CO₂ tem-se na literatura que concentrações acima de 20% e/ou 50% podem interferir no mecanismo, alterando-o de tal forma que não reproduza as condições reais do fenômeno da carbonatação. Em suma, a adoção de altos teores de CO₂ levam à mudança na microestrutura do concreto, reduzindo a porosidade da camada de cobrimento e, conseqüentemente, alterando o mecanismo de difusão do gás. Dessa forma os resultados da profundidade de carbonatação não representam o que ocorre na realidade. Porém, ainda não há muitas pesquisas que possam afirmar qual o teor ideal para o ensaio, a princípio entende-se que há uma faixa de teores possíveis de serem utilizados no ensaio, como os teores mais baixos (entre 1% e 3%) definidos pelas normas NT BUILD 357 (1989), NF EN 13295 (2004) e ISO 1920-12 (2015).

Quanto ao formato do corpo de prova (cilíndrico ou prismático), a literatura aponta para um cuidado com os corpos de prova cilíndricos devido à soma de vetores que ocorrem quando os CPs são expostos sem isolamento de faces. Sendo indicado o formato prismático com objetivo de evitar o efeito da soma dos vetores, porém, existem normas que permitem a utilização dos dois formatos (NT BUILD 357, 1989; XP P 18-458, 2008). Em vista disso, fica um questionamento quanto à possibilidade de utilizar os dois formatos contanto que a difusão do CO₂ aconteça de forma unilateral ou bilateral.

Além disso, é apontado na literatura uma diversidade de métodos de condicionamento, baseados ou não em normas internacionais. Essa diversidade é responsável por afetar os resultados de profundidade, impedindo a comparação entre eles e a reprodutibilidade do ensaio. Além disso, cada concreto se comporta de maneira diferente perante à perda de

umidade devido à sua microestrutura, sendo necessária uma investigação a respeito da eficiência do tipo de condicionamento em relação aos diversos concretos. Assim, o presente trabalho focará na avaliação do efeito de diferentes procedimentos de condicionamento nos resultados de ensaio de carbonatação.

Em contrapartida, quantidade de corpo de provas, umidade relativa, temperatura e forma de medida da profundidade de carbonatação são parâmetros bem definidos e em concordância com a literatura e as normas de carbonatação acelerada.

CAPÍTULO 3

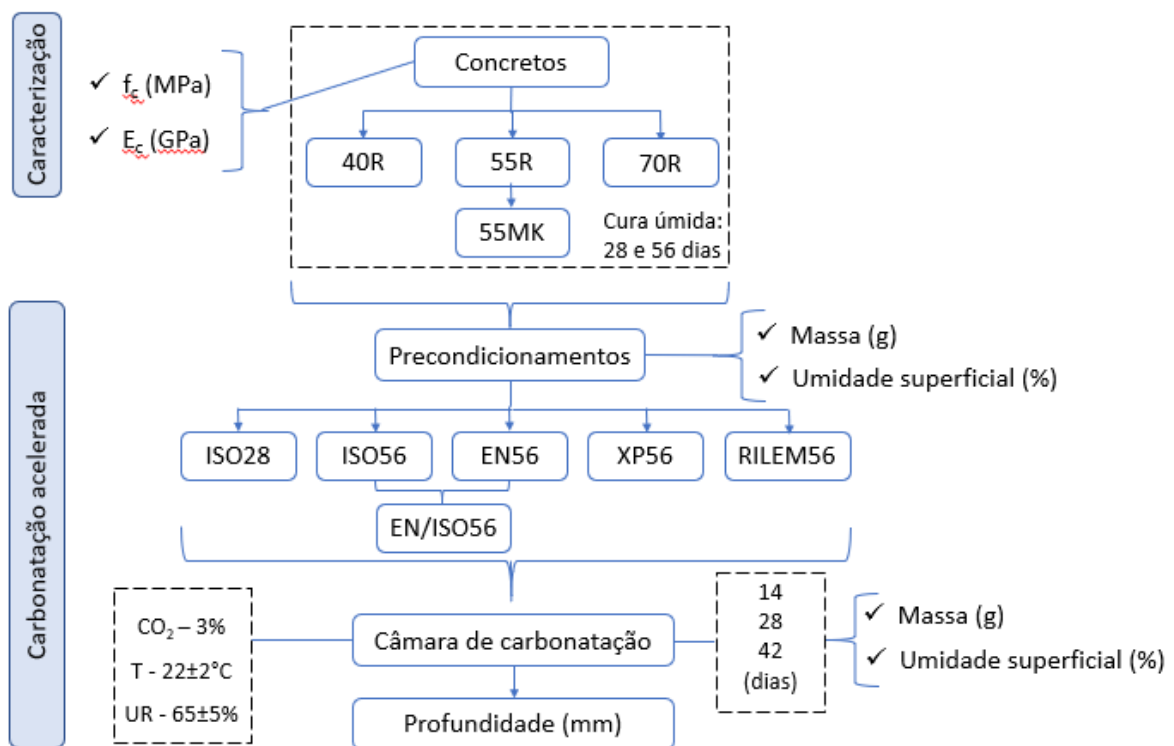
MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o delineamento da pesquisa, com a descrição das variáveis de estudo, os materiais utilizados, o preparo e condições de armazenamento dos concretos e, por fim, o procedimento experimental realizado.

3.1. VARIÁVEIS ESTUDADAS

O fluxograma da Figura 3.1 mostram as variáveis do estudo definidas para a pesquisa, assim como a sequência das atividades realizadas.

Figura 3.1 – Fluxograma geral da pesquisa



Onde:

- I. **Tipo de concreto:** foram avaliados concretos sem e com de metacaulim (com teor de 10% de substituição em massa de cimento). A decisão de utilizar concreto com adição mineral teve como premissa sua influência na microestrutura do concreto e, como consequência, um comportamento diferente frente ao condicionamento. O teor de 10% deriva de pesquisas realizadas anteriormente no Programa de Pós-Graduação em

Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPG-GECON) da Universidade Federal de Goiás (CASTRO, 2003; PERIM, 2013; TEODORO, 2016; PASSOS, 2019).

- II. **Relação água/ligante:** pelo mesmo motivo da decisão de utilizar a adição mineral, foram adotadas três distintas relações água/ligante: de 0,40; 0,55 e 0,70. Apesar de a relação 0,70 não estar dentro das especificações da norma de desempenho NBR 6118 (ABNT, 2014), ela é adotada por diversas concreteiras da região de Goiânia (PAULA, 2018). Além disso, com os resultados obtidos é possível obter a curva do comportamento desses concretos e, com isso, prever o comportamento do concreto de relação 0,65 (limite estabelecido pela norma).
- III. **Tipo de condicionamento:** a fim de avaliar a influência do tipo de condicionamento no ensaio de carbonatação acelerada, foram adotadas quatro diferentes normas que versam sobre o método de condicionamento: RILEM TC 116-PDC (1999), ISO 1920-12 (2015), XP P 18-458 (2008) e NF EN 13925 (2004)¹⁰ e cinco procedimentos diferentes, sendo o procedimento da norma ISO 1920-12 (2015) realizado com o tempo de cura de 28 dias (procedimento padrão) e de 56 dias (procedimento adotado para todos os métodos, a fim de evitar a influência do tempo de cura nos resultados). Os métodos estão descritos na seção 3.3.1.1.
- IV. **Tempo de cura:** adotou-se um período de cura dos corpos de prova de concreto de 56 dias, devido ao fato de o condicionamento RILEM TC 116-PDC (1999) apresentar um tempo mais longo para o término do processo, o que levaria a uma diferença significativa da hidratação e consolidação da matriz cimentícia do concreto e, como consequência, uma influência maior da idade dos concretos nos resultados da profundidade de carbonatação. Além disso, dois corpos de prova por traço foram curados por um período de 28 dias e condicionados conforme a norma ISO 1920-12 (2015) com objetivo de seguir o procedimento padrão desta norma, por ser a norma internacional mais recente e de uma organização mundialmente reconhecida.

3.2. MATERIAIS

Os materiais e suas principais características são descritos neste tópico:

- I. **Agregado miúdo:** areia natural aluvial de natureza silicosa, massa específica igual a 2,64 g/cm³ e módulo de finura 2,08, correspondente à zona utilizável inferior pela NBR 7211

¹⁰ Os métodos conforme normas NF EN 13295 (2004) e ISO 1920-12 (2015) realizados com o concreto curado por 56 dias foram considerados iguais pelas mesmas condições do ambiente e tempo de ensaio.

(ABNT, 2015). A Tabela 3.1 apresenta sua caracterização básica. A composição granulométrica pode ser consultada no Apêndice B.

II. **Agregado graúdo:** rochas de granito britadas, com dimensão máxima característica de 19 mm, módulo de finura de 6,81 e massa específica de 2,63 g/cm³, correspondente à zona granulométrica d/D de 9,5/25 pela NBR 7211 (ABNT, 2015). A Tabela 3.2 apresenta sua caracterização básica. A composição granulométrica pode ser consultada no Apêndice B.

III. **Cimento:** Cimento Portland CII F 40, composto por 75 a 89% de clínquer e de 11 a 25% de material carbonático, conforme NBR 16697 (ABNT, 2018). A Tabela 3.3 apresenta sua caracterização.

IV. **Metacaulim:** a Tabela 3.4 traz a caracterização do metacaulim empregado.

V. **Aditivo:** aditivo superplastificante à base de policarboxilatos com pH de 5,56, densidade 1,07 g/cm³ e teor de sólidos de 31,2%.

Tabela 3.1 – Caracterização do agregado miúdo

Propriedade	Método	Resultado
Absorção de água (%)	NBR NM 30	0,5
Módulo de finura	NBR NM 248	2,08
Diâmetro máx. característico	NBR NM 248	2,34
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52	2,64
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	NBR 7218	0,02

Tabela 3.2 – Caracterização do agregado graúdo

Propriedade	Método	Resultado
Absorção de água (%)	NBR NM 53	0,6
Módulo de finura	NBR NM 248	6,81
Diâmetro máx. característico (mm)	NBR NM 248	19
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 53	2,63

Tabela 3.3 – Caracterização do cimento

Propriedade		Método	Resultado
Massa específica (g/cm ³)		NBR 16605	3,09
Área específica (Blaine) (m ² /kg)		NBR 16372	417
Água de consistência – Pasta (%)		NBR 16606	28,8
Tempo de pega	Início	NBR 16606	02:30
	Fim		03:30
Resistência à Compressão (MPa)	28 dias	NBR 7215	43
Componentes químicos (%)	Perda ao fogo	NBR NM 18	5,55
	Resíduo insolúvel	NBR NM 15	2,35
	CaO	FRX	62,30
	SiO ₂		18,26
	Fe ₂ O ₃		2,84
	Al ₂ O ₃		4,24
	MgO		2,17
	SO ₃		2,72
	CaSO ₄		4,62
	Na ₂ O		0,35
	K ₂ O		0,42

Tabela 3.4 – Propriedades físicas e químicas do metacaulim

Propriedade	Resultado
Massa específica (g/cm ³)	2,60
BET (m ² /g)	28,71
Atividade Pozolânica – Chapelle Modificado (mg Ca(OH) ₂ /g)	1075
Atividade Pozolânica – IAP 28 dias (%)	128,6

3.2.1 Dosagem

Com base nas variáveis de estudo, as dosagens resultaram em concretos referência – 40R, 55R e 70R, onde 40, 55 e 70 são referentes às relações a/c 0,40, 0,55 e 0,70,

respectivamente; e o concreto com adição mineral – 55MK, onde MK é relativo ao metacaulim. A dosagem dos concretos teve como premissa o método do módulo de finura; adotou-se um traço inicial (conforme empregado por Almeida (2016)) e este foi ajustado em função do módulo de finura dos materiais utilizados na pesquisa. A Tabela 3.5 apresenta o traço unitário em massa e o consumo dos materiais em kg/m³.

A fim de garantir a trabalhabilidade do concreto na faixa de 120±20 mm e auxiliar na dispersão do metacaulim, utilizou-se aditivo superplastificante em teores percentuais em relação à massa de cimento, como visto na Tabela 3.5. Após a mistura do concreto na betoneira, foram realizados os ensaios de trabalhabilidade (abatimento - slump test) segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e teor de ar incorporado (ABNT, 2002) ainda no estado fresco.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) para ensaio de resistência à compressão aos 28 dias; e de 15 x 30 cm (diâmetro x altura) para ensaio de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Além disso, para os ensaios de carbonatação acelerada foram moldados dois corpos de prova prismáticos de 10 x 10 x 40 cm para cada traço e por tipo de condicionamento (ver Figura 3.2); além de dois corpos de prova a mais para o preparo do condicionamento da RILEM TC 116-PDC (1999). A Tabela 3.6 mostra a distribuição e a quantidade total desses corpos de prova.

Figura 3.2 – Moldagem dos corpos de prova para os ensaios de caracterização e carbonatação acelerada



Tabela 3.5 – Composição dos concretos do estudo

	40R	55R	70R	55MK
Traço (c : ad : a : b)*	1,0:0,0:2,14:2,54	1,0:0,0:2,95:3,23	1,0:0,0:3,50:3,67	0,9:0,1:2,95:3,23
Água (kg/m ³)	154,4	164,4	183,4	162,8
Areia (kg/m ³)	826,0	865,5	917,0	865,5
Brita (kg/m ³)	980,4	947,7	961,5	947,7
Cimento (kg/m ³)	386,0	293,4	262,0	264,1
Metacaulim (kg/m ³)	-	-	-	29,3
Aditivo (%)	0,60	0,60	0,70	0,90
Massa específica no estado fresco (kg/m ³)	2352	2258	2333	2289
Abatimento de tronco cone – <i>slump test</i> (mm)	110	140	140	140
Teor de ar incorporado (%)	3,6	4,4	3,0	4,8

Tabela 3.6 – Quantidade de CP's moldados por traço e tipo de condicionamento

Propriedade	Precondicionamento	Corpos de prova	
		Dimensões (cm)	Quantidade CPs/ traço
Resistência à compressão	-	Cilíndrico (10 x 20)	3
Módulo de Elasticidade	-	Cilíndrico (15 x 30)	3
Carbonatação acelerada	ISO28	Prismático (10 x 10 x 40)	2
	ISO56		2
	EN56		2
	XP56		2
	RILEM56		4
TOTAL			18

O código dos tipos de condicionamento deve ser entendida da seguinte maneira: onde se lê ISO28 refere-se ao concreto com 28 dias de cura, submetido ao tipo de condicionamento ISO 1920-12; e onde se lê ISO56 refere-se ao concreto com 56 dias de cura, submetido ao mesmo condicionamento ISO 1920-12. Assim, considera-se o código para identificação

dos diferentes tipos de condicionamento com a sigla da norma seguido do tempo de cura úmida (dias), conforme mostra a Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Código adotado para identificação dos corpos de prova de acordo com o tipo de condicionamento e tempo de cura

Código	Norma	Tempo de cura (dias)
ISO28	ISO 1920-12 (2015)	28
EN/ISO56	NF EN 13295 (2004)	56
XP56	XP P 18-458 (2008)	56
RILEM56	RILEM TC 116-PDC (1999)	56

Após 24 horas da moldagem os concretos foram desmoldados e levados para a câmara úmida, onde foram curados até a idade de realização dos ensaios, em condições de umidade acima de 95% e temperatura a 23°C.

3.2.2 Caracterização dos concretos estudados

Os concretos dosados para esta pesquisa abrangem uma faixa de relação água/ligante considerável, englobando quatro escalas de porosidades. Eles foram submetidos a uma caracterização básica, segundo os seguintes métodos: resistência à compressão (aos 28 dias, conforme NBR 5739), módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (aos 28 dias, conforme NBR 8522). A Tabela 3.8 traz um resumo dos resultados de caracterização mecânica dos concretos e no Apêndice B estão apresentados os resultados da análise estatística para cada ensaio de caracterização.

Tabela 3.8 – Resumo dos resultados de caracterização mecânica dos concretos aos 28 dias de idade

Traço	Resistência à compressão			Módulo de Elasticidade			Coeficiente de Poisson		
	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	Média	DP	CV (%)
40R	67,1	3,46	5,2	33,0	3,63	11,0	0,17	0,02	11,8
55MK	46,8	1,48	3,2	29,2	0,93	3,2	0,14	0,03	21,4
55R	42,8	1,04	2,4	26,6	0,75	2,8	0,13	0,02	15,6
70R	28,0	1,22	4,4	23,1	2,12	9,2	0,12	0,03	22,0

3.3 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

O programa experimental de avaliação da influência dos diferentes tipos de condicionamento foi fundamentado no acompanhamento da massa dos corpos de prova e da sua umidade superficial durante os procedimentos de condicionamento, bem como na análise da profundidade de carbonatação.

Após a cura (28 e 56 dias), dois corpos de prova por traço foram encaminhados para que fossem realizados os diferentes tipos de condicionamento, ao final dessa etapa eles foram dispostos na câmara de carbonatação e realizou-se a medida de profundidade da frente de carbonatação aos 14, 28 e 42 dias de exposição ao CO₂. Este tópico descreve a sequência das etapas e os procedimentos realizados.

Finalizado o período de cura definido, os concretos a serem ensaiados foram retirados da câmara úmida, secos superficialmente e pesados em balança de precisão de 0,1g. Nesse momento aferiu-se também a umidade superficial (em %) dos corpos de prova com o aparelho Moisture Meter, modelo T-M-170 da marca James Instruments Inc (Figura 3.3). Ao considerar que não foram encontrados trabalhos na temática da carbonatação acelerada de concretos que utilizassem este aparelho para medir a umidade superficial, foram realizadas medidas nas faces lateral e de acabamento, nos concretos submetidos ao tipo de condicionamento ISO28, e nas faces lateral e fundo para os concretos expostos aos outros três tipos de condicionamento, a fim de avaliar se havia influência da escolha da face nas medidas.

No Apêndice E está apresentada uma análise de correlação entre as medidas obtidas, onde mostra que a face de acabamento influencia nos resultados obtidos, devido à irregularidade da superfície. Dessa forma, as medidas obtidas na face de acabamento, nos concretos ISO28, foram desconsideradas para as análises de resultados, considerando apenas as medidas da face lateral para o cálculo da média.

Figura 3.3 – Medida da umidade superficial dos concretos



Em seguida, os corpos de prova de cada traço seguiram para os diferentes tipos de condicionamento de acordo com as normas previamente determinadas.

3.3.1 Tipos de Condicionamento

- a) **ISO 1920-12 (2015)**: para este procedimento os corpos de prova foram deixados em uma câmara climática com controle de umidade e temperatura, trabalhando com a faixa exigida pela norma – UR = (50-70)% e T = (18-29)°C. A umidade relativa média foi de 52%, com desvio padrão (DP) de 5% e coeficiente de variação (CV) de 9%, enquanto a temperatura média foi de 23°C (DP = 2°C e CV = 7%), medidos com o termo higrômetro. O procedimento durou 14 dias.
- b) **NF EN 13295 (2004)**: neste procedimento os concretos também foram colocados na câmara climática com as mesmas condições de UR e temperatura que o condicionamento da ISO 1920, citado na alínea a), por ter a faixa de umidade relativa e temperatura similar à ISO – em torno de (60±10)% e (21±2)°C, respectivamente. Neste ambiente os corpos de prova deveriam permanecer até a constância de massa (diferença de 0,2% entre medidas de massa realizadas com intervalo máximo de 24h) ou por um período mínimo de 14 dias. Como todos os traços atingiram a constância de massa antes do período mínimo, eles permaneceram por 14 dias na câmara.
- c) **XP P 18-458 (2008)**: os corpos de prova foram colocados em tanque com água, de forma que ficassem imersos, onde foram deixados por dois dias. Após esse período, foram secos superficialmente, pesados novamente e verificadas as suas umidades superficiais, em seguida foram colocados em estufa a 50°C, onde permaneceram por um período de 14 dias.
- d) **RILEM TC 116-PDC (1999)**: muito utilizado por diversos autores, principalmente brasileiros (PAULETTI, 2004; VAGHETTI, 2005; BARIN, 2008; CADORE, 2008; HOPPE FILHO, 2008; SILVA *et al.*, 2009; WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011; PERIM, 2013), foi adotado como um parâmetro de comparação dos tipos de condicionamento. Este condicionamento consiste em duas etapas, sendo que na primeira se determina a concentração da umidade de equilíbrio por um método de dessorção e determinação da perda de massa necessária durante o condicionamento em si; a segunda etapa consiste na fase do condicionamento propriamente dito e na redistribuição da umidade interna.

A princípio um corpo de prova por traço (10 x 10 x 40 cm) foi pesado e colocado em estufa a 105°C até atingir a constância de massa (diferença de 0,5g entre duas leituras consecutivas a um intervalo de 24 horas). De posse das leituras da massa ao final da cura e após a secagem em estufa, calculou-se a quantidade total de água evaporável (W_e) pela Equação 3.1:

$$W_e = m_o - m_d \quad (3.1)$$

Em que:

W_e = teor total de água evaporável (g);

m_o = massa da amostra ao final da cura (g);

m_d = massa da amostra ao final da secagem (g).

Com o valor de W_e , calculou-se a concentração de umidade evaporável (w_e), obtido pela Equação 3.2:

$$w_e = W_e / m_d \quad (3.2)$$

Em paralelo ao processo já descrito, outro corpo de prova prismático de 10 cm x 10 cm x 40 cm foi triturado em britador, a fim de obter partículas de dimensão aproximada de 5mm. Posteriormente, o material triturado foi peneirado por um conjunto de peneiras de aberturas de malha de 6,3 mm, 4,8 mm e 2,3 mm. Foram utilizados 500 g, aproximadamente, do material passante nas peneiras 4,8 mm e 2,3 mm, disposto em bandejas metálicas, identificado e colocado em câmara climática com umidade de (75±2)% e temperatura de (20±1)°C, conforme procedimento adotado por Perim (2013).

O material permaneceu na câmara climática até a constância de massa (diferença de 0,1 g entre duas leituras consecutivas em intervalo de 24 horas). Atingida a constância, o mesmo material foi levado a uma estufa a 105°C até a constância de massa e, então, calculou-se a quantidade de água evaporável no equilíbrio ($W_{e,75}$), conforme a Equação 3.3:

$$W_{e,75} = m_{e,75} - m_{d,75} \quad (3.3)$$

Em que:

$m_{e,75}$ = massa de equilíbrio com (75±2)% de umidade relativa do ar (g);

$m_{d,75}$ = massa após secagem em estufa a 105°C (g).

Com o $W_{e,75}$, a concentração da umidade de equilíbrio ($w_{e,75}$) foi obtida a partir da Equação 3.4:

$$w_{e,75} = W_{e,75} / m_{d,75} \quad (3.4)$$

Ao final dessa etapa preparatória, a perda de massa (Δm) que cada corpo de prova (por traço) deve perder, durante o condicionamento, foi obtida pela Equação 3.5:

$$\Delta m = \left(\frac{w_e - w_{e,75}}{1 + w_e} \right) m_o \quad (3.5)$$

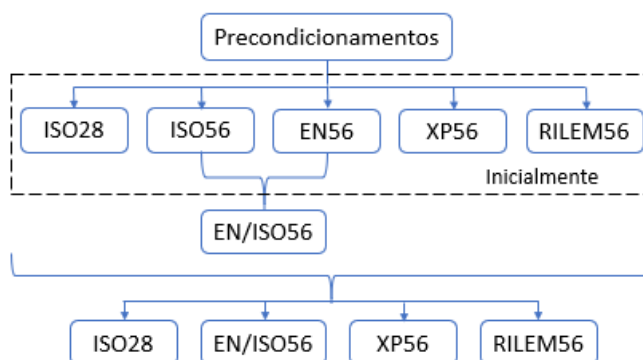
Assim, de posse do Δm , iniciou-se o condicionamento propriamente dito. Para isso, dois corpos de prova prismáticos de 10 cm x 10 cm x 40 cm, por traço, foram retirados da câmara úmida, secos superficialmente, tiveram suas massas registradas (m_o) e foram calculados o Δm de cada uma. Depois os corpos de prova foram levados à estufa a 50°C, onde permaneceram até alcançar a perda de massa com precisão de 5%, verificada segundo a Equação 3.6:

$$\frac{\Delta m_{obs} - \Delta m_{cal}}{\Delta m_{cal}} < 0,05 \quad (3.6)$$

Posteriormente os corpos de prova foram embalados com dupla camada de filme PVC, colocados em dois sacos de polipropileno e lacrados com fita adesiva transparente nas duas extremidades. Em seguida foram retornados para a estufa, onde permaneceram por 14 dias para que ocorresse a redistribuição da umidade interna. No 14º dia eles foram retirados da estufa e deixados no laboratório por 24h para o equilíbrio da temperatura com o ambiente, ficando prontos para serem colocados na câmara de carbonatação.

Os concretos com 56 dias de cura que foram condicionados conforme a ISO 1920-12 (2015) e a NF EN 13295 (2004) ficaram, pelo mesmo período de 14 dias, em câmara climática sob as mesmas condições de umidade relativa e temperatura, conforme explicado nos itens a) e b) deste tópico. Logo, os condicionamentos denominados nessa pesquisa como EN56 e ISO56 são considerados iguais (Figura 3.4). Além disso, a ANOVA e o teste de Duncan (Apêndice D) também confirmam que os resultados de profundidade de carbonatação para os dois tipos de condicionamentos foram iguais.

Figura 3.4 – Fluxograma dos tipos de condicionamento



A massa e a umidade superficial dos corpos de prova foram aferidas durante e ao final de todos os procedimentos de condicionamento. Ao término dessa etapa os corpos de prova foram levados à câmara de carbonatação, onde se deu início ao ensaio de carbonatação acelerada. Algumas normas, como a ISO 1920-12 (2015), especificam a etapa de selagem dos corpos de prova em duas faces opostas e nas extremidades antes do ensaio de carbonatação acelerada para evitar o fluxo de CO_2 nessas faces. Porém, nesta pesquisa optou-se por não realizar essa etapa, visto que seria um processo a mais em um programa experimental extenso. Assim, como as normas XP P 18-458 (2008) e NF EN 13295 (2004) não determinam essa etapa de selagem dos corpos de prova, optou-se por seguir com os corpos de prova direto do condicionamento para a câmara de carbonatação, sem as faces seladas.

A câmara de carbonatação (modelo 6034-1 da marca Caron) foi configurada para operar com os seguintes parâmetros: concentração de CO_2 de 3%, conforme a norma ISO 1920-12 (2015); umidade relativa de $(65 \pm 5)\%$, como preconizam as normas XP P 18-458 (2008) e NF EN 13295 (2004); e temperatura de $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$, atendendo ao parâmetro de temperatura das três normas citadas. Esses parâmetros não foram definidos a partir de uma única norma internacional, pois buscou-se compatibilizar o que foi encontrado no levantamento bibliográfico com as normas internacionais.

A Figura 3.5 mostra a disposição dos corpos de prova dentro da câmara, respeitando o padrão de ficarem na posição vertical, com espaçamento de aproximadamente 5 cm entre eles.

Figura 3.5 – Posicionamento dos CP's na câmara de carbonatação

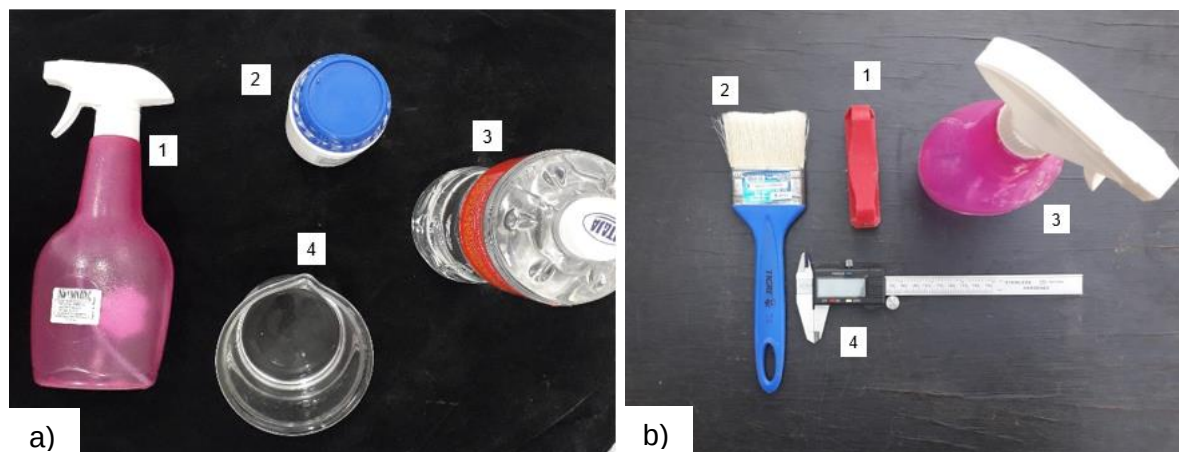


Assim, os concretos ficaram expostos ao CO_2 por 14, 28 e 42 dias e foram medidas as profundidades de carbonatação, suas massas e umidade superficial. A determinação da profundidade de carbonatação se deu pela aspersão do indicador químico de pH fenolftaleína preparada com 10 g de fenolftaleína diluída em 700 ml de etanol e 300 ml de água destilada (Figura 3.6a). Para tal, os corpos de prova de concreto foram cortados, por meio de corte refrigerado com água com disco diamantado, no sentido da sua seção transversal a uma espessura de 5 cm, resultando em duas fatias de (10 cm x 10 cm x 5 cm), além dos dois corpos de prova restantes (cortados).

Após o corte, as faces expostas de cada corpo de prova (um total de quatro faces) foram limpas com uma escova e um pincel para retirar poeira e partículas soltas e só então foi aspergida a fenolftaleína. Após 15 min da aplicação da fenolftaleína, realizou-se a medida da profundidade da frente carbonatada com um paquímetro digital de precisão de 0,01 mm. A Figura 3.6b mostra os materiais utilizados para medir a profundidade de carbonatação.

Foram feitas quatro medidas em cada face exposta, sendo duas medidas pontuais em cada uma das quatro arestas, como mostra a Figura 3.7. Considerando as 4 faces expostas dos corpos de prova para cada tipo de concreto e 8 medidas, foram realizadas um total de 32 medidas de profundidade de carbonatação a cada período de exposição. Nas extremidades dos CP's foi desconsiderado cerca de 2 cm das faces devido à soma de vetores da difusão do CO_2 que ocorrem nas regiões de canto. Além disso, quando havia um agregado no ponto onde seria medida a profundidade, optava-se por medir logo após o agregado, na região da argamassa.

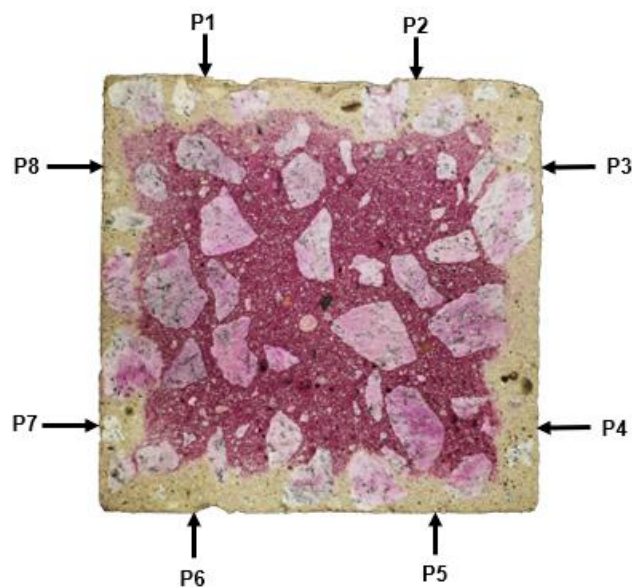
Figura 3.6 – Materiais utilizados para a) preparo da fenolftaleína e b) materiais para medida da profundidade de carbonatação



1 - Recipiente para solução de fenol;
2 - Fenolftaleína;
3 - Álcool 99,9%;
4 - Becker com água destilada.

1 – Escova;
2 - Pincel;
3 – Recipiente com fenolftaleína;
4 - Paquímetro.

Figura 3.7 – Exemplo da localização dos pontos de medida de profundidade de carbonatação em uma face



A adoção de duas medidas por lateral de cada face partiu da necessidade de otimização do ensaio. Objetivando confirmar a possibilidade de aplicar essa metodologia de medida, foi feita uma pesquisa complementar para verificar se a realização de cinco medidas centrais por lateral – seguindo a recomendação da norma ISO 1920-12 (2015) – poderia ser representada por apenas duas medidas. Foram realizados testes de Duncan de comparação múltipla de médias a fim de verificar se os dois métodos de medidas levariam a resultados estatisticamente iguais ou não. Os resultados dessa pesquisa complementar estão no Apêndice C e indicam que a redução de cinco para duas medidas por lateral pode ser feita

sem alteração dos resultados de profundidade de carbonatação.

3.3.3 Análise Estatística

Para auxiliar na interpretação dos resultados quanto à verificação da influência das variáveis estudadas e avaliar se há diferença estatística entre os métodos de condicionamento, os resultados de profundidade de carbonatação foram submetidos a análises estatísticas.

Primeiramente os dados foram submetidos à análise dos valores espúrios considerando os erros de operador e a irregularidade da frente de carbonatação, que podem levar a medidas muito diferentes que se desviam do conjunto das outras observações da amostra. Para tal, utilizou-se o teste de Dixon, seguindo as recomendações da norma ASTM E 178 (ASTM, 2016), que indica verificar o conjunto de dados (organizados em ordem crescente) pelos extremos superiores e inferiores, repetindo a operação caso esses valores sejam espúrios até que não exista mais espúrios. Adotou-se um nível de significância de 5%.

Após o tratamento dos espúrios, analisou-se os dados pelo teste de significância por análise de variância (ANOVA) utilizando o *software* Statistica 10.0, da empresa StatSoft, onde foram avaliadas a influência dos fatores: tipo de concreto (dosagem), tempo de exposição ao CO₂, tipo de condicionamento e a interação entre eles. Em seguida, havendo influência significativa das variáveis, empregou-se o teste de Duncan para realizar a comparação múltipla de médias a fim de observar como se agrupam os resultados, principalmente entre os diferentes tipos de condicionamento – objeto deste estudo.

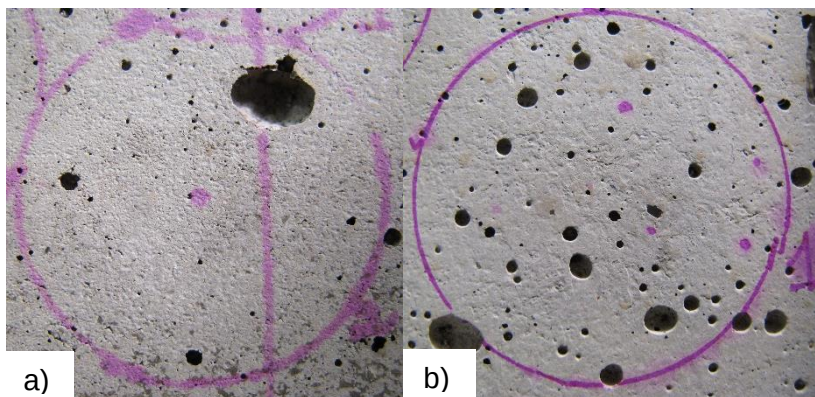
3.3.4 Análise na Lupa Estereoscópica

Ao trabalhar com condicionamento de secagem em estufa, como o caso do XP56 e RILEM56, uma preocupação encontrada na literatura é o fato de que altas temperaturas podem levar a fissuras e/ou microfissuras (PARROT, 1994; BAHADOR; JONG, 2006). Dessa forma, uma análise em lupa estereoscópica, com ampliação de até 16x, foi realizada a fim de avaliar (em escala mesoscópica) se surgiram novas fissuras ou se houve aumento das fissuras existentes.

Para isso, um corpo de prova dos tipos de condicionamento EN/ISO56 e XP56 foram mapeados na lupa antes de ser iniciado o condicionamento. Foram feitas marcações de diversos “campos de visão” em duas faces opostas dos corpos de prova onde se observaram algumas fissuras existentes antes de iniciar o procedimento de condicionamento, como mostra a Figura 3.8. Os campos foram nomeados com o propósito de registrar imagens das

mesmas fissuras antes e depois do condicionamento.

Figura 3.8 – “Campos de visão” marcados em uma face de cada corpo de prova a) EN/ISO56 e b) XP56



O condicionamento EN/ISO56 também foi monitorado a fim de acompanhar o comportamento das fissuras existentes frente a um condicionamento que o corpo de prova não seca em estufa, mas em que há uma secagem natural em condições controladas.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões referentes aos ensaios realizados nesta pesquisa. Inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios referentes à carbonatação acelerada. A partir da análise estatística são discutidas as variáveis que influenciam os resultados de carbonatação, englobando o foco principal do estudo, que é a análise da influência dos diferentes tipos de condicionamento na profundidade de carbonatação.

4.1 CARBONATAÇÃO ACELERADA

A avaliação da carbonatação foi realizada por meio das medidas de profundidade de carbonatação, obtidas após 14, 28 e 42 dias de exposição em câmara de CO₂. No Apêndice F estão apresentados os resultados individuais e nesta seção são mostrados os resultados da análise estatística das variáveis de estudo, seguidos da discussão global de cada variável, apresentando também as correlações feitas para as medidas de umidade superficial e massa dos corpos de prova durante o processo de condicionamento. Além disso, apresenta-se a correlação entre umidade superficial e profundidade de carbonatação e, por fim, uma discussão acerca do tempo de espera após a aplicação da fenolftaleína para realização das medidas.

4.1.1 Análise Estatística

Buscando avaliar a influência das variáveis de estudo e, principalmente, a influência dos tipos de condicionamento nas profundidades de carbonatação – objeto de estudo desta pesquisa – realizou-se a análise de variância (ANOVA). A Tabela 4.1 apresenta os resultados da ANOVA indicando que os efeitos “Dosagem”, “Tempo de exposição”, “Precondicionamento”, além das interações entre eles, são significativos. Esse modelo de análise de variância apresentou coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,85, assinalando a significância do modelo ao descrever a influência dos parâmetros avaliados.

Nas seções 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4 discute-se melhor a influência dos efeitos (Dosagem, Tempo de exposição e Precondicionamento), com a análise da comparação múltipla de médias realizado pelo teste de Duncan.

Tabela 4.1 – Resultado da análise de variância realizado com as profundidades de carbonatação de todos os concretos e condicionamentos, considerando todas as idades de medida

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{calc}	F _{tab}	Resultado (5% de significância)
Modelo	18661,40	47	397,05	173,67	1,37	Significativo
Erro (resíduo)	3390,48	1483	2,28	-	-	-
Total	22051,88	1530	-	-	-	-
Dosagem	12887,41	3	4295,80	1878,99	2,61	Significativo
Tempo de exposição	3103,59	2	1551,80	678,76	3,00	Significativo
Precondicionamento	868,85	3	289,62	126,68	2,61	Significativo
Dosagem x Tempo de exposição	1364,23	6	227,37	99,45	2,10	Significativo
Dosagem x Precondicionamento	271,86	9	30,21	13,21	1,89	Significativo
Tempo de exposição x Precondicionamento	32,69	6	5,45	2,38	2,10	Significativo
Dosagem x Tempo de exposição x condicionamento	118,49	18	6,58	2,88	1,61	Significativo
Erro (resíduo)	3390,48	1483	2,29	-	-	-
Coeficiente de determinação (R ²)	0,85					
Coeficiente de correlação (R)	0,92					

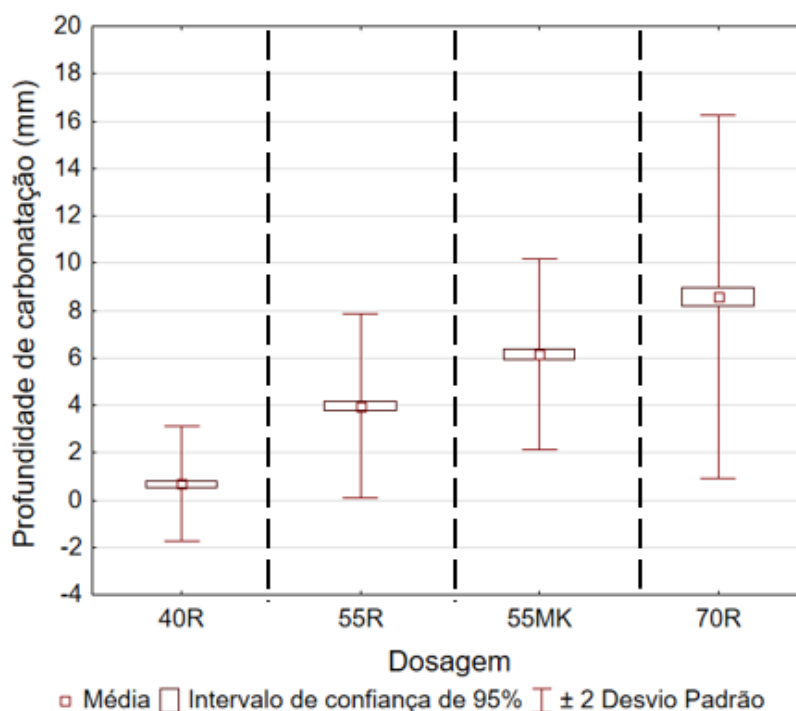
4.1.2 Influência da Dosagem

Uma das características do concreto mais importante, no que tange à durabilidade das estruturas, é a porosidade. Como a relação água/ligante influencia na microestrutura dos concretos e, principalmente na porosidade, já era esperado que o comportamento dos concretos frente à carbonatação seriam diferentes, devido à escolha das relações água/ligante variando entre 0,40 e 0,70.

O coeficiente de difusão, mecanismo de transporte do CO₂ para o interior do concreto, aumenta à medida que a relação a/c aumenta, devido à interconexão dos poros e maior permeabilidade (OLLIVIER; TORRENTI, 2014). Assim, como mostra a Figura 4.1, é possível perceber um comportamento crescente da profundidade de carbonatação à medida que a relação a/lig aumenta.

A Figura 4.1 apresenta o gráfico de comparação múltipla de média global do efeito da “Dosagem”, onde as linhas tracejadas separam, em diferentes grupos, os tipos de concretos. Todos os grupos apresentam diferenças estatisticamente significativas; essa diferença é tão acentuada que o fator “Dosagem” na análise de variância (ANOVA) – Tabela 4.1 – pode ser apontado como o mais significativo, com F_{calc} cerca de 100% maior do que o F_{tab}.

Figura 4.1 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação – análise global do efeito da dosagem



A dosagem com metacaulim (55MK) apresentou uma profundidade de carbonatação maior em relação ao concreto 55R sem adição, onde o comportamento foi inverso em relação à resistência à compressão desses concretos. Constatou-se ainda que, mesmo com a melhoria na microestrutura do concreto 55MK, resultando em resistência superior ao concreto 55R, nessa faixa de relação água/ligante o metacaulim afetou negativamente o concreto frente à carbonatação. Efeito este explicado pela redução da reserva alcalina ao substituir o cimento por 10% (em massa) por metacaulim (PAPADAKIS, 2000; CASCUDO; CARASEK, 2011; PASSOS, 2019).

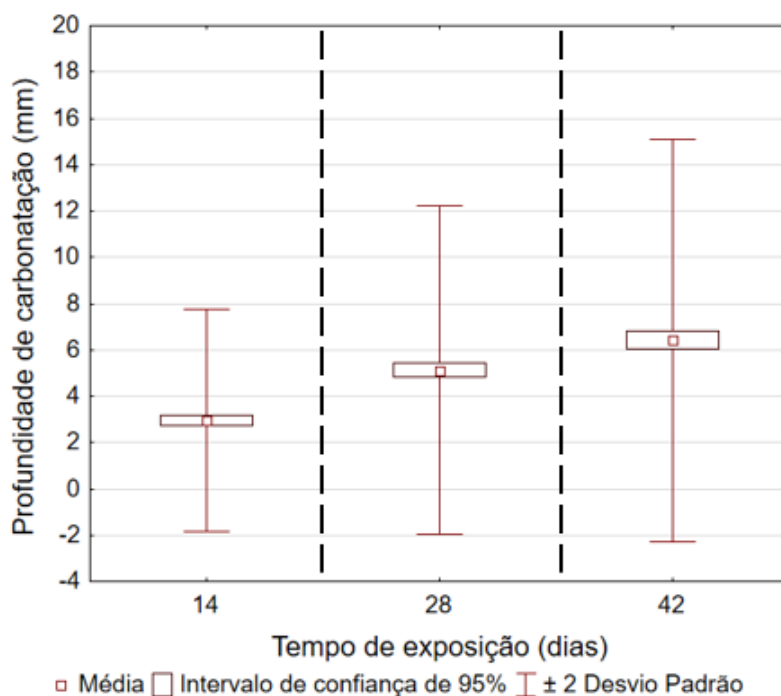
4.1.3 Influência do Tempo de Exposição

À medida que o concreto é exposto ao CO_2 a profundidade de carbonatação avança ao longo do tempo e, portanto, quanto maior o tempo de exposição a tendência é obter maiores profundidades de carbonatação. Este comportamento ocorre até que a colmatação dos poros, decorrente da precipitação do CaCO_3 , dificulte a difusão do CO_2 e a continuação do fenômeno (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Como visto na Tabela 4.1, o tempo de exposição foi o segundo maior fator significativo na análise de variância e, pelo teste de Duncan (Figura 4.2), os tempos de exposição adotados na pesquisa são diferentes entre si, o que significa dizer que o intervalo de tempo de 14 dias entre uma medida e outra, nas condições definidas para o ensaio de carbonatação acelerada

deste estudo – 3% de CO_2 , $(65\pm 5)\%$ de UR e $(22\pm 2)^\circ\text{C}$ – aumentaram gradativamente a profundidade de carbonatação dos concretos.

Figura 4.2 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação – análise global do efeito do tempo de exposição



Este comportamento é esperado, visto que o avanço da frente de carbonatação acompanha o tempo de exposição. Em idades de ensaio iniciais ocorrem menores profundidades, ao longo do tempo essa profundidade aumenta com o avanço das reações para o interior do concreto.

4.1.4 Influência dos Tipos de Precondicionamento

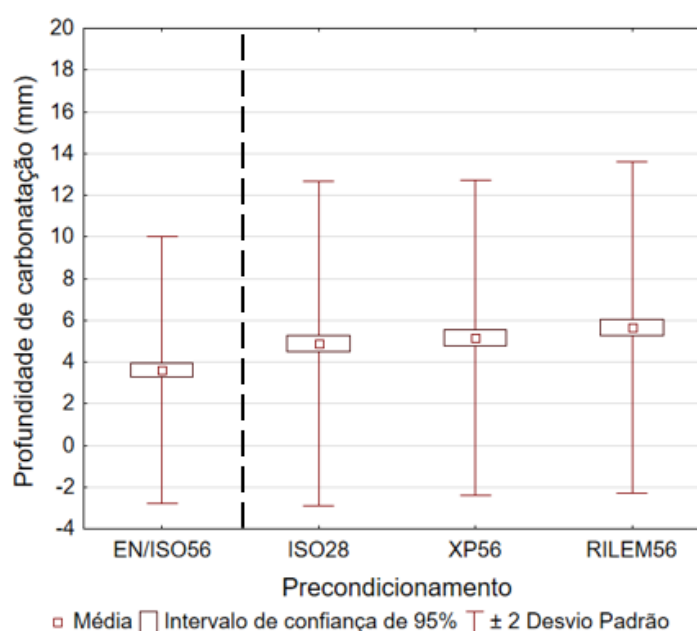
Existem dois princípios de condicionamento: um que visa o equilíbrio da umidade interna do corpo de prova com a umidade relativa do ambiente ao qual ele se insere e aquele que tem como premissa uma umidade interna igual para todos os corpos de prova, sem levar em consideração o tipo de concreto e suas diferenças microestruturais. Há alguns anos, o comitê da norma brasileira sobre carbonatação acelerada discute o que se espera desse condicionamento e, de acordo com Pauletti (2009), para a avaliação de diferentes materiais o princípio do equilíbrio da umidade interna do concreto com a umidade relativa do ambiente é um fator importante, do ponto de vista da condição que mais se assemelha com a carbonatação natural.

Os condicionamentos apresentados neste trabalho, mesmo aqueles que levam a secagem em estufa, têm como princípio respeitar as diferenças microestruturais dos concretos, uma

vez que os condicionamentos ISO28 e EN/ISO56 expõem os concretos a um ambiente com umidade e temperatura controlada para que o equilíbrio ocorra de forma natural; o condicionamento RILEM56 busca encontrar a quantidade de massa a ser perdida pelo CP em função da sua massa de equilíbrio, com 75% de umidade relativa (etapa anterior ao condicionamento propriamente dito); e o condicionamento XP56 seca o corpo de prova em estufa sem controlar a umidade do ambiente da estufa, porém, por um tempo determinado, o que leva a perdas de umidade diferentes em razão das diferentes microestruturas dos concretos – similar ao que ocorre no equilíbrio de umidade interna do concreto com a umidade ambiente.

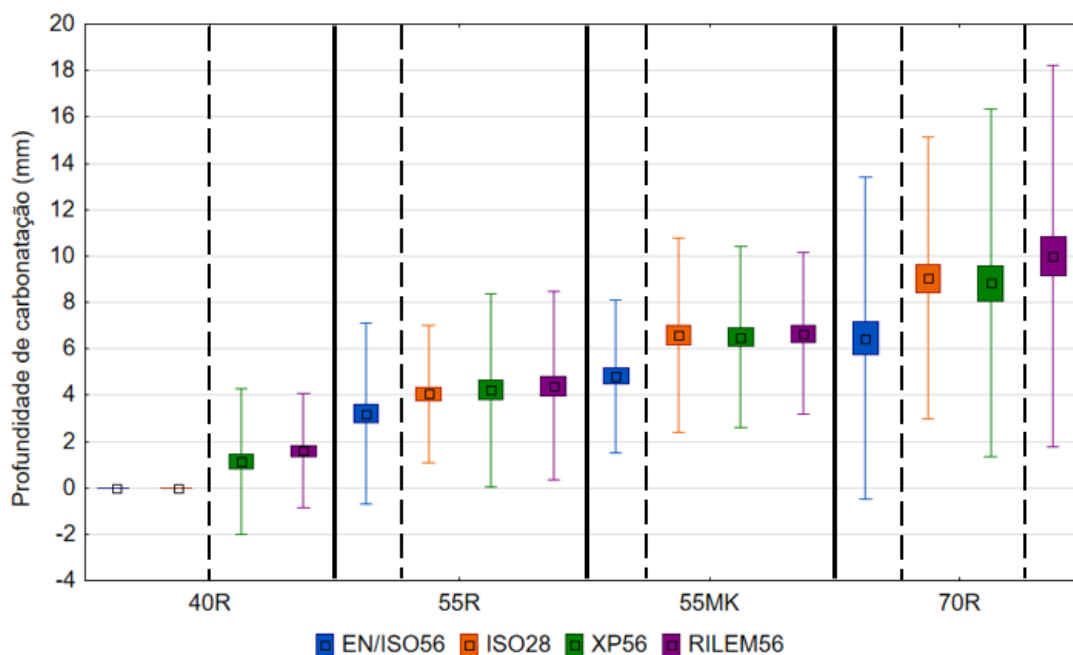
Pelo método da ANOVA (Tabela 4.1) verificou-se que o tipo de condicionamento tem influência significativa na profundidade de carbonatação. Com a comparação múltipla de médias (Figura 4.3), em uma análise global, infere-se que os condicionamentos ISO28, XP56 e RILEM56 foram semelhantes entre si, enquanto o método EN/ISO56 se diferenciou dos demais, apresentando menores profundidades de carbonatação.

Figura 4.3 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação – análise global do efeito do condicionamento



O mesmo gráfico da Figura 4.3 pode ser analisado separadamente por cada traço, conforme mostrado na Figura 4.4, onde as linhas contínuas verticais separam as diferentes relações a/lig. e as linhas tracejadas separam em grupos os métodos de condicionamento para cada relação a/lig.

Figura 4.4 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação – análise global do efeito do condicionamento por tipo de concreto



Ao analisar o comportamento de cada concreto por tipo de condicionamento, nota-se que no concreto 40R os condicionamentos ISO28 e EN/ISO56 não apresentaram profundidade de carbonatação em 42 dias de exposição. Segundo da Silva *et al.* (2009), para a recomendação NF EN 13295 (2004) o requerido grau de saturação dos poros é pequeno e isso pode conduzir a um falseamento da constância de massa a uma umidade mais elevada do que aquela especificada pela norma, ocorrendo principalmente em materiais menos porosos.

Assim, entende-se que, para baixas relações a/lig os tipos de condicionamento em ambiente com umidade relativa e temperatura controlada por 14 dias exercem maior influência na profundidade de carbonatação ao apresentar umidades internas mais elevadas do que as ideais para ocorrer a reação de carbonatação, tendendo a menores (ou nenhuma profundidade) a depender das condições da câmara de carbonatação e do tempo de exposição. No caso das condições fixadas para esta pesquisa, os 42 dias de exposição em câmara de carbonatação com 3% de CO₂, 65% de umidade e 22°C não levaram à profundidade de carbonatação do concreto 40R condicionado pela ISO28 e pela EN/ISO56. Por outro lado, a secagem em estufa a 50°C por 14 dias (XP56) e até chegar à massa predeterminada (RILEM56) apresentaram profundidades de carbonatação no concreto 40R, com médias similares, tendo sido considerados estatisticamente iguais.

Para o concreto 55R, de relação a/c intermediária, a influência do tipo de condicionamento não foi tão expressiva, sendo que as médias de cada tipo de condicionamento foram

próximas entre si. Ainda assim, pode-se notar a diferença entre o condicionamento EN/ISO56 e o XP56 e RILEM56. Tanto para esse tipo de concreto (55R) quanto para os concretos 55MK e 70R, o condicionamento ISO28 se assemelha aos condicionamentos XP56 e RILEM56 devido ao fato de ter menor tempo de cura úmida (28 dias) e, portanto, grau de hidratação diferente dos concretos curados por 56 dias, o que leva a maiores porosidades para os concretos curados por 28 dias em relação àqueles curados por 56 dias. Dessa forma, além da influência do condicionamento, existe a influência do tempo de cura na profundidade de carbonatação, sendo que, ao observar o gráfico na Figura 4.4 é possível verificar que, nos concretos com relação a/lig maior do que 0,40, o efeito da cura exerce maior influência na profundidade.

Já nos concretos 55MK e 70R a influência do condicionamento é nítida desde as primeiras medidas de profundidade (14 dias de exposição), onde EN/ISO56 apresenta sempre as menores profundidades de carbonatação, enquanto XP56, RILEM56 e ISO28 apresentam profundidades similares – exceto para o concreto 70R que teve maior influência do condicionamento RILEM56 do que os concretos com menores relações a/lig . Por ser um traço com maior relação a/c , o 70R apresenta maior porosidade e, conseqüentemente, maior quantidade de água evaporável (SANJUÁN; MUÑOZ-MARTIALAY, 1996; KHADRA *et al.*, 2018). Assim, a combinação entre maior porosidade e quantidade de água evaporável leva a uma condição ideal para a difusão e dissolução do CO_2 e, como consequência a maiores profundidades de carbonatação desse traço para o condicionamento RILEM56.

A Tabela 4.2 mostra a análise dos coeficientes de variação da profundidade de carbonatação por tempo de exposição e tipo de condicionamento. É possível notar que aos 14 dias de exposição a dispersão dos resultados é muito alta devido à irregularidade da frente de carbonatação, dificultando a leitura da frente de carbonatação principalmente nos concretos menos porosos (40R), onde as profundidades são menores. Já nas idades posteriores, principalmente aos 42 dias de exposição ao CO_2 , a variabilidade diminui e nota-se uma consolidação dos resultados. Além disso, o coeficiente de variação global do XP56 apresenta uma variabilidade menor nos resultados em relação aos outros métodos (EN56 e RILEM56).

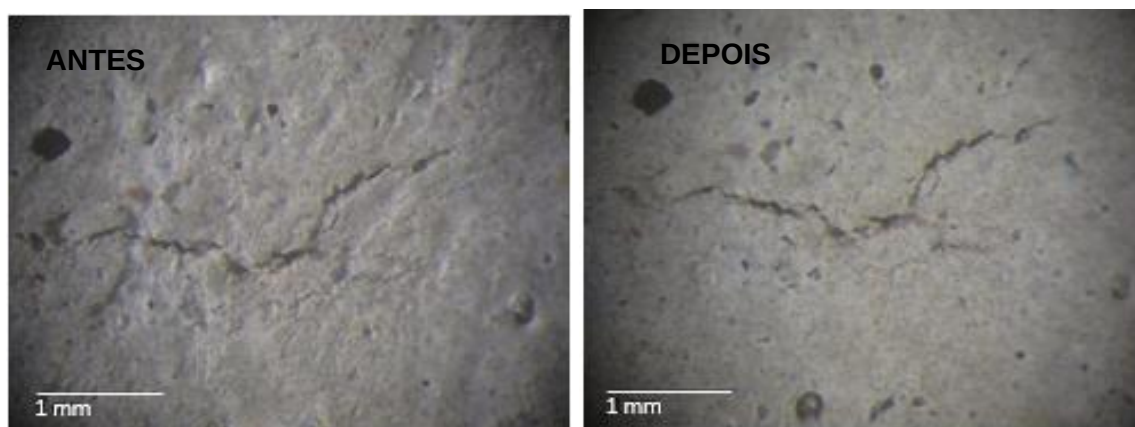
Tabela 4.2 – Média dos coeficientes de variação das medidas de profundidade de carbonatação

Tempo de exposição (dias)	ISO28 (%)	EN/ISO56 (%)	XP56 (%)	RILEM56 (%)
14	31	65	42	44
28	19	33	28	22
42	19	22	25	22
DESV. PAD.	7	22	9	13
CV. GLOBAL	30	56	29	43

A menor variabilidade dos resultados de medida de profundidade de carbonatação para os concretos submetidos ao condicionamento XP56, verificado pelo menor coeficiente de variação global e menor desvio padrão apresentados na Tabela 4.2, indicam que este condicionamento leva a medidas mais confiáveis e precisas.

Alguns autores (RUSSELL *et al.*, 2001; GALLÉ, 2001; BAHADOR; JONG, 2006) explicam que a secagem em estufa pode induzir o surgimento de microfissuras e alterações na porosidade dos materiais cimentícios e, por isso, levam a maiores profundidades de carbonatação. Uma análise feita em lupa estereoscópica nos concretos submetidos ao condicionamento XP56, visando detectar fissuras em nível macro, não se notou o surgimento de novas fissuras e nem o aumento das fissuras já existentes (Figura 4.5). Além disso, outra pesquisa do Grupo de Estudos em Durabilidade (GEDur), desenvolvida por Hilário (em fase de elaboração), estuda a porosidade de diferentes concretos – os mesmos adotados para esta pesquisa – e verificou que em nível micro também não houve fissuras. Portanto, a temperatura de 50°C não foi alta o suficiente para provocar alterações no concreto, tais como fissuras.

Figura 4.5 – Análise na Lupa Estereoscópica – XP56



4.1.5 Umidade Superficial e massa dos corpos de prova durante o condicionamento

Durante a etapa de condicionamento, foram realizadas medidas de massa e umidade superficial nos corpos de prova, a fim de acompanhar a perda de umidade interna ocorrida durante esta etapa. As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam a média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados de massa e umidade superficial, respectivamente, medidos no início e fim do condicionamento. O Anexo F apresenta os resultados individuais destas medidas durante o período de cada tipo de condicionamento, além das medidas de umidade superficial obtidas durante as leituras de profundidade de carbonatação – assunto discutido no item 4.1.6.

Tabela 4.3 – Resultado da medida de massa no início e fim da etapa de condicionamento

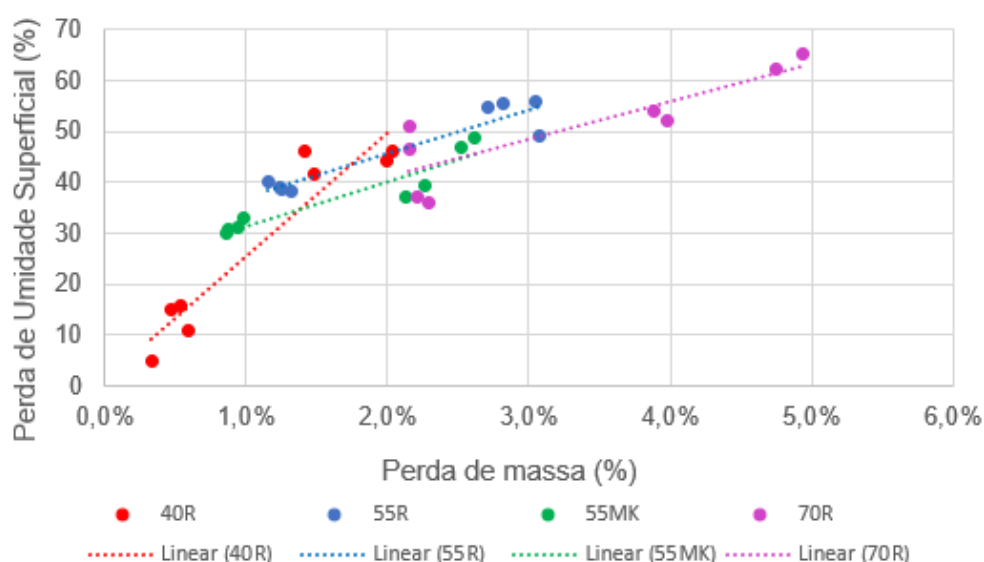
	ISO28				EN/ISO56				XP56				RILEM56			
	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R
Média Início (Kg)	9,66	9,39	9,65	9,36	9,58	9,40	9,55	9,33	9,57	9,38	9,59	9,34	9,61	9,31	9,61	9,41
Média Fim (Kg)	9,62	9,30	9,53	9,16	9,54	9,32	9,43	9,12	9,43	9,17	9,33	8,98	9,42	9,09	9,33	8,96
DV (Kg)	0,03	0,06	0,08	0,14	0,03	0,06	0,09	0,15	0,10	0,15	0,19	0,26	0,13	0,16	0,20	0,32
CV (%)	0,3	0,7	0,9	1,5	0,4	0,6	0,9	1,6	1,0	1,3	2,0	2,8	1,4	1,7	2,1	3,5

Tabela 4.4 – Resultado da medida de umidade superficial no início e fim da etapa de condicionamento

	ISO28				EN/ISO56				XP56				RILEM56			
	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R
Média Início (%)	54	56	78	79	69	65	79	78	69	58	76	74	65	64	71	78
Média Fim (%)	46	24	39	31	54	34	41	41	25	19	21	21	19	16	19	14
DV (%)	6	23	28	34	11	22	27	26	31	27	39	37	32	34	37	45
CV (%)	11	56	48	63	17	43	45	44	66	70	80	79	76	85	82	98

Tendo em vista que a medida de umidade superficial do corpo de prova não é um método utilizado pelas normas de carbonatação acelerada e que mede apenas a umidade da superfície do concreto, buscou-se verificar se essa medida reflete a umidade interna do corpo de prova, ou seja, se acompanha o comportamento da perda de massa em função do condicionamento. Para tal, realizou-se a correlação entre a perda de massa resultante do condicionamento – medida antes do início e ao final do condicionamento – e a perda de umidade superficial medida no mesmo período (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Gráfico da correlação entre a perda de umidade superficial (%) e perda de massa (%) durante os procedimentos de condicionamento



Pelas inclinações das retas (Figura 4.6) é possível notar que o comportamento de perda de umidade também ocorre de maneira diferente ao se comparar os diferentes concretos. A Tabela 4.5 apresenta as equações dessas retas e, pela inclinação da reta (m), apenas os concretos 55R e 55MK apresentaram comportamento similar, com retas paralelas e inclinações semelhantes. Este resultado reforça a afirmativa de Sato (1998) de que as diferentes microestruturas levam a diferentes umidades internas dos corpos de prova após o procedimento de condicionamento.

Tabela 4.5 – Tabela com as equações das retas obtidas com os dados da perda de umidade superficial (%) x perda de massa (%)

Traço	Equação $US = m (\text{massa}) + b$	R^2
40R	$US = 2402,7(\text{massa}) + 1,4$	0,90
55R	$US = 853,04(\text{massa}) + 28,7$	0,88
55MK	$US = 861,77(\text{massa}) + 22,9$	0,88
70R	$US = 743,85(\text{massa}) + 26,0$	0,74

Além disso, os coeficientes de determinação (R^2) gerados pelo comportamento dos pares ordenados indicam uma forte correlação entre a umidade superficial e a massa dos corpos de prova para todos os tipos de concretos. Assim, a medida de umidade superficial pode ser considerada uma forma de estimar a umidade interna do corpo de prova.

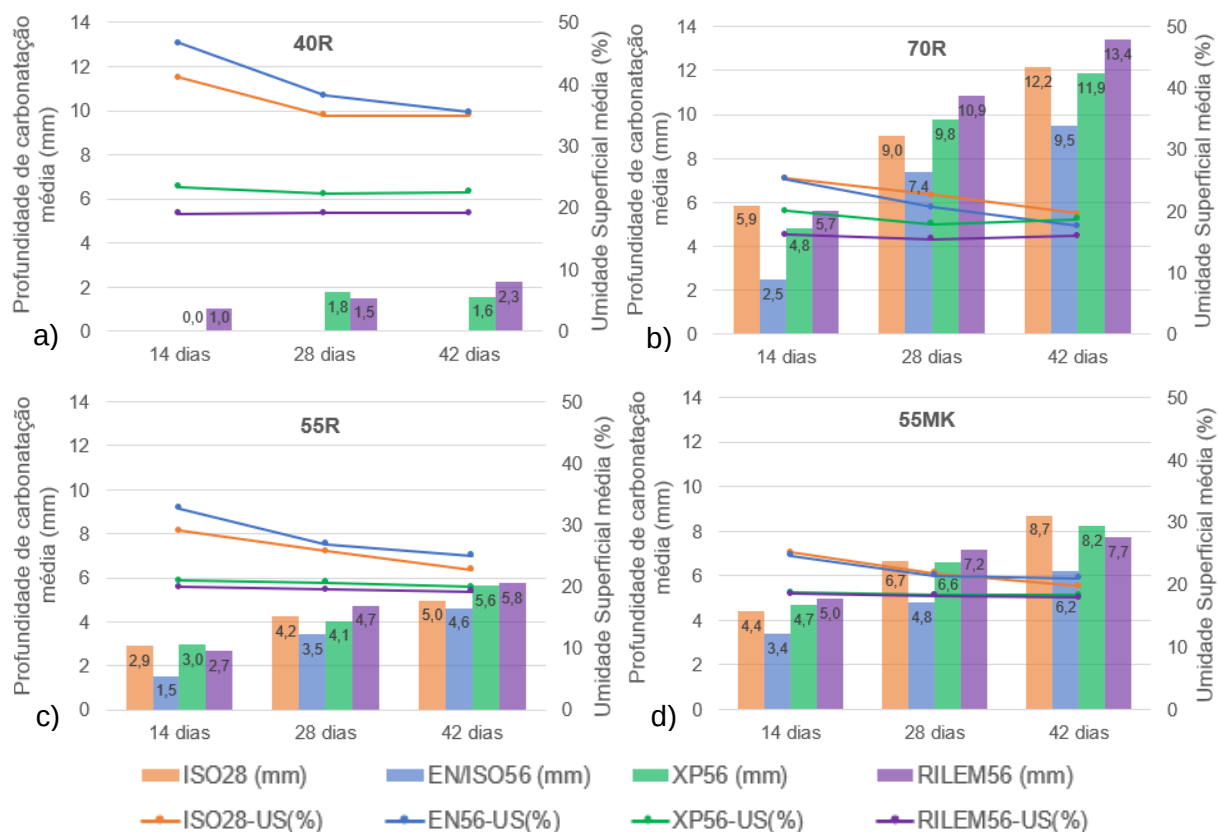
4.1.6 Correlação entre Umidade Superficial e profundidade de carbonatação – durante leituras de profundidade de carbonatação

Como visto na literatura (OLLIVIER; TORRENTI, 2014), o grau de saturação dos poros, principalmente nos que estão próximos à superfície, influencia no mecanismo de difusão do CO_2 , uma vez que o coeficiente de difusão dos gases no ar é cerca de 10.000 vezes maior do que em água. Porém, para que a dissolução do CO_2 ocorra é necessário que haja quantidade suficiente de água no poro. Portanto, para que a carbonatação seja máxima, as condições de saturação devem ser tais que permitam a rápida difusão do gás carbônico juntamente com as condições necessárias para a dissolução deste gás (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Segundo Silva *et al.* (2009), se os corpos de prova apresentam um baixo grau de saturação no momento em que são colocados na câmara de carbonatação, o material absorverá a água durante um certo período até entrar em equilíbrio com a condição da câmara; por outro lado, caso o concreto entre na câmara com grau de saturação maior, o período de perda de água e equilíbrio com as condições da câmara será maior, levando a uma diferença significativa nos resultados.

A Figura 4.7 compara a profundidade de carbonatação durante 14, 28 e 42 dias (representado pelas barras) com a umidade superficial (representado pelas linhas), onde é possível observar que a umidade superficial inicial dos concretos condicionados pela ISO28 e EN56 foi maior e decresceu com o aumento do tempo de exposição de 14 para 42 dias, principalmente para o traço 40R. Isso significa dizer que, durante o ensaio de carbonatação esses concretos continuaram o processo de perda de massa para entrar em equilíbrio com a umidade relativa da câmara de carbonatação. Enquanto os condicionamentos XP56 e RILEM56 tiveram uma umidade superficial inicial menor (cerca de 20%) e constante durante todo o ensaio de carbonatação, para todos os traços.

Figura 4.7 – Gráfico da profundidade de carbonatação (em barras) e umidade superficial (em linhas) dos concretos a) 40R, b) 70R, c) 55R e d) 55MK



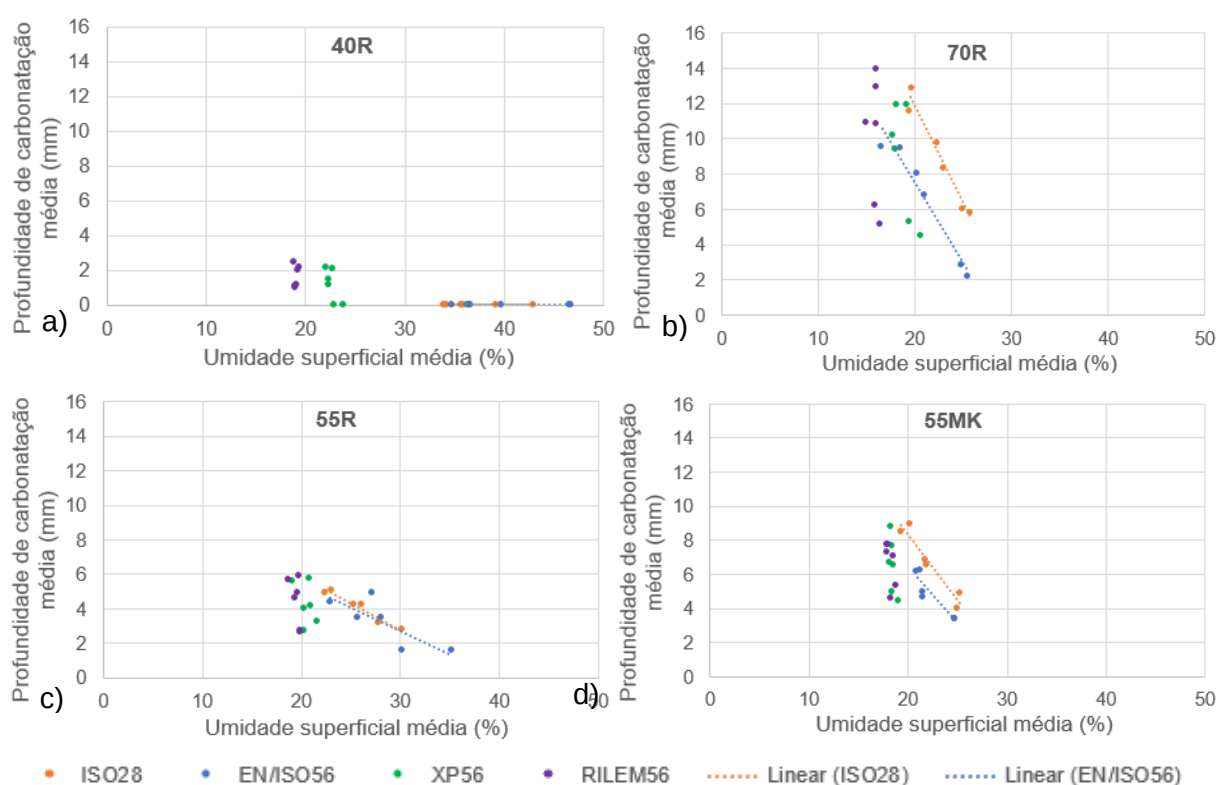
Nesta perspectiva, comparando as profundidades de carbonatação dos concretos condicionados pelo método EN/ISO56 com as dos métodos XP56 e RILEM56, percebe-se menor profundidade para EN/ISO56, principalmente nas primeiras medidas, que pode ser explicada pela maior umidade interna inicialmente encontrada no corpo de prova. Já nos condicionamentos XP56 e RILEM56 a umidade superficial se manteve constante (próximo de 20%) para todos os traços, exceto no 70R – RILEM56, que teve umidade superficial média de 16%.

Em estudo realizado por Russell *et al.* (2001) com o objetivo de avaliar a influência do teor de umidade na permeabilidade ao gás e na taxa de carbonatação, os autores adotaram um condicionamento de secagem em estufa a 40°C durante 1, 2 e 4 semanas para alcançar o equilíbrio entre as umidades dos concretos com 75%, 65% e 55% de umidade relativa, respectivamente. Do mesmo modo, os resultados da Figura 4.7 indicam que todos os concretos condicionados pela ISO28 e pela EN/ISO56, exceto o 40R, tiveram sua umidade superficial próximas do encontrado por XP56 e RILEM56 (em torno de 20%) aos 42 dias. Mostrando, portanto, que a umidade superficial em torno de 20% representa a umidade de equilíbrio dos concretos com 65% de umidade relativa da câmara. E a secagem em estufa a 50°C por 14 dias (XP56) representa o equilíbrio da umidade interna do corpo de prova com

65% de umidade relativa.

Os gráficos de dispersão (Figura 4.8) mostram a tentativa de correlacionar a umidade superficial e a profundidade de carbonatação. Pelas linhas de tendência é possível verificar que os condicionamentos ISO28 e EN/ISO56 apresentam um comportamento decrescente, com R^2 considerável (ver Tabela 4.6), em torno de 0,90; enquanto os condicionamentos XP56 e RILEM56 não apresentaram boa correlação, com R^2 inferior a 0,50 na maioria dos casos.

Figura 4.8 – Relação entre profundidade de carbonatação e umidade superficial dos concretos a) 40R, b) 70R, c) 55R e d) 55MK



Por estarem com umidade superficial constante desde o início do ensaio de carbonatação, os condicionamentos XP56 e RILEM56 não obtiveram boas correlações (R^2). Evidenciando, novamente, que os concretos de métodos ISO28 e EN/ISO56 continuaram perdendo umidade para entrar em equilíbrio com a umidade de 65% da câmara de carbonatação; enquanto XP56 e RILEM56 se mantiveram nas mesmas condições desde o início do ensaio. Além disso, nos gráficos da Figura 4.8 também é possível notar que aos 14 dias de exposição a maior umidade dos concretos submetidos ao EN/ISO56, em comparação com XP56 e RILEM56, tem menores profundidades de carbonatação.

Tabela 4.6 – Tabela com as equações das retas para cada traço e condicionamento e seus respectivos R²

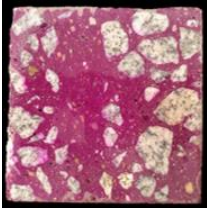
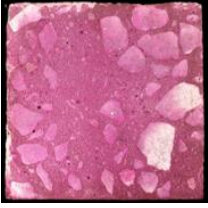
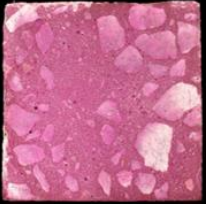
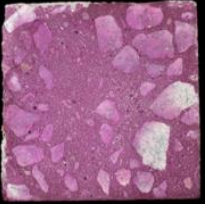
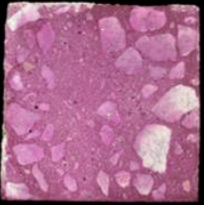
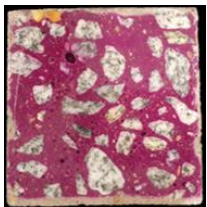
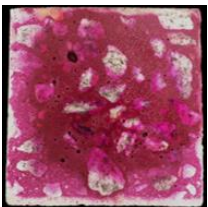
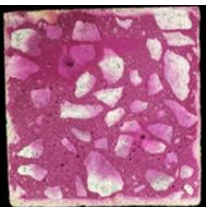
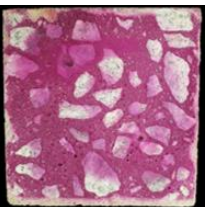
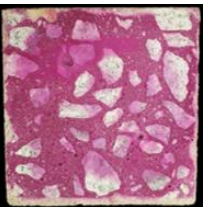
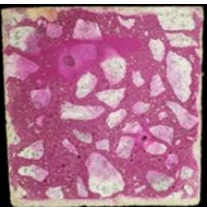
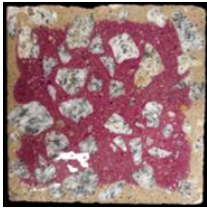
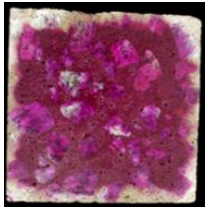
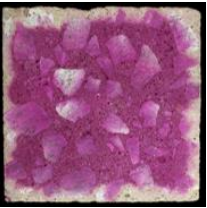
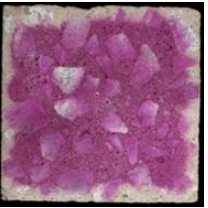
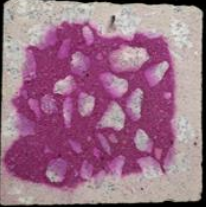
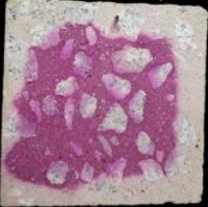
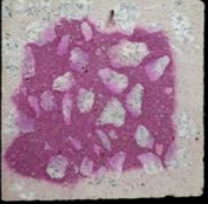
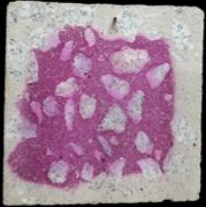
Traço	Precond.	Equação P.C. = m(US) + b	R ²
40R	ISO28	P.C. = 0	-
	EN/ISO56	P.C. = 0	-
	XP56	P.C. = -1,1(US) + 25,6	0,53
	RILEM56	P.C. = 1,0(US) - 17	0,09
55R	ISO28	P.C. = -0,3(US) + 12,1	0,95
	EN/ISO56	P.C. = -0,3(US) + 10,8	0,65
	XP56	P.C. = -0,6(US) + 16	0,16
	RILEM56	P.C. = -1,9(US) + 41,1	0,36
55MK	ISO28	P.C. = -0,8(US) + 23,7	0,92
	EN/ISO56	P.C. = -0,6(US) + 19,3	0,83
	XP56	P.C. = -3,3(US) + 68,3	0,39
	RILEM56	P.C. = -2,1(US) + 45,7	0,32
70R	ISO28	P.C. = -1,1(US) + 33,6	0,96
	EN/ISO56	P.C. = -0,9(US) + 25,6	0,96
	XP56	P.C. = -2,1(US) + 49,3	0,53
	RILEM56	P.C. = -2,3(US) + 47	0,09

4.1.7 Análise do tempo de espera entre aplicação do indicador de pH e medida de profundidade de carbonatação

A revisão da literatura mostrou que uma discussão qualitativa sobre a influência do tempo de espera, após a aplicação do indicador de pH, para realizar as medidas de profundidade de carbonatação ainda não foi realizada. Alguns autores correlacionaram os resultados obtidos em diferentes tempos de espera (CASTRO, 2003; CHANG; CHEN, 2006), apontando que não há necessidade de esperar 24h para realizar as medidas de profundidade de carbonatação, como preconiza a RILEM CPC-18 (1988). Além disso, outras normas internacionais sobre o ensaio acelerado de carbonatação definem tempos de espera diferentes, como é o caso das normas NF EN 13295 (2004) – aproximadamente 60 min – e ISO 1920-12 (2015) – até estabilização de cor.

Porém, a análise qualitativa obtida a partir de fotos (Figura 4.9) tiradas do momento da aplicação da fenolftaleína até 24h depois, indica que há uma faixa carbonatada que fica “borrada” até cerca de uma hora após a aplicação do produto. Isto interfere principalmente nas leituras de concretos menos porosos – como é o caso do 40R, que já apresentam menores profundidades de carbonatação e que logo após a aplicação da fenolftaleína podem ter a camada carbonatada “borrada”, dificultando a leitura com paquímetro nos primeiros minutos após aplicação.

Figura 4.9 – Aplicação da fenolftaleína e análise do tempo para realização das medidas

Traço	Período que a foto foi tirada quando da aplicação da fenolftaleína					
	Início	2 min	10 min	1 hora	2,5 / 3 horas	24 horas
40R RILEM56 – 14 dias						
55R RILEM56 – 14 dias						
55MK XP56 – 28 dias						
70R XP56 – 42 dias						

Uma alternativa à medida da profundidade de carbonatação com o uso do paquímetro é a leitura através de imagem. O método de imagem consiste em tirar uma foto do corpo de prova após a aplicação da fenolftaleína e, com uma escala de referência (uma régua, por exemplo), medir, posteriormente, a profundidade com ajuda de um *software* como, por exemplo, o AutoCAD. Ferreira (2013) realizou os dois métodos de medida, pelo paquímetro e por imagem com ajuda do *software* AutoCAD, a fim de comparar os resultados e analisar se havia diferença significativa entre os métodos. Os resultados obtidos pelo autor mostram uma boa correlação entre os métodos, com $R^2 = 0,98$.

Outros autores também realizaram medidas pelo método de imagem (KULAKOWSKI, 2002; HOPPE FILHO, 2008; PAULETTI, 2009; PERIM, 2013; PIRES, 2016). Este é um método interessante do ponto de vista prático, pois a foto pode ser armazenada e a medida pode ser realizada posteriormente, com possibilidade de repetição das medidas ou análise de eventuais dúvidas a qualquer momento. Além disso, as medidas por imagem levam a uma

maior precisão ao poder registrar o instante da aplicação da fenolftaleína (“Início”) e armazenar esse momento para posteriores medidas, gerando menor dúvida quanto às medidas de profundidade de carbonatação.

4.1.8 Discussão global sobre os métodos de condicionamentos

O presente tópico discute sobre as principais vantagens e desvantagens de cada método, considerando não apenas os resultados obtidos como também a execução e particularidades de cada método. A Tabela 4.7 mostra um resumo da metodologia de cada método.

Tabela 4.7 – Resumo da metodologia abordada por cada método de condicionamento

Método	Código	Idade cura do início do ensaio (dias)	UR (%)	T (°C)	Tempo (dias)	Procedimento	Critérios
ISO 1920-12 (2015)	ISO28	28	50-70	18-29	14	Exposição em câmara climática	Tempo de 14 dias
NF EN 13295 (2004)	EN/ISO56	56	60±10	21±2	Variável	Exposição em câmara climática	Constância de massa (0,2%)
XP P 18-458 (2008)	XP56	56	-	50	16	Imersão em água e exposição em estufa	Em água: 2 dias Em estufa: 14 dias
RILEM TC 116-PDC (1999)	RILEM56	56	-	1°) 105 2°) 50	Variável Variável	Estufa Estufa	Constância de massa

Como discutido anteriormente (em 4.1.4), o método de condicionamento influencia no grau de saturação dos concretos e, conseqüentemente, nos resultados de profundidade de carbonatação. Além disso, cada método de condicionamento apresenta particularidades em sua execução. A Tabela 4.8 apresenta um resumo do que foi discutido anteriormente sobre as vantagens e desvantagens de cada método e os resultados que foram gerados a partir deles.

Tabela 4.8 – Vantagens e desvantagens dos métodos de condicionamentos realizados

Tipo de acond.	Duração do acond.	Profundidades de carbonatação	Umidade ao longo do ensaio	CV global da profund. de carbonatação (pg. 69)
ISO 1920-12 (2015)	Rápido, 14 dias	Menor, devido ao maior grau de saturação	Inicialmente alta e reduz ao longo do tempo	Maior
NF EN 13295 (2004)	Rápido, 14 dias	Menor, devido ao maior grau de saturação	Inicialmente alta e reduz ao longo do tempo	Maior
XP P 18-458 (2008)	Rápido, 16 dias	Maior, devido ao equilíbrio de umidade	Constante	Menor
RILEM TC 116-PDC (1999)	Demorado, mais de 30 dias	Maior, devido ao equilíbrio de umidade	Constante	Maior

Os condicionamentos EN/ISO56 e ISO28 apesar de serem fáceis de realizar, podem exigir equipamentos que auxiliem na manutenção da umidade relativa e temperatura do ambiente ao qual os concretos estão inseridos, pois em cidades como Goiânia, a umidade relativa e temperatura do ambiente podem se encontrar fora dos limites definidos pelas normas. Além disso, como visto na discussão dos resultados e na Tabela 4.7, esses dois métodos de condicionamento levam a uma umidade interna do concreto inicialmente alta e que reduz ao longo do tempo, levando à menores profundidades de carbonatação.

O condicionamento conforme RILEM TC 116-PDC (1999) é um método demorado e composto por muitas etapas, aumentando o tempo de duração do ensaio de carbonatação acelerada e podendo conduzir a mais erros nos resultados. Além disso necessita de um pré-ensaio que é destrutivo e, portanto, deve-se moldar corpos de provas além daqueles que serão utilizados na carbonatação acelerada.

Já o método da norma XP P 18-458 (2008) é um método rápido, de fácil execução ao considerar apenas duas etapas (imersão e estufa) por tempo determinado, além de levar o concreto a um estado de equilíbrio entre umidade interna e umidade relativa em torno de 65%, ideal para realização do ensaio de carbonatação acelerada. Além disso, é um método simples de ser executado e que não necessita de muitos equipamentos.

Outro fator que precisa ser discutido é a forma como foi realizado o corte para retirar as fatias dos corpos de prova de concreto visando realizar as medidas de profundidade de carbonatação. O corte refrigerado com água poderia, eventualmente, levar a alterações no estado de umidade interna do corpo de prova, alterando o condicionamento. No entanto, ficou comprovado, por meio dos resultados de análise da umidade superficial do concreto que

não houve influência do método de corte na umidade dos corpos de prova, visto que a umidade interna se manteve constante nos concretos condicionados pelos métodos XP P 18-458 (2008) e RILEM TC 116- PDC (1999) e foi reduzindo ao longo do tempo de ensaio de carbonatação acelerada para os concretos condicionados pelos métodos ISO 1920-12 (2015) e NF EN 13295 (2004).

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais da pesquisa, com as conclusões obtidas a partir dos resultados e do objetivo proposto para o presente trabalho. Por fim, faz-se a apresentação de algumas sugestões coletadas durante a pesquisa que podem servir para a continuação deste estudo.

5.1 CONCLUSÕES

O ensaio de carbonatação acelerada com vistas à obtenção de parâmetros de medida da durabilidade de concretos sujeitos à carbonatação natural tem uma vasta variabilidade no que tange aos métodos empregados, inclusive variações entre diferentes normas internacionais. Assim, a discussão acerca dessas metodologias do ensaio acelerado de carbonatação, empregadas em diversas pesquisas e normalizações, é necessária para o respaldo da norma brasileira sobre carbonatação acelerada que está em andamento. A partir das análises feitas durante esta pesquisa foram obtidas as seguintes conclusões acerca da influência do tipo de condicionamento e análises complementares sobre o ensaio de carbonatação acelerada:

- A influência do condicionamento pode variar de acordo com o tipo de concreto. Para o traço 40R o condicionamento ISO28 se comportou diferente em relação aos outros traços devido à menor porosidade deste concreto; enquanto no traço 70R o condicionado RILEM56 apresentou as maiores profundidades e se diferenciou do comportamento obtido para os outros traços, também devido à sua porosidade, que, nesse caso, é maior do que os outros concretos;
- Os diferentes métodos de condicionamento não permitem o equilíbrio de umidade interna dos corpos de prova de forma igualitária e essa umidade interfere na profundidade de carbonatação. Os condicionamentos EN/ISO56 e ISO28 levam o concreto a uma umidade superficial de partida maior do que os condicionamentos XP56 e RILEM56, sendo que ao final do ensaio (42 dias) os quatro condicionamentos apresentavam umidade superficial similares e próximas a 20%. Portanto, a umidade superficial em torno de 20% indica a umidade de equilíbrio dos corpos de prova com 65% de umidade relativa da câmara;
- Os 14 dias de condicionamento estipulado pela norma ISO 1920-12 (2015) e encontrado nesta pesquisa como sendo o tempo de ensaio pelo método NF EN 13295

(2004) não são suficientes para o equilíbrio de umidade do concreto com 65% de umidade relativa, principalmente para concretos de microestrutura mais compacta e menos porosa por apresentarem menor quantidade de água evaporável e, portanto, necessitam de mais tempo para o equilíbrio de umidade. Enquanto os condicionamentos XP56 e RILEM56 estavam em equilíbrio com a umidade interna da câmara de carbonatação, indicado pela umidade superficial constante, durante todo o tempo de ensaio. Além disso, pela comparação múltipla de médias eles são considerados iguais, exceto no concreto 70R;

- Pela análise global dos coeficientes de variação dos resultados de profundidade de carbonatação dos concretos, conclui-se que os condicionamentos ISO28 e XP56 apresentam menores variabilidades de maneira geral, o que sugere resultados mais precisos do que os outros métodos;
- Considerando a facilidade de execução do método de condicionamento, o menor tempo de duração dessa etapa e os resultados obtidos nesta pesquisa, o método XP56 se mostrou o mais indicado, visto que a umidade interna obtida por esse método não influenciou nos resultados de carbonatação e as medidas foram mais padronizadas;
- As medidas de umidade superficial apresentaram boas correlações com as medidas de massa dos concretos. Essa medida de massa é utilizada para representar a umidade interna do concreto, sendo assim, o método utilizado nesta pesquisa para medida da umidade superficial permite estimar a umidade interna do concreto e, além disso, possui as vantagens de ser um método simples, barato e não destrutivo, com fácil obtenção do resultado;
- As fotografias obtidas das faces dos corpos de prova após a aplicação da fenolftaleína mostram que a coloração do concreto, mediante alterações do pH (faixa de viragem), pode se alterar nos primeiros minutos após a aplicação, apresentando uma faixa “borrada” onde anteriormente se apresentava incolor; assim, as medidas de profundidade podem ser afetadas por esta faixa “borrada”. Após aproximadamente 1 hora do momento da aplicação a frente de carbonatação se torna mais nítida e, assim, o momento para a medida da profundidade de carbonatação com paquímetro é melhor. Porém, o método de medida por imagem pode ser realizado no momento da aplicação do indicador de pH, o que favorece a precisão das medidas e redução da chance de erros devido a possibilidade de analisar a foto a qualquer momento, além de possibilitar maior agilidade no laboratório.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo da pesquisa surgiram algumas questões envolvendo o procedimento de ensaio de carbonatação acelerada e métodos para acompanhamento do comportamento do concreto frente à etapa de condicionamento. Elas merecem atenção para aprofundamento em trabalhos futuros:

- Comparar os métodos de medida de profundidade das diferentes normas internacionais a fim de propor para a normalização um método mais simples, fácil e preciso;
- Avançar na compreensão do comportamento da umidade interna do corpo de prova utilizando outras técnicas de acompanhamento de umidade.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15575-1**: Edificações Habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013, 238 p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014, 238 p.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015, 9 p.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018, 12 p.

_____. **NBR NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002, 23 p.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998, 8 p.

ABREU, A. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. 2004. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

AFNOR, ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION – **NF EN 13295**: Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la résistance à la carbonatation. Saint-Denis, 2004, 14 p.

_____. **XP P 18-458**: Essai pour béton durci – Essai de carbonatation accélérée – Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté. Toulouse, 2008, 12 p.

AHMED, M.; BENHARZALLAH, K. Effect of the carbonatation and the type of cement (CEM I, CEM II) on the ductility and the compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 874-886, 2017.

AÏT-MOKHTAR, A.; BELARBI, R.; BENBOUDJEMA, F.; BURLION, N.; CAPRA, B.; CARCASSÈS, M.; COLLIAT, J. B.; CUSSIGH, F.; DEBY, F.; JACQUEMOT, F.; DE LARRARD, T.; LATASTE, J. F.; LE BESCOP, P.; PIERRE, M.; POYET, S.; ROUGEAU, P.; ROUGELOT, T.; SELLIER, A.; SÉMÉNADISSE, J.; TORRENTI, J. M.; TRABELSI, A.; TURCRY, P.; YANEZ-GODOY, H. Experimental investigation of the variability of concrete durability properties. **Cement and Concrete Research**, v. 45, p. 21-36, 2013.

ALMEIDA, M. A. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade e do transporte de fluidos em concretos contendo adições minerais**. 2016, 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **E 178-08**: Standard Practice for Dealing With Outlying Observations. West Conshohocken, 2008.

ATIS, C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 17, p. 147-152, 2003.

AUROY, M.; POYET, S.; LE BESCOP, P.; TORRENTI, J. M.; CHARPENTIER, T.; MOSKURA,

M.; BOURBON, X. Comparison between natural and accelerated carbonation (3% CO₂): Impact on mineralogy, microstructure, water retention and cracking. **Cement and Concrete Research**, v. 109, p. 64-80, 2018.

BAHADOR, S.; JONG, H. C. Effect of preconditioning of concrete under accelerated test. *In*: 31^o OUR WORLD IN CONCRETE AND STRUCTURE, 2006, Singapore. **Proceedings...** Singapore, 2006. p. 127-134.

BARIN, D. S. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico**. 2008. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimentos. *In*: OLLIVIER, J. P. e VICHOT, A. (Ed.). **Durabilidade do Concreto**: bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. CASCUDO, O.; CARASEK, H. (Ed. Trad.). São Paulo: IBRACON, 2014. p.255-326.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CUSSIGH, F.; ROUGEAU, P. Durabilidade dos concretos a partir da abordagem do desempenho. *In*: OLLIVIER, J. P. e VICHOT, A. (Ed.). **Durabilidade do Concreto**: bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. CASCUDO, O.; CARASEK, H. (Ed. Trad.). São Paulo: IBRACON, 2014. p.237-254.

BASHEER, L.; BASHEER, P. A. M.; LONG, A. E. Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 19, p. 682–690, 2005.

BAUER, E.; NEPOMUCENO, A. A.; POZZAN, E. Caracterização da estrutura de poros em microestruturas carbonatadas, e sua relação com alguns mecanismos de transporte. *In*: II Workshop sobre Durabilidade das Construções, São José dos Campos, 2002. **Anais...** São José dos Campos, 2002.

BERNAL, S. A.; GUTIÉRREZ, R. M.; PROVIS, J. L. Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends. **Construction and Building Materials**, v. 33, p. 99–108, 2012.

BERNAL, S. A.; GUTIERREZ, R. M.; PROVIS, J. L.; ROSE, V. Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 898–907, 2010.

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

BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; GUTIÉRREZ, R. M.; DEVENTER, J. S. J. Accelerated carbonation testing of alkali-activated slag/ metakaolin blended concretes: effect of exposure conditions. **Materials and Structures**, v. 48, p. 653-669, 2015.

CADORE, W. W. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. 2008. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CARRASCO, L. F.; MARTÍN, D. T.; RAMÍREZ, S. M. Carbonation of ternary building cementing materials. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, p. 1180–1186, 2012.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da Carbonatação no Concreto. *In*: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Ed. São Paulo: IBRACON, cap.24, vol 1, p. 849-885, 2011.

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

CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. **Materials and Structures**, v. 42, p. 515-525, 2009.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação**. 2003, 215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CEUKELAIRE, L.; NIEUWENBURG, D. V. Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 442-452, 1993.

CHAN, S. Y. N.; DHIR, R. K.; CHANG, Y. Superplasticized normal workability concrete: permeation and durability properties. **HKIE Transactions**, v. 1, n. 1, p. 19-27, 1994.

CHANG, C. F.; CHEN, J. W. The experimental investigation of concrete carbonation depth. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1760-1767, 2006.

CHANG, J. J.; YEIH, W.; HUANG, R.; CHEN, C. T. Suitability of several current used concrete durability indices on evaluating the corrosion hazard for carbonated concrete. **Materials Chemistry and Physics**, v. 84, p. 71-78, 2004.

CHEN, S.; SUN, W.; ZHANG, Y.; GUO, F. Carbonation depth prediction of fly ash concrete subjected to 2- and 3-dimensional CO₂ attack. **Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China**, v. 2, n. 4, p. 395-400, 2008.

CHENG, S.; SHUI, Z.; SUN, T.; YU, R.; ZHANG, G.; DING, S. Effects of fly ash, blast furnace slag and metakaolin on mechanical properties and durability of coral sand concrete. **Applied Clay Science**, v. 141, p. 111-117, 2017.

CHENG, Y.; ZHANG, Y.; JIAO, Y.; YANG, J. Quantitative analysis of concrete property under effects of crack, freeze-thaw and carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 129, p. 106-115, 2016.

CUI, D.; SUN, W.; BANTHIA, N. Use of tomography to understand the influence of preconditioning on carbonation tests in cement-based materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 88, p. 52-63, 2018.

CUI, H.; TANG, W.; LIU, W.; DONG, Z.; XING, F. Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 522-527, 2015.

CUNHA, Q., A. C.; HELENE, P. R. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. São Paulo, EPUSP, 2001. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/283).

DÉROBERT, X.; VILLAIN, G. Effect of water and chloride contents and carbonation on the

electromagnetic characterization of concretes on the GPR frequency band through designs of experiment. **NDT and E International**, v. 92, p. 187-198, 2017.

DONG, B.; QIU, Q.; GU, Z.; XIANG, J.; HUANG, C.; FANG, Y.; XING, F.; LIU, W. Characterization of carbonation behavior of fly ash blended cement materials by the electrochemical impedance spectroscopy method. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 118-127, 2016.

DONG, B.; QIU, Q.; XIANG, J.; HUANG, C.; SUN, H.; XING, F.; LIU, W. Electrochemical impedance interpretation of the carbonation behavior for fly ash–slag–cement materials. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 933-942, 2015.

DONG, B.; QIU, Q.; XIANG, J.; HUANG, C.; XING, F.; HAN, N.; LU, Y. Electrochemical impedance measurement and modeling analysis of the carbonation behavior for cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 558-565, 2014.

DUAN, P.; SHUI, Z.; CHEN, W.; SHEN, C. Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2, n. 1, p. 52-59, 2013.

DUPRAT, F.; VU, N. T.; SELLIER, A. Accelerated carbonation tests for the probabilistic prediction of the durability of concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 597-605, 2014.

FATTUHI, N. I. Concrete carbonation as influenced by curing regime. **Cement and Concrete Research**, v. 18, p. 426-430, 1988.

FRÍAS, M.; GOÑI, S. Accelerated carbonation effect on behaviour of ternary Portland cements. **Composites: Part B**, v. 48, p. 122-128, 2013.

GALAN, I.; ANDRADE, C.; MORA, P.; SANJUAN, M. A. Sequestration of CO₂ by Concrete Carbonation. **Environmental Science and Technology**, v.44, p. 3181-3186, 2010.

GALLÉ, C. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1467-1477, 2001.

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

GHANTOUS, R. M.; POYET, S.; L'HOSTIS, V.; TRAN, N.; FRANÇOIS, R. Effect of accelerated carbonation conditions on the characterization of load-induced damage in reinforced concrete members. **Materials and Structures**, v. 50, n. 3, p. 1-10, 2017.

GONEN, T.; YAZICIOGLU, S. The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1040–1045, 2007.

GRIST, E. R.; PAINE, K. A.; HEATH, A.; NORMAN, J.; PINDER, H. Structural and durability properties of hydraulic lime–pozzolan concretes. **Cement & Concrete Composites**, v. 62, p. 212–223, 2015.

GRUYAERT, E.; HEDE, P. V. D.; BELIE, N. Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient – Effect of carbonation on the pore structure. **Cement & Concrete Composites**, v. 35, p. 39-48, 2013.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 1993.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction. **Cement and Concrete Research**, v. 17, p. 489-504, 1987.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. 298 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2008.

ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1920-12: Testing of concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method**. Switzerland, 2015, 12 p.

JONES, M. R.; DHIR, R. K.; MAGEE, B. J. Concrete containing ternary blended binders: resistance to chloride ingress and carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 6, p. 825-831, 1997.

KHADRA, M.; ROUGELOT, T.; CARLIER, J. P.; BURLION, N.; LATASTE, J. F. First cycle of desorption and sorption isotherms of carbonated and non-carbonated mortars and concretes using accelerated protocol. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 22, n. 12, p. 1468-1481, 2018.

KAZMIERCZAK, C. S.; LINDENMEYER, Z. Comparação entre metodologias utilizadas para a determinação da profundidade de carbonatação em argamassas. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, Florianópolis, 1996. **Proceedings**. Florianópolis, 1996. p. 402-413.

KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 744-753, 2006.

KIM, H. S.; LEE, S. H.; MOON, H. Y. Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1229-1237, 2007.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar**. 2008. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

KULAKOWSKI, M. P.; PEREIRA, F. M.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1189-1195, 2009.

KULAKOWSKI, M. V. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LAZAR, I. P. **Evaluation du comportement en service des ouvrages en beton arme soumis a la corrosion des aciers**. 2000. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Université Laval, Quebec, 2000.

LEEMANN, A.; NYGAARD, P.; KAUFMANN, J.; LOSER, R. Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete. **Cement & Concrete**

Composites, v. 62, p. 33-43, 2015.

LO, Y.; LEE, H. M. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy. **Building and Environment**, v. 37, p. 507-514, 2002.

MCPOLIN, D. O.; BASHEER, P. A. M.; LONG, A. E. Carbonation and pH in Mortars Manufactured with Supplementary Cementitious Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, p. 217-225, 2009.

MCPOLIN, D. O.; BASHEER, P. A. M.; GRATTAN, K. T. V.; LONG, A. E.; SUN, T.; XIE, W. Preliminary Development and Evaluation of Fiber-Optic Chemical Sensors. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 8, p. 1200–1210, 2011.

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

MIKHAILENKO, P.; CASSAGNABÈRE, F.; EMAM, A.; LACHEMI, M. Influence of physico-chemical characteristics on the carbonation of cement paste at high replacement rates of metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 164–172, 2018.

MIRANDA, L. R. M. **Carbonatação em concretos autoadensáveis com substituições de cimento portland por adições minerais**. 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

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

MORANDEAU, A.; THIÉRY, T.; DANGLA, P. Impact of accelerated carbonation on OPC cement paste blended with fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 226–236, 2015.

NEVES JÚNIOR, A.; DWECK, J.; TOLEDO FILHO, R. D.; ELLIS, B.; LI, V. Determination of CO₂ capture during accelerated carbonation of engineered cementitious composite pastes by thermogravimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 138, p. 97–109, 2019.

NEVES, R.; FONSECA, B. S.; BRANCO, F.; BRITO, J.; CASTELA, A.; MONTEMOR, M. F. Assessing concrete carbonation resistance through air permeability measurements. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 304–309, 2015.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 3ª. ed. Nova York: Longman Scientific & Technical, 1981.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2ª. ed. Nova York: Pearson, 2010.

NICOLAS, R. S.; CYR, M.; ESCADEILLAS, G. Performance-based approach to durability of concrete containing flash-calcined metakaolin as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 313–322, 2014.

NORDTEST METHOD. **NT BUILD 357: Concrete, repairing materials and protective coating**: Carbonation resistance. Espoo, 1989, 3 p.

OLLIVIER, J. P.; TORRENTI, J. M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: OLLIVIER, J. P. e VICHOT, A. (Ed.). **Durabilidade do Concreto**: bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. CASCUDO, O.; CARASEK, H. (Ed. Trad.). São Paulo: IBRACON, 2014. p.41-112.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1348-1356, 2007.

PAPADAKIS, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 291-299, 2000.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem. **Chemical Engineering Science**, v. 46, n. 5/6, p. 1333-1338, 1991.

PARROT, L. J. Moisture conditioning and transport properties of concrete test specimens. **Materials and Structures**, v. 27, p. 460-468, 1994.

PASSOS, P. M. **Influência das características microestruturais de diferentes metacaulins nas propriedades e microestrutura de concretos**. 2019. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

PAULA, M. C. **Avaliação da durabilidade dos concretos fornecidos por centrais dosadoras**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 2004. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

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

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C.. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, p. 7-20, 2007.

PEREIRA, F. C. **Estudo da carbonatação de concretos com adição de nanosílica**. 2019. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

PERIM, J. R. **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada**. 2013. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

PIRES, P. F. **Estudo da carbonatação avançada em concretos contendo adições minerais**. 2016. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 2004. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POSSAN, E.; THOMAZ, W. A.; ALEANDRI, G. A.; FELIX, E. F.; SANTOS, A. C. P. CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 6, p. 147-161, 2017.

QIU, Q.; GU, Z.; XIANG, J.; HUANG, C.; HONG, S.; XING, F.; DONG, B. Influence of slag incorporation on electrochemical behavior of carbonated cement. **Construction and Building**

Materials, v. 147, p. 661-668, 2017.

RABEHI, M.; MEZGHICHE, B.; GUETTALA, S. Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 123–129, 2013.

RILEM, RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX, SYSTÈMES DE CONSTRUCTION ET OUVRAGES. **CPC-18**: Measurement of hardened concrete carbonation depth. 1988, 3 p.

_____. **TC 116-PCD**: Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete. **Materials and Structures**, v. 32, p. 174-179, 1999.

ROUGEAU, P. **Les résultats d'essais croisés AFREM**: "Essai de carbonatation accélérée". n: Comptes-Rendu des Journées Techniques - AFPC-AFREM DURABILITE DES BETONS. Toulouse: Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, v. p. 87-103, 1997.

ROY, S. K.; POH, K. B.; NORTHWOOD, D. O. Durability of concrete—accelerated carbonation and weathering studies. **Building and Environment**, v. 34, p. 486-595, 1999.

RUSSELL, D.; BASHEER, P. A. M.; RANKIN, G. I. B.; LONG, A. E. Effect of relative humidity and air permeability on prediction of the rate of carbonation of concrete. **Structures & Buildings**, v. 146, p. 319–326, 2001.

SALVOLDI, B. G.; BEUSHAUSEN, H.; ALEXANDER, M. G. Oxygen permeability of concrete and its relation to carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 30–37, 2015.

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

SANJUÁN, M. A.; MUÑOZ-MARTIALAY, R. Oven-drying as a preconditioning method for air permeability test on concrete. **Materials Letters**, v. 27, p. 263-268, 1996.

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

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. 1998. 163 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SHI, Z.; LOTHENBACH, B.; GEIKER, M. R.; KAUFMANN, J.; LEEMANN, A.; FERREIRO, S.; SKIBSTED, J. Experimental studies and thermodynamic modeling of the carbonation of Portland cement, metakaolin and limestone mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 88, p. 60–72, 2016.

SILVA, F. G.; HELENE, P.; CASTRO-BORGES, P.; LIBORIO, J. B. L. Sources of Variations When Comparing Concrete Carbonation Results. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 7, p. 333-342, 2009.

SILVA, V. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa**. 2002. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SISOMPHON, K.; FRANKE, L. Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1647–1653, 2007.

SONG, H. W.; KWON, S. J.; BYUN, K. J.; PARK, C. K. Predicting carbonation in early-aged cracked concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 979–989, 2006.

SULAPHA, P.; WONG, S. F.; WEE, T. H.; SWADDIWUDHIPONG, S. Carbonation of Concrete Containing Mineral Admixtures. **Journal of Materials in civil engineering**, v. 15, p. 134–143, 2003.

TEODORO, R. **Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade**. 2016. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

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.

THIERY, M.; VILLAIN, G.; DANGLA, P.; PLATRET, G. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1047–1058, 2007.

TIAN, Y.; PENG, B.; YANG, T.; DING, Q.; HU, S. Influence of Curing Condition on the Mechanical Properties and Durability of High Strength Concrete. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 7, n. 6, p. 417–424, 2014.

TURCRY, P.; OKSRI-NELFIA, L.; YOUNSI, A.; AÏT-MOKHTAR, A. Analysis of an accelerated carbonation test with severe preconditioning. **Cement and Concrete Research**, v. 57, p. 70–78, 2014.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Ed. São Paulo: IBRACON, cap.12, vol 1, 2011.

VAGHETTI, M. A. O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais**. 2005. 264 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

VEJMELOVÁ, E.; PAVLÍKOVÁ, M.; KEPPERT, M.; KERŠNER, Z.; ROVNANÍKOVÁ, P.; ONDRÁČEK, M.; SEDLMAJER, M.; ČERNÝ, R. High performance concrete with Czech metakaolin: Experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1404–1411, 2010.

VILLAIN, G.; THIERY, M. Gammadensimetry: A method to determine drying and carbonation profiles in concrete. **NDT&E International**, v. 39, p. 328–337, 2006.

VILLAIN, G.; THIERY, M.; PLATRET, G. Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1182–1192, 2007.

WAN, K.; XU, Q.; WANG, Y.; PAN, G. 3D spatial distribution of the calcium carbonate caused by carbonation of cement paste. **Cement & Concrete Composites**, v. 45, p. 255–263, 2014.

WANG, Y.; NANUKUTTAN, S.; BAI, Y.; BASHEER, P. A. M. Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 173–183, 2017.

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, p. 213-228, 2011.

WOLF, J. **Influência do teor de calcário na carbonatação de argamassas de cimento branco**. 2010. 239 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

YOUNSI, A.; TURCRY, P.; AÏT-MOKHTAR, A.; STAQUET, S. Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interactions between hydration and drying. **Cement and Concrete Research**, v. 43, p. 25–33, 2013.

YOUNSI, A.; TURCRY, P.; ROZIÈRE, E.; AÏT-MOKHTAR, A.; LOUKILI, A. Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 993–1000, 2011.

YUE, Y.; WANG, J. J.; BASHEER, P. A. M.; BOLAND, J. J.; BAI, Y. A Raman spectroscopy based optical fibre system for detecting carbonation profile of cementitious materials. **Sensors and Actuators B**, v. 257, p. 635–649, 2018.

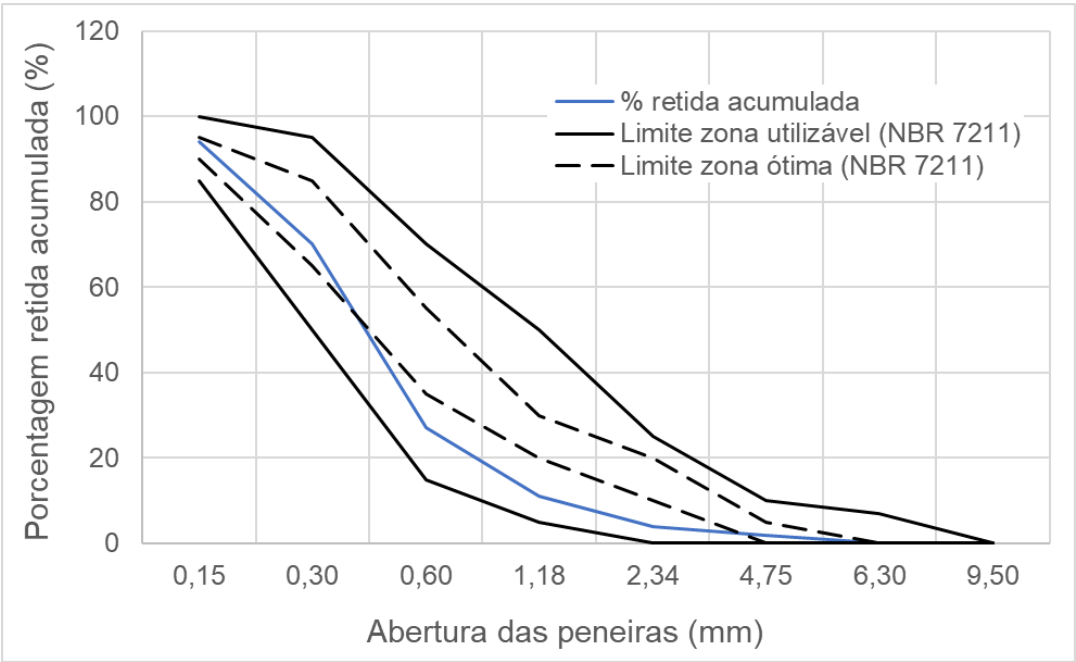
ZHANG, P.; LI, Q. Durability of high performance concrete composites containing silica fume. **Journal of Materials: Design and Applications**, v. 227, n. 4, p. 343–349, 2012.

ZHANG, P.; LI, Q. Effect of silica fume on durability of concrete composites containing fly ash. **Science and Engineering of Composite Materials**, v. 20, n. 1, p. 57–65, 2013.

APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

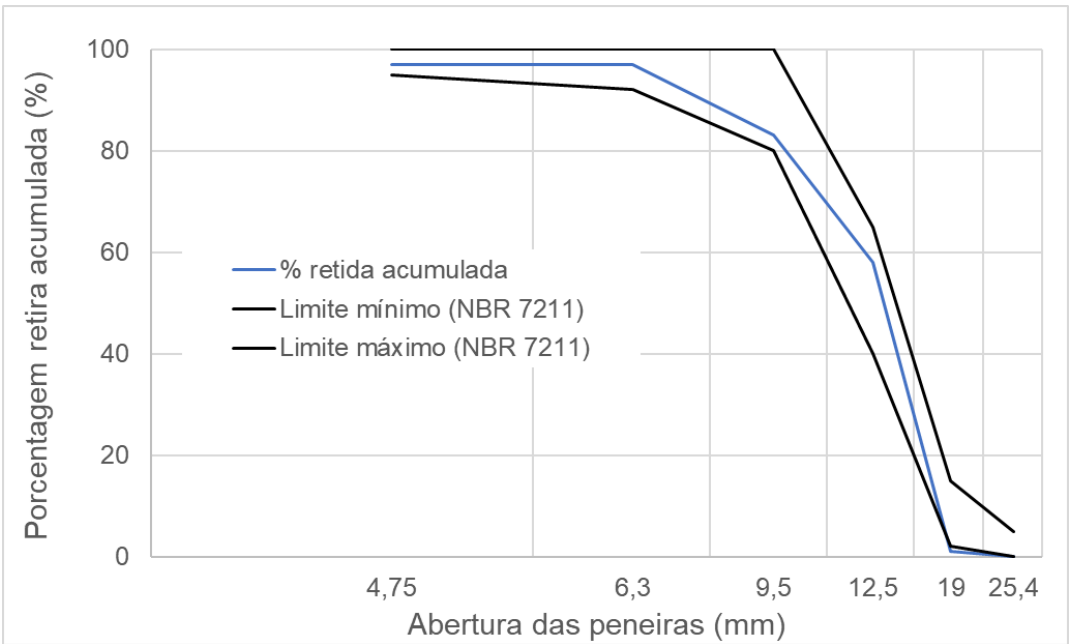
B.1. AGREGADO MIÚDO

Figura B1 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo



B.2 AGREGADO GRAÚDO

Figura B2 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo



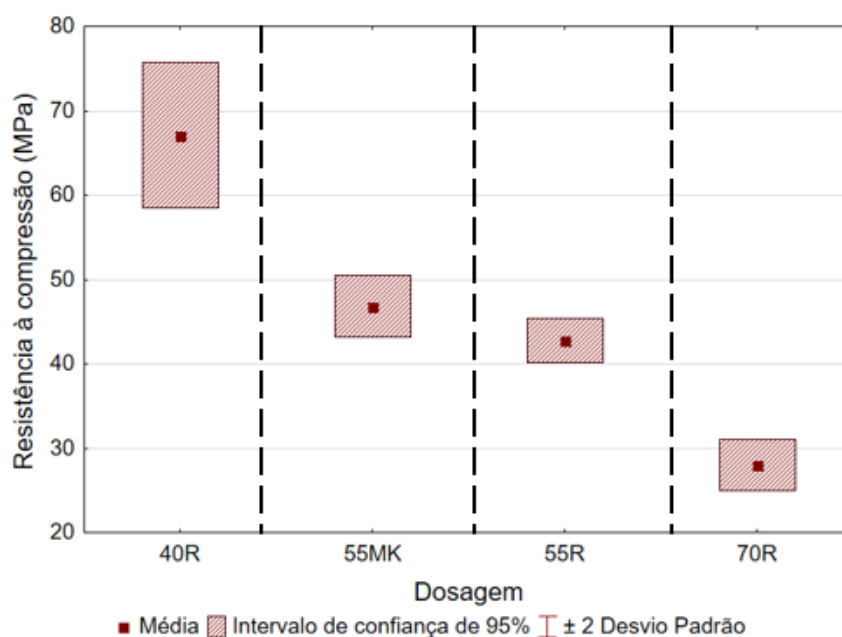
Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão foram submetidos a uma Análise de Variância (Tabela B1) e posteriormente à comparação múltipla de médias pelo método de Duncan (Figura B3). Os resultados de resistência à compressão corroboram a premissa de escolha de concretos diferentes entre si. Apresentando, portanto, microestruturas distintas e, conseqüentemente, resistências distintas à compressão, sendo que o concreto 40R tem, conforme esperado, a maior resistência, seguido pelo 55MK, 55R e 70R, em ordem decrescente. A linha tracejada na Figura B3 indica a separação dos concretos em diferentes grupos.

Tabela B1 – Resultado da análise de variância realizado com a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{calc}	F _{tab}	Resultado (5% de significância)
Modelo	2336,27	3	778,76	186,05	4,07	Significativo
Erro (resíduo)	33,49	8	4,19	-	-	-
Total	2369,76	11	-	-	-	-
Dosagem	2336,27	3	778,76	186,05	4,07	Significativo
Erro (resíduo)	33,49	8	4,19	-	-	-
Coeficiente de determinação (R ²)	0,99					
Coeficiente de correlação (R)	0,99					

Figura B3 – Comparação múltipla de médias da resistência à compressão aos 28 dias de idade



O concreto com substituição do cimento por 10% de Metacaulim (55MK) apresentou um aumento de resistência, relativo ao concreto de referência (55R), de 9%. Esse aumento na

resistência à compressão do concreto com adição mineral, mesmo quando empregado em substituição ao cimento Portland, demonstra o potencial do metacaulim em densificar a matriz cimentícia do concreto (PASSOS, 2019), alterando também a sua porosidade (HILÁRIO – em fase de elaboração)¹¹.

Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson

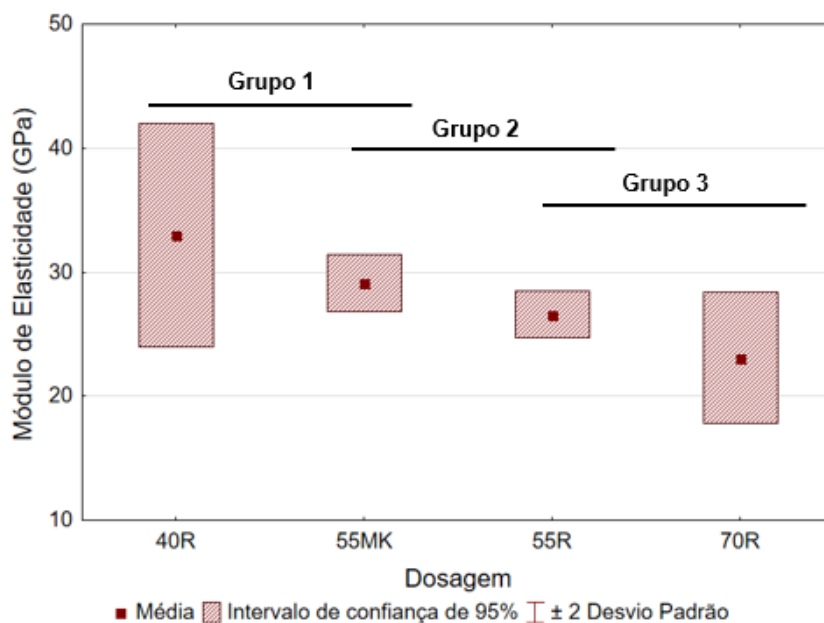
Já em relação ao módulo de elasticidade, os concretos mostraram diferença significativa (ANOVA – Tabela B2), principalmente nos concretos 40R e 70R, quando submetidos à comparação múltipla de médias pelo método de Duncan (Figura B4). Ao analisar a Figura B4 se percebe o comportamento similar ao encontrado na resistência à compressão, onde o aumento no módulo de elasticidade do 55MK em relação ao 55R foi de aproximadamente 10%.

Tabela B2 – Resultado da análise de variância realizado com o módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias de idade

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{calc}	F _{tab}	Resultado (5% de significância)
Modelo	155,98	3	51,99	10,90	4,07	Significativo
Erro (resíduo)	38,17	8	4,77	-	-	-
Total	194,15	11	-	-	-	-
Dosagem	155,98	3	51,99	10,90	4,07	Significativo
Erro (resíduo)	38,17	8	4,77	-	-	-
Coeficiente de determinação (R ²)	0,80					
Coeficiente de correlação (R)	0,90					

¹¹ HILÁRIO, H. G. C. Análise da estrutura porosa de materiais cimentícios por meio da interação e associação de técnicas avançadas de caracterização. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás. 2019.

Figura B4 – Comparação múltipla de médias do módulo de elasticidade aos 28 dias de idade

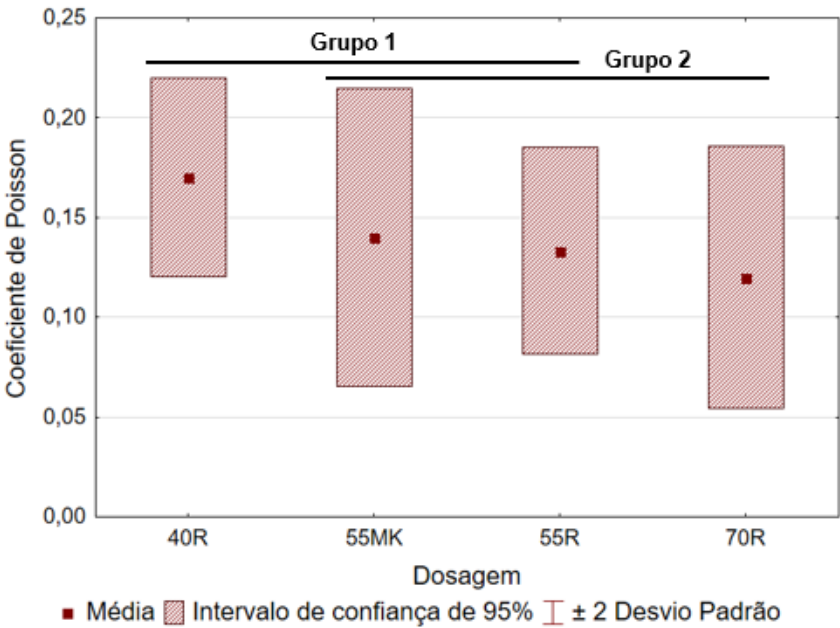


Em relação ao coeficiente de Poisson (Figura B5), a dosagem não teve efeito significativo nos resultados segundo a análise de variância (Tabela B3). Pela comparação múltipla de médias considera-se que os concretos de relação a/lig intermediária (55R e 55MK) obtiveram coeficientes de Poisson iguais aos concretos 40R e 70R, enquanto 40R e 70R são diferentes entre si.

Tabela B3 – Resultado da análise de variância realizado com o coeficiente de Poisson dos concretos aos 28 dias de idade

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{calc}	F _{tab}	Resultado (5% de significância)
Modelo	0,004	3	0,001	2,20	4,07	Não Significativo
Erro (resíduo)	0,005	8	0,0006	-	-	-
Total	0,009	11	-	-	-	-
Dosagem	0,004	3	0,001	2,20	4,07	Não Significativo
Erro (resíduo)	0,005	8	0,0006	-	-	-
Coeficiente de determinação (R ²)	0,45					
Coeficiente de correlação (R)	0,67					

Figura B5 – Comparação múltipla de médias do coeficiente de Poisson

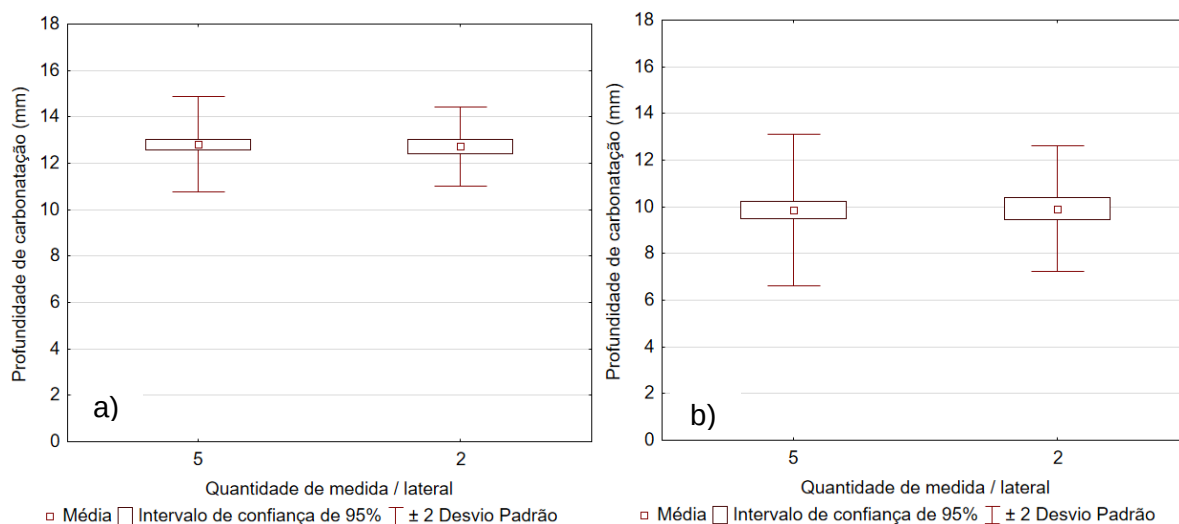


APÊNDICE C – DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE MEDIDAS DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Como explicado na seção 3.3.1.1, do Capítulo 3, uma pesquisa piloto foi realizada com o intuito de verificar, por comparação múltipla de medidas (teste de Duncan), se a quantidade de medidas de profundidade de carbonatação realizadas em todas as laterais das faces dos corpos de prova influenciaria nos resultados (apresentado pela média dessas medidas).

Para tal, dois tipos de concretos de relação a/lig. 0,40 e 0,70 com substituição de 10% do cimento por metacaulim (em massa) foram utilizados. Realizou-se os mesmos procedimentos de condicionamento e ensaio de carbonatação acelerada descritos no Capítulo 3, porém, para coletar as medidas de profundidade foram realizadas duas formas de medidas diferentes nos mesmos corpos de prova. Além das duas medidas por lateral e nas quatro faces expostas após o corte, também foram feitas cinco medidas centrais nas mesmas laterais e nas mesmas faces. As Figuras C.1 e C.2 apresentam os resultados do teste de Duncan, onde apenas o traço 40MK, submetido ao condicionamento ISO28, resulta apresenta diferença entre as médias.

Figura C.1 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação obtidas com cinco e com duas medidas no concreto 70MK – condicionamentos a) ISO28, b) EN56, c) XP56 e d) RILEM56



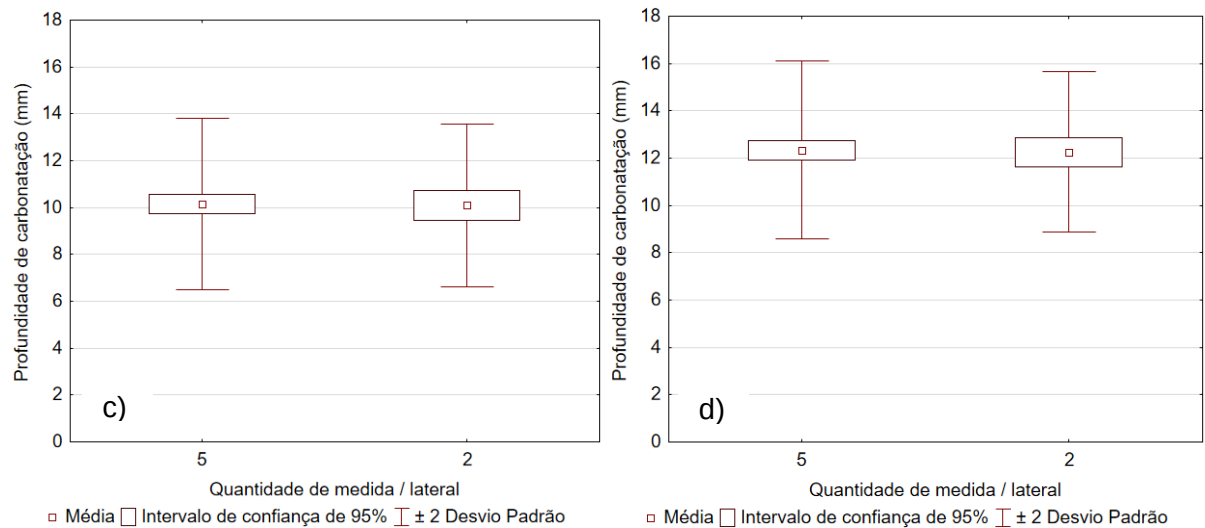
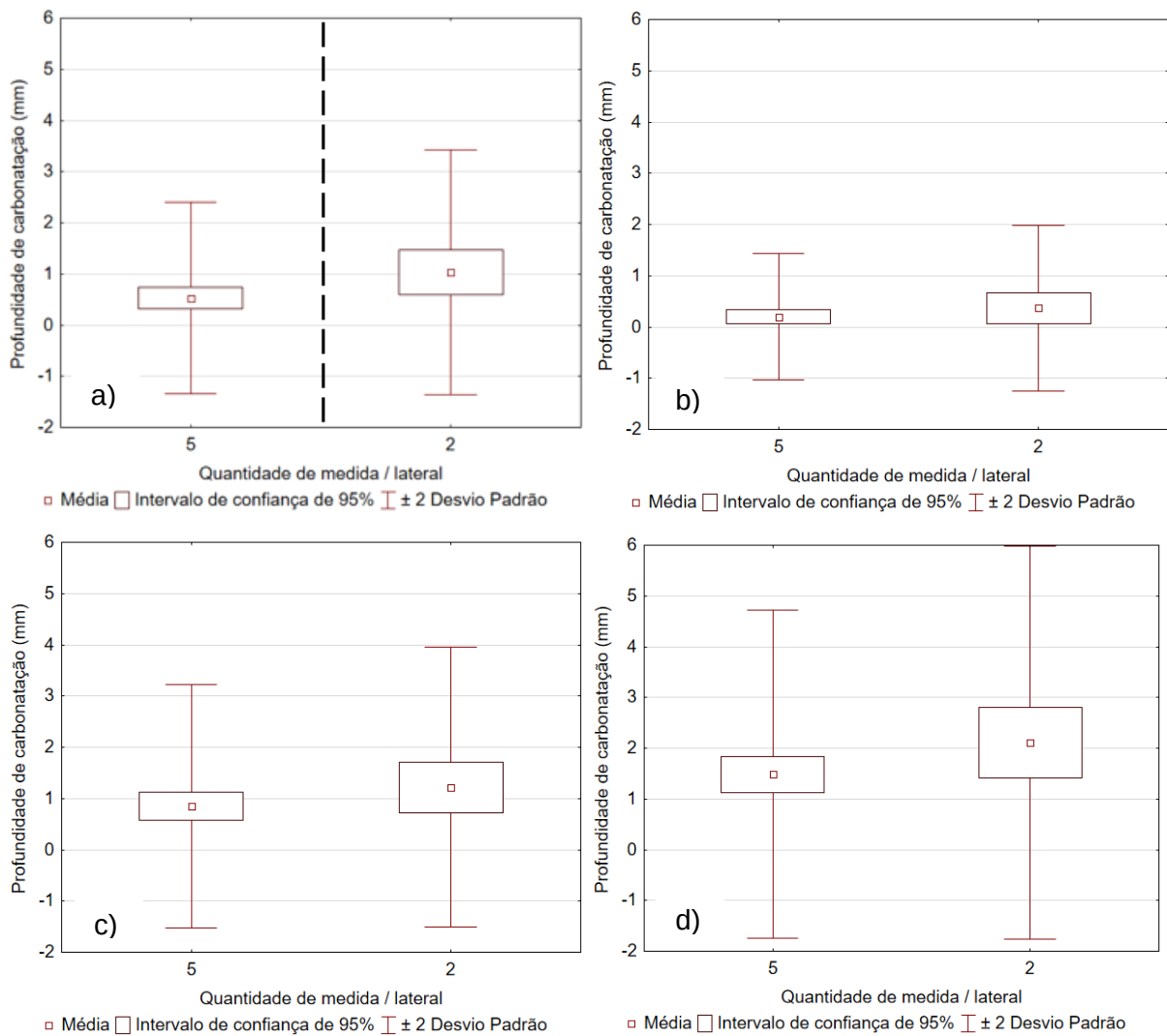


Figura C.2 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação obtidas com cinco e com duas medidas no concreto 40MK – condicionamentos a) ISO28, b) EN56, c) XP56 e d) RILEM56

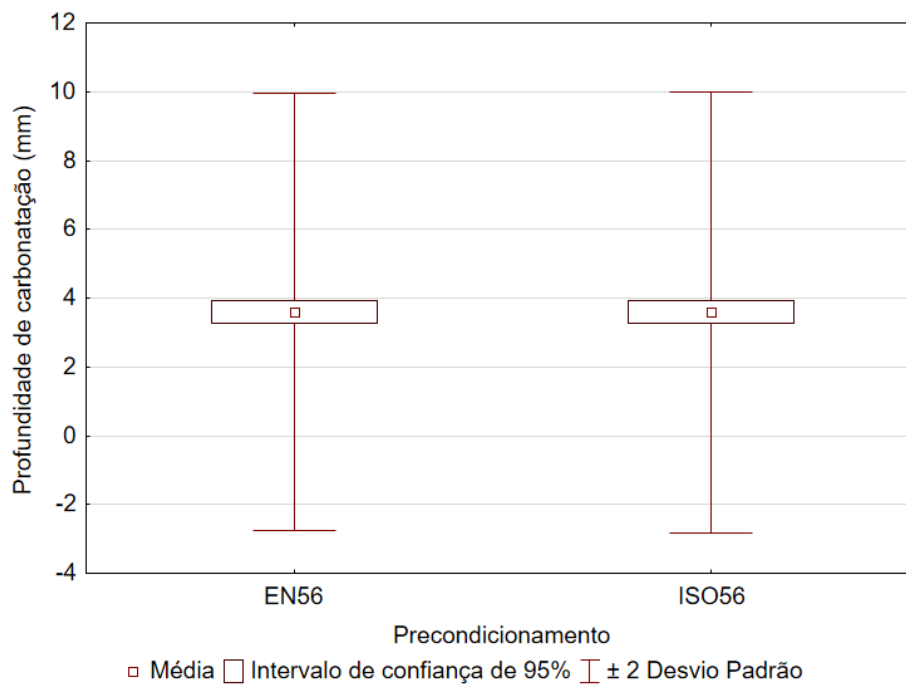


APÊNDICE D – ANOVA E TESTE DE DUNCAN PARA CONCRETOS PRECONDICIONADOS CONFORME ISO56 E EN56

Tabela D.1 – Análise de variância dos concretos condicionados pelo método EN56 e ISO56, considerando todos os traços

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{calc}	F _{tab}	Resultado (5% de significância)
Modelo	6426,84	23	279,43	157,40	1,54	Significativo
Erro (resíduo)	1308,41	737	1,78	-	-	-
Total	7735,25	760	-	-	-	-
Dosagem	4322,36	3	1440,79	811,57	2,62	Significativo
Tempo de exposição	1226,56	2	613,28	345,45	3,01	Significativo
Precondicionamento	0,11	1	0,11	0,06	3,85	Não Significativo
Dosagem x Tempo de exposição	872,17	6	145,36	81,88	2,11	Significativo
Dosagem x Precondicionamento	0,28	3	0,09	0,05	2,62	Não Significativo
Tempo de exposição x Precondicionamento	3,26	2	1,63	0,92	3,01	Não Significativo
Dosagem x Tempo de exposição x precondicionamento	16,67	6	2,78	1,57	2,11	Não Significativo
Erro (resíduo)	1308,41	737	1,78	-	-	-
Coeficiente de determinação (R ²)	0,83					
Coeficiente de correlação (R)	0,91					

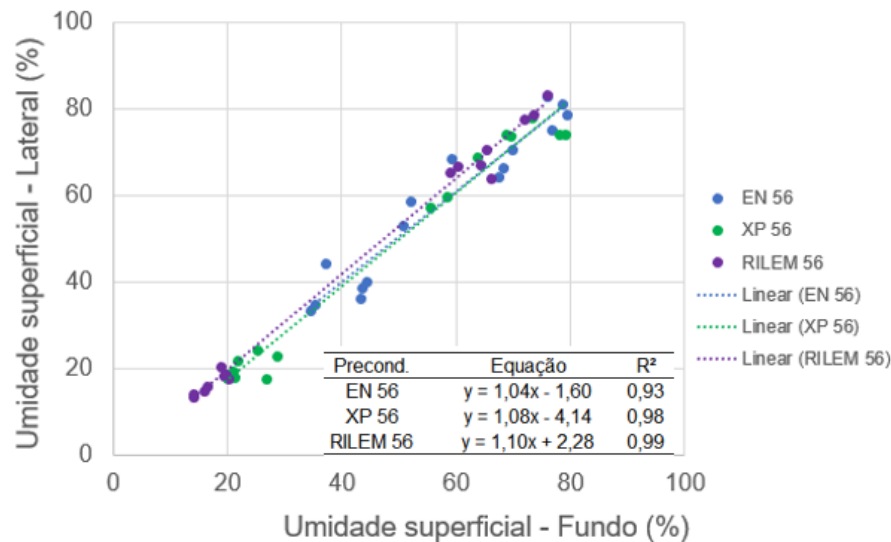
Figura D.1 – Gráfico das médias de profundidade de carbonatação dos condicionamentos EN56 e ISO56 – análise global



**APÊNDICE E – CORRELAÇÃO ENTRE AS
MEDIDAS DE UMIDADE SUPERFICIAL
OBTIDAS EM DIFERENTES FACES DO CORPO
DE PROVA.**

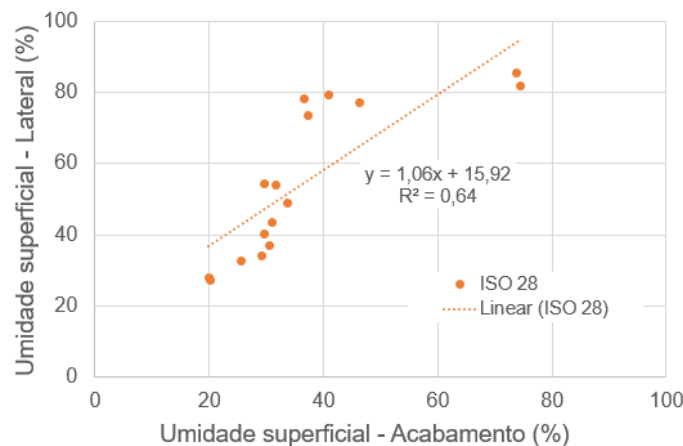
Ao considerar quatro medidas, distribuídas ao longo do comprimento do corpo de prova, em duas faces distintas – sendo uma face lateral e a outra a face de fundo (sendo lateral = aquela que fica em contato com as laterais da forma de moldagem e fundo = em contato com o fundo da forma) – verifica-se uma boa correlação entre as duas faces devido ao R² em torno de 0,90 (Figura E.1).

Figura E.1 – Correlação entre medidas de umidade superficial nas faces lateral e fundo dos corpos de prova



A Figura E.2 apresenta a análise da mesma correlação, porém comparando a face lateral com a face de acabamento – aquela que não tem contato com a forma de moldagem e que passa pelo acabamento, mas identificou-se que não há boa correlação. Como a face de acabamento é muito irregular, as medidas nessa face variavam muito para cada ponto de medida e, principalmente, em relação à face lateral. Assim, admitiu-se o padrão de medida nas faces do fundo e da lateral dos corpos de prova.

Figura E.2 – Correlação entre medidas de umidade superficial nas faces lateral e de acabamento dos corpos de prova



**APÊNDICE F – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, MÓDULO DE
ELASTICIDADE, COEFICIENTE DE POISSON,
PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO,
UMIDADE SUPERFICIAL E ANÁLISES DE
VARIÂNCIA.**

Tabela F.1 – Resultados individuais de resistência à compressão dos concretos aos 28 dias de idade

Resistência à compressão (MPa)			
40R	55MK	55R	70R
63,2	48,5	43,5	28,3
68,3	45,8	43,3	26,7
69,8	46,1	41,6	29,1

Tabela F.2 – Resultados individuais de módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias de idade

Ec (GPa)			
40R	55MK	55R	70R
30,3	28,4	25,8	21,5
31,5	28,9	26,7	22,3
37,1	30,2	27,3	25,5

Tabela F.3 – Resultados individuais de coeficiente de Poisson

μ			
40R	55MK	55R	70R
0,15	0,11	0,11	0,10
0,17	0,14	0,14	0,11
0,19	0,17	0,15	0,15

Tabela F.4 – Resultados individuais de profundidade de carbonatação com 14 dias de exposição

Profundidade de carbonatação (mm)															
ISO28				EN/ISO56				XP56				RILEM56			
40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R
0,0	4,2	2,6	6,2	0,0	3,2	3,3	1,5	0,0	5,5	5,8	7,8	1,6	5,9	4,5	5,8
0,0	5,5	3,8	4,3	0,0	3,5	3,2	0,0	0,0	3,1	5,3	8,0	0,0	6,0	4,7	3,7
0,0	4,2	2,3	4,8	0,0	4,5	4,3	1,9	0,0	4,1	4,8	6,9	2,8	4,6	2,6	8,0
0,0	6,8	4,8	5,2	0,0	7,3*	0,0	2,4	0,0	5,0	4,3	6,5	1,4	10,7	2,1	6,8
0,0	3,8	3,3	4,5	0,0	2,5	2,4	1,5	0,0	5,9	2,9	3,0	0,0	3,8	3,1	3,4
0,0	5,0	1,9	4,2	0,0	4,2	0,0	2,3	0,0	6,2	1,9	4,5	0,0	4,2	3,8	4,2
0,0	4,4	4,0	7,0	0,0	4,7	2,6	0,0	0,0	5,6	2,4	4,8	1,2	8,1	2,9	6,8
0,0	3,9	2,8	6,7	0,0	3,5	0,0	2,4	0,0	4,6	1,9	5,4	0,0	4,5	1,8	11,0
0,0	4,2	4,2	7,9	0,0	2,8	2,7	2,4	0,0	3,8	4,3	7,5	2,3	5,3	4,6	3,2
0,0	5,1	3,6	6,7	0,0	3,1	3,5	3,4	0,0	5,1	4,8	7,9	1,1	5,2	4,1	5,3
0,0	5,3	2,5	6,0	0,0	3,0	2,4	2,8	0,0	4,0	1,0	0,0	1,4	7,8	3,6	8,7
0,0	5,3	2,3	5,1	0,0	4,4	0,0	2,2	0,0	3,7	2,1	5,2	2,1	3,8	3,2	7,6

0,0	5,4	0,0	4,6	0,0	2,3	0,0	2,6	0,0	5,2	2,4	0,0	0,0	2,8	0,0	2,8
0,0	4,7	0,0	7,0	0,0	3,9	0,0	4,0	0,0	1,3	3,6	3,6	0,0	4,0	2,3	6,2
0,0	4,7	2,9	10,1*	0,0	3,4	0,0	2,1	0,0	3,2	2,7	6,4	2,7	5,1	0,0	7,9
0,0	5,6	2,9	6,1	0,0	2,7	0,0	3,8	0,0	4,6	1,8	6,0	1,0	3,9	0,0	8,1
0,0	4,7	4,2	7,7	0,0	3,1	2,2	2,0	0,0	3,2	4,9	7,5	1,5	4,3	3,9	6,2
0,0	4,5	4,8	7,0	0,0	2,6	1,8	0,0	0,0	7,4	4,3	6,7	1,9	4,8	4,3	6,4
0,0	4,6	2,9	6,6	0,0	2,5	0,0	3,3	0,0	5,8	2,5	6,8	2,1	5,7	4,3	7,0
0,0	3,8	2,2	6,5	0,0	3,1	0,0	7,6	0,0	4,0	1,7	6,4	0,0	4,6	3,1	7,6
0,0	1,7	3,8	3,1	0,0	4,4	0,0	3,4	0,0	5,7	2,4	3,9	0,0	4,3	2,1	2,8
0,0	3,7	1,7	5,5	0,0	2,2	3,4	4,1	0,0	4,8	1,5	4,2	2,2	5,0	3,3	5,7
0,0	3,8	4,8	6,3	0,0	4,2	2,5	2,9	0,0	4,1	2,8	5,9	0,0	3,7	2,5	0,0
0,0	3,6	3,1	7,1	0,0	3,1	0,0	0,0	0,0	5,5	4,5	3,2	0,0	8,9*	2,5	3,0
0,0	3,5	4,4	7,0	0,0	2,7	3,0	3,7	0,0	6,7	2,7	4,4	1,4	5,4	4,6	7,8
0,0	4,4	4,0	6,3	0,0	2,6	4,6	1,6	0,0	6,1	4,4	6,8	1,3	5,4	2,9	7,3
0,0	6,3	3,9	6,6	0,0	3,9	3,8	2,4	0,0	3,8	3,3	4,9	1,5	3,1	3,2	0,0
0,0	2,7	0,0	8,9	0,0	2,5	3,7	4,2	0,0	5,0	2,9	4,5	0,0	5,8	2,8	4,3
0,0	2,7	3,7	4,0	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	5,4	2,6	5,1
0,0	4,0	1,5	3,2	0,0	4,4	0,0	2,5	0,0	4,7	0,0	2,5	1,5	4,1	0,0	3,3
0,0	3,6	3,0	4,9	0,0	3,5	0,0	4,9	0,0	4,8	2,1	0,0	0,0	5,2	0,0	7,6
0,0	5,6	1,8	5,1	0,0	5,1	0,0	2,3	0,0	2,7	3,0	3,6	1,8	2,9	0,0	7,4

Tabela F.5 – Resultados individuais de profundidade de carbonatação com 28 dias de exposição

Profundidade de carbonatação (mm)															
ISO28				EN/ISO56				XP56				RILEM56			
40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R
0,0	6,1	4,8	6,4	0,0	6,2	4,8	7,0	4,7	7,5	7,1	13,5	4,3	7,2	6,4	13,8
0,0	9,1	5,4	9,0	0,0	4,6	4,7	5,4	3,4	7,1	7,0	12,6	1,9	8,0	7,0	11,0
0,0	6,3	3,3	6,1	0,0	5,9	3,3	6,6	0,0	8,3	4,9	12,4	0,0	5,1	5,2	14,7
0,0	6,8	4,2	8,8	0,0	4,2	3,2	8,7	3,9	7,4	3,9	10,2	0,0	6,4	2,9	13,2
0,0	6,7	3,9	7,6	0,0	3,1	3,9	3,1	2,9	6,9	3,7	7,4	0,0	7,4	6,2	7,2
0,0	6,2	4,7	8,1	0,0	3,6	4,2	4,1	0,0	5,8	3,3	7,4	1,5	5,8	4,6	7,2
0,0	4,7	4,9	10,5	0,0	3,9	2,8	10,3	2,3	9,5	3,8	11,7	2,0	6,5	5,0	9,2
0,0	8,4	4,2	9,9	0,0	6,1	5,2	6,5	0,0	7,6	4,0	8,1	1,3	9,0	4,4	14,0
0,0	7,0	5,0	10,5	0,0	4,7	3,3	8,7	1,3	6,3	4,7	11,8	2,4	8,0	6,2	10,4
0,0	6,2	4,0	5,8	0,0	5,6	5,5	7,3	1,9	7,4	6,0	12,9	1,7	7,7	5,6	13,0
0,0	6,5	4,2	11,2	0,0	3,5	5,2	8,6	2,2	6,1	5,3	8,5	0,0	7,2	3,4	11,3

0,0	5,1	5,1	8,2	0,0	4,0	2,9	8,5	0,0	6,9	2,8	11,3	0,0	8,6	3,8	10,4
0,0	6,4	1,9	8,2	0,0	4,4	2,9	5,9	0,0	3,8	3,4	6,0	2,2	5,9	3,6	7,2
0,0	7,5	4,4	7,2	0,0	5,0	0,0	4,7	0,0	3,3	2,4	6,6	0,0	6,3	6,1	7,9
0,0	5,2	4,9	7,5	0,0	5,5	0,0	7,8	0,0	5,8	3,6	10,2	0,0	7,6	3,4	12,1
0,0	6,6	2,9	7,8	0,0	4,8	3,2	5,0	0,0	5,0	0,0	12,0	0,0	6,8	4,7	12,5
0,0	8,0	3,9	11,1	0,0	6,1	4,3	8,2	2,2	7,4	6,2	10,7	1,6	7,0	5,6	12,2
0,0	6,0	4,7	11,4	0,0	5,3	5,5	8,5	3,9	7,3	8,7	10,3	2,8	7,3	7,5	16,2
0,0	6,7	4,0	10,0	0,0	5,2	2,1	7,2	0,0	7,4	2,2	8,4	0,0	8,1	5,9	11,6
0,0	5,9	6,0	12,0	0,0	4,1	4,0	9,2	2,9	8,8	5,7	9,0	2,9	6,8	3,7	13,1
0,0	8,8	3,2	9,8	0,0	3,5	0,0	5,6	1,9	6,1	3,8	8,6	3,0	8,1	4,4	9,2
0,0	7,7	4,7	8,2	0,0	5,5	3,0	8,6	3,5	6,8	2,7	7,6	3,5	5,9	2,0	8,2
0,0	8,5	4,1	10,1	0,0	5,8	3,9	10,1	3,7	7,4	2,4	10,2	0,0	6,7	3,0	10,2
0,0	5,6	4,3	9,8	0,0	4,6	4,4	6,5	2,1	5,3	2,8	10,8	1,3	7,3	3,5	9,8
0,0	7,3	3,0	7,5	0,0	5,5	6,2	6,5	3,9	5,9	6,0	9,1	3,0	8,3	6,4	14,1
0,0	4,8	3,8	9,7	0,0	3,2	4,4	7,5	2,5	6,0	6,0	10,1	2,8	7,7	5,8	11,8
0,0	6,0	4,6	8,4	0,0	4,8	5,8	9,2	3,9	6,1	3,3	11,3	1,8	7,7	5,3	10,8
0,0	6,1	5,6	8,4	0,0	5,8	3,0	10,6	0,0	5,1	3,5	10,7	1,8	7,5	2,8	11,9
0,0	6,3	4,5	11,9	0,0	2,1	0,0	8,8	0,0	5,8	2,5	7,6	1,3	7,7	2,1	4,5
0,0	7,1	2,2	11,3	0,0	4,9	3,3	5,7	3,8	7,3	3,0	8,0	2,5	5,3	4,5	8,2
0,0	6,5	5,7	7,0	0,0	6,2	2,8	10,3	0,0	7,0	3,1	9,4	3,5	7,7	4,6	10,4
0,0	7,8	3,8	9,0	0,0	7,1	2,6	6,4	0,0	7,5	1,7	7,9	0,0	7,2	6,3	11,3

Tabela F.6 – Resultados individuais de profundidade de carbonatação com 42 dias de exposição

Profundidade de carbonatação (mm)															
ISO28				EN/ISO56				XP56				RILEM56			
40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R
0,0	10,4	6,4	10,5	0,0	5,7	5,9	10,9	0,0	7,1	8,4	14,4	4,7	8,8	7,6	15,8
0,0	11,7	5,7	13,1	0,0	5,1	4,8	8,7	0,0	10,0	9,5	8,0	1,9	7,9	9,4	12,6
0,0	7,4	5,2	11,7	0,0	7,7	5,7	8,0	3,6	6,8	4,6	14,6	2,3	8,4	6,4	12,8
0,0	8,1	4,3	10,9	0,0	7,6	6,2	12,1	0,0	11,5	5,9	15,2	5,1	8,5	5,6	16,6
0,0	8,6	5,3	11,4	0,0	6,4	3,5	6,6	1,1	7,6	4,7	15,0	1,3	6,8	9,4	8,7
0,0	10,2	3,7	12,1	0,0	6,2	3,8	6,8	0,0	8,9	5,3	11,4	1,9	6,2	5,3	10,4
0,0	7,8	6,8	4,8*	0,0	5,2	4,0	12,3	0,0	7,8	4,6	7,7	2,7	7,0	3,5	14,4
0,0	9,4	3,4	8,3	0,0	8,9	6,0	6,9	3,3	9,9	4,5	10,3	3,1	9,2	4,6	14,7
0,0	7,8	7,1	12,6	0,0	4,0	4,8	8,3	3,8	9,0	8,8	15,4	2,3	10,0	8,3	12,3
0,0	8,0	5,5	11,6	0,0	7,2	4,9	10,0	3,4	8,2	9,5	14,6	3,0	7,9	6,7	19,0

0,0	9,9	6,9	11,3	0,0	7,8	5,2	12,7	2,8	8,9	4,9	8,5	3,0	10,1	5,6	18,5
0,0	10,1	4,3	9,6	0,0	4,1	5,5	11,8	0,0	10,6	4,3	12,7	1,8	6,7	4,7	14,6
0,0	8,2	2,4	12,2	0,0	7,7	5,4	7,9	0,0	7,0	3,7	10,3	1,5	4,6	4,0	9,2
0,0	7,3	4,3	12,8	0,0	5,1	2,9	6,9	0,0	8,8	5,1	5,8	1,3	6,5	4,4	15,0
0,0	8,3	5,9	11,8	0,0	4,8	4,4	10,5	0,0	10,0	5,1	14,5	2,5	8,9	3,6	16,0
0,0	10,2	3,6	13,2	0,0	6,6	5,2	10,8	0,0	8,9	2,7	11,8	2,9	6,1	5,1	11,5
0,0	7,9	5,9	16,1	0,0	4,3	4,2	9,1	3,0	7,4	7,5	14,6	1,9	8,7	5,4	12,0
0,0	9,5	4,8	13,9	0,0	6,3	4,3	6,9	3,2	9,6	7,5	14,0	2,6	9,8	5,9	13,7
0,0	8,4	5,1	13,3	0,0	5,6	5,0	11,2	0,0	7,4	4,8	10,5	4,9	7,4	5,6	13,7
0,0	6,6	4,2	13,6	0,0	9,6	4,8	11,5	4,0	6,9	3,3	11,2	0,0	8,6	4,4	17,0
0,0	9,5	7,2	11,4	0,0	4,2	2,3	9,8	3,3	7,9	4,2	10,9	1,6	7,8	3,9	11,2
0,0	8,7	4,3	11,2	0,0	8,1	5,1	9,4	0,0	6,3	2,9	8,8	4,4	7,8	2,6	10,5
0,0	5,9	6,0	12,7	0,0	7,6	3,7	9,2	3,6	7,6	7,5	10,4	3,3	6,6	4,3	14,9
0,0	7,7	3,5	10,9	0,0	4,7	5,5	12,9	4,7	8,7	3,6	11,7	1,8	7,8	4,9	10,6
0,0	8,3	7,4	14,4	0,0	7,5	4,9	9,0	2,5	9,6	8,2	14,6	2,0	7,9	9,5	13,1
0,0	8,5	6,1	16,2	0,0	5,8	6,0	9,7	2,3	7,7	8,4	12,7	3,2	9,0	7,5	13,9
0,0	9,0	4,3	11,8	0,0	4,1	4,5	6,4	3,0	7,4	5,6	11,9	2,5	8,5	6,4	11,0
0,0	8,2	5,7	14,0	0,0	5,1	5,3	10,1	3,1	9,3	7,0	14,8	1,9	6,9	6,0	14,7
0,0	10,6	2,9	10,3	0,0	5,0	3,5	9,1	0,0	5,7	4,5	9,5	0,0	7,4	5,6	10,7
0,0	9,6	2,3	9,4	0,0	5,8	4,0	6,4	0,0	7,2	4,1	12,1	1,2	5,6	6,3	11,9
0,0	7,7	4,7	13,0	0,0	7,6	3,9	12,3	0,0	6,3	3,0	12,3	1,6	7,5	7,2	15,3
0,0	9,5	4,5	12,9	0,0	7,6	3,3	9,0	0,0	7,9	6,6	10,1	1,4	6,8	5,2	13,0

Tabela F.7 – Resultados individuais de umidade superficial durante condicionamento

		Umidade superficial (%)															
	Face	ISO28				EN/ISO56				XP56				RILEM56			
		40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R
Início	Acab. ¹² /Lateral	30	42	44	78	71	64	75	74	60	59	79	64	57	69	76	75
		35	38	44	66	75	71	82	76	61	62	84	71	66	66	74	72
		32	34	40	80	63	72	86	77	67	56	81	72	56	63	78	75
		30	32	36	73	71	62	75	77	66	56	72	69	63	66	61	71
		25	36	43	75	69	54	77	78	70	56	72	78	66	58	60	75
		24	38	49	66	65	64	84	78	72	59	78	73	70	60	75	75
		30	37	53	80	70	65	78	76	67	56	76	85	61	60	75	75
		38	37	39	75	68	55	75	75	69	51	67	77	59	58	51	77
	Fundo	43	79	80	83	71	67	80	86	70	58	76	65	62	67	76	79
		59	80	82	79	70	67	79	82	72	63	78	81	72	62	79	85
		59	80	77	82	72	62	76	84	70	62	66	78	74	68	78	76
		57	75	79	84	70	61	79	80	63	56	76	73	60	58	78	74
		42	73	82	85	61	68	80	67	70	55	77	72	65	67	65	81
		53	76	75	89	67	72	84	82	76	60	80	75	71	65	70	79
		60	72	81	88	68	71	81	79	78	57	80	76	64	68	77	88
		64	74	71	80	71	63	79	73	71	57	75	74	69	62	71	85
Fim	Acab./ Lateral	29	20	31	30	54	36	33	37	26	24	20	16	19	17	18	13
		30	20	31	28	48	37	35	50	23	24	23	25	21	17	25	15
		38	20	25	28	52	35	42	47	25	18	20	26	19	16	21	15
		37	18	31	30	54	33	39	43	27	19	24	17	19	16	16	13
		30	20	32	28	50	35	38	40	27	20	19	27	18	14	18	13
		30	20	32	27	50	41	53	55	29	19	24	33	20	16	20	16
		29	19	36	23	52	33	41	45	28	22	22	24	19	16	22	15
		35	22	32	25	51	29	42	33	30	18	20	22	18	16	18	13
	Fundo	41	28	35	38	62	33	46	39	23	17	18	16	18	16	17	13
		52	28	42	32	59	34	41	43	24	18	22	21	19	16	18	14
		50	30	40	31	53	36	46	42	26	19	23	20	21	17	18	14
		53	28	45	37	62	36	44	37	24	17	25	16	17	15	18	13
		40	30	40	28	61	32	37	43	21	19	18	17	19	16	18	15

¹² Somente para o condicionamento ISO28.

		42	27	32	34	47	36	40	38	24	20	20	22	24	15	19	15
		44	27	41	37	50	35	36	38	23	19	21	17	19	16	18	14
		47	26	36	32	54	31	41	27	23	17	19	15	20	14	18	13

Tabela F.8 – Resultados individuais de umidade superficial obtidas durante as leituras de profundidade de carbonatação

	Face	Umidade superficial (%)															
		ISO28				EN/ISO56				XP56				RILEM56			
		40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R	40R	55MK	55R	70R
14 dias	Lateral	38	23	34	29	49	23	35	24	23	21	31	21	20	19	19	17
		45	29	36	30	47	25	47	27	25	21	23	25	21	20	20	17
		45	24	30	31	44	25	38	30	22	19	19	21	20	19	24	16
		49	26	31	24	44	28	27	29	23	20	23	17	19	18	16	15
		39	25	28	25	38	24	34	23	25	20	20	25	19	17	20	16
		33	27	29	25	51	25	28	26	25	19	24	21	21	19	28	17
		33	29	28	29	39	27	32	39	25	19	21	24	20	18	23	16
		43	23	27	26	41	29	28	23	23	18	19	22	17	18	14	16
	Fundo	44	23	33	23	46	25	34	21	21	18	19	18	19	18	19	16
		44	26	24	23	46	24	29	24	23	19	23	20	19	20	22	17
		42	26	30	22	36	25	38	28	24	19	23	19	18	21	22	16
		38	25	23	25	62	24	35	22	22	17	22	16	18	17	18	16
		47	22	26	23	56	21	30	20	23	19	18	18	18	19	18	18
		39	26	30	23	40	25	34	23	23	18	21	18	19	19	20	18
		40	26	29	25	59	25	28	25	25	18	20	19	18	19	21	16
		39	22	27	24	49	23	29	21	22	18	20	17	19	17	17	15
28 dias	Lateral	33	26	26	26	40	20	23	22	22	19	23	17	18	18	18	16
		34	22	27	21	36	25	30	26	23	17	21	22	21	19	18	15
		40	21	28	26	37	23	27	24	24	19	23	19	18	19	19	16
		36	21	30	23	39	23	24	20	23	19	21	17	19	18	20	15
		33	21	27	22	33	19	24	20	23	16	19	19	17	16	19	16
		35	23	25	23	35	23	26	25	23	20	22	19	18	18	21	17
		35	21	29	25	28	23	28	21	23	19	22	20	18	19	21	16
		34	20	27	22	41	22	30	22	23	18	20	19	22	18	18	16
	Fundo	35	21	22	20	59	21	31	18	22	18	21	16	18	18	19	14
		34	22	26	23	31	20	35	20	21	19	22	18	19	20	21	16

		41	22	25	21	39	21	25	20	24	19	20	17	20	19	20	15
		34	20	24	24	38	20	30	19	21	18	19	16	20	18	21	15
		34	22	24	22	49	21	24	19	21	18	19	16	19	18	18	16
		35	22	25	22	48	21	24	18	21	18	21	16	20	19	19	17
		34	23	21	23	29	21	24	19	22	19	21	18	19	19	19	16
		36	21	27	21	29	22	26	18	21	18	20	17	19	18	19	14
42 dias	Lateral	33	19	21	21	37	21	23	19	21	20	22	17	19	18	18	17
		30	20	23	19	38	25	34	18	24	18	20	20	19	18	22	16
		38	21	24	21	34	21	29	23	22	19	23	21	20	19	21	17
		33	20	26	21	37	23	29	18	24	18	24	18	18	18	20	16
		33	20	20	20	35	21	22	18	24	17	18	21	18	16	19	16
		44	18	23	20	37	23	23	17	24	19	21	20	19	18	21	17
		35	21	26	21	37	21	27	18	26	19	20	20	21	20	22	15
		29	19	27	18	34	21	24	15	23	18	19	20	18	17	20	16
	Fundo	38	20	22	19	48	21	26	17	21	18	19	15	18	17	18	16
		32	20	24	18	35	20	24	17	23	19	20	19	20	19	20	17
		46	21	22	19	32	20	25	20	22	18	20	18	19	18	20	16
		34	21	23	18	31	19	27	17	23	17	19	19	19	18	19	16
		32	19	21	20	39	20	22	16	20	19	18	18	19	18	17	17
		36	20	22	20	36	21	23	17	23	19	19	19	20	18	15	17
		33	19	21	20	32	20	21	16	22	19	20	18	21	18	18	17
		31	20	20	20	29	21	21	16	22	18	18	18	19	18	17	16