

**CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM
SUBSTITUIÇÕES DE CIMENTO PORTLAND POR ADIÇÕES
MINERAIS**

LUIZA RODRIGUES MEIRA DE MIRANDA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM
SUBSTITUIÇÕES DE CIMENTO PORTLAND POR ADIÇÕES
MINERAIS**

LUIZA RODRIGUES MEIRA DE MIRANDA

ORIENTADORA: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**PUBLICAÇÃO: DM-02A/18
BRASÍLIA/DF: MARÇO- 2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM
SUBSTITUIÇÕES DE CIMENTO PORTLAND POR ADIÇÕES
MINERAIS**

LUIZA RODRIGUES MEIRA DE MIRANDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

Profª Valdirene Maria Silva Capuzzo, DSc (ENC-UnB)
(Orientadora)

Profª Eugênia Fonseca da Silva, DSc (ENC-UnB)
(Examinadora Interna)

Prof Enio José Pazini Figueiredo, DSc (EECA-UFG)
(Examinador Externo)

Brasília/DF, 01 DE MARÇO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Miranda, Luiza Rodrigues Meira de
Carbonatação em concretos autoadensáveis com substituições de cimento Portland por adições minerais / Luiza Rodrigues Meira de Miranda; orientadora Valdirene Maria Silva Capuzo. -- Brasília, 2018.

111 p.

ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2018.
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Concreto autoadensável. 2. Carbonatação. 3. Adição mineral 4. Análise microestrutural.

I. Capuzo, Valdirene, orient. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MIRANDA, L. R. M. (2018). Carbonatação em concretos autoadensáveis com substituições de cimento Portland por adições minerais. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-02A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 115p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Luiza Rodrigues Meira de Miranda

TÍTULO: Carbonatação em concretos autoadensáveis com substituições de cimento Portland por adições minerais

GRAU: Mestre ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Luiza Rodrigues Meira de Miranda

Rua Professor Teonilo Gama, nº 269. Trapiche da Barra

CEP: 57010-384 Maceió/AL - Brasil

e-mail: luizarodriguesmm@gmail.com

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, por ter vivido todos os dias desses 2 anos ao meu lado, mesmo com a distância física, sem me deixar desistir e me levantando todas as vezes, sem cansar. A minha avó Elisete por ser meu maior exemplo de vida e meu grande amor. Aos meus irmãos Carlos e Letícia por serem meus grandes amigos e meu orgulho. Ao meu pai pela amizade, os conselhos e presença amorosa na minha vida. A Vó Ida e vovô (*in memorian*) pelo carinho da casa de vocês. E a todos os meus tios, primos e parentes por me fazerem sentir o que é ter uma boa família.

Alice, Arthur, Audir, Bia, Caio, João, Lu e Tai eu não consigo definir a nossa relação. Ter vocês na minha vida é sinal de Amor. A Gabriel e a Comunidade dos Viventes, obrigada por viverem o Sonho!

As minhas amigas de handebol, em especial a Bru, obrigada pelo acolhimento amoroso desde que eu cheguei em Brasília, mesmo com a minha distância das quadras.

A Júlia por ter dividido comigo não só o apartamento, mas muitos momentos dessa jornada. Você sabe cada detalhe e foi essencial na finalização de tudo.

Aos meus colegas da sala 3, Davidson, Gabriel, Divino, Dyorgge e Wilber, por tornarem os dias de UnB mais fáceis. Além de Laís, Marília, Nicole, Danilo e Thiago, por todos os cafés da tarde e outros momentos dentro e fora do PECC.

A CAPES pelo apoio financeiro para desenvolvimento da pesquisa. Ao Laboratório de Ensaios em Materiais (LEM/UnB) pela estrutura para realização dos ensaios. A Realmix e Basf pela doação dos materiais.

Ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Laboratório de Análise Instrumental da Universidade de Brasília, ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília pela realização dos ensaios microestruturais.

Finalmente a minha orientadora pelo suporte científico e humano e por todas as diversas e pacientes contribuições ao longo desses 2 anos. E também aos membros da banca por gentilmente aceitarem avaliar esse trabalho.

“O Sonho no coração avassala o mundo.”

(Gabriel Marquim)

CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM SUBSTITUIÇÕES DE CIMENTO PORTLAND POR ADIÇÕES MINERAIS

Autora: Luiza Rodrigue Meira de Miranda

Orientador: Dra. Valdirene Maria Silva Capuzzo

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, março de 2018

Um concreto autoadensável (CAA) deve ter, simultaneamente, três características: fluidez, coesão e habilidade passante. Sua dosagem exige um maior volume de pasta e de finos, quando comparado ao concreto convencional. O uso de adições minerais no CAA é inevitável para melhorar suas características de autoadensabilidade, além de reduzir o custo de material e possibilitar a incorporação de diversos tipos de resíduos. Normalmente as pesquisas desenvolvidas com a incorporação de adições minerais no concreto autoadensável visam o estudo de propriedades mecânicas desassociadas a questões de durabilidade. Sabe-se que um dos principais mecanismos de despassivação da armadura do concreto estrutural é a carbonatação, que está diretamente ligada à facilidade que o CO₂ tem para difundir-se no interior do concreto, às condições ambientais e às propriedades de permeabilidade. Para avaliar a durabilidade frente à ação da carbonatação acelerada do CAA com substituições de cimento Portland por adições minerais, foi realizada a dosagem de seis traços. Como adição mineral, foram escolhidos o fíler calcário e o metacaulim, empregados em substituição a massa de cimento Portland, nas proporções de 10 e 20%, além de um traço com uma combinação ternária entre as adições e o cimento. Avaliou-se o comportamento do concreto no estado fresco, realizando-se os ensaios de espalhamento, caixa L, funil V, índice de estabilidade visual e massa específica, a fim de classificar o CAA conforme os critérios da NBR 15823:2017, além da utilização das equações propostas por Sedran e De Larrard (1999) para determinação dos parâmetros reológicos teóricos. Também foram realizados ensaios no estado endurecido de resistência à compressão simples axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água por capilaridade e carbonatação acelerada, este seguindo as recomendações da ISO 1920-12:2015. Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, análise termogravimétrica (TG/DTG) e difração de raios-X foram utilizados para avaliar como as mudanças microestruturais provocadas pelas adições minerais interferem na durabilidade do CAA. Com os parâmetros e critérios de dosagem empregados, foi possível classificar todos os concretos como autoadensáveis. Os traços com a utilização de fíler calcário apresentaram desempenho inferior aos traços que continham metacaulim em todas as propriedades do estado endurecido avaliadas. Segundo as extrapolações realizadas baseadas no cobrimento nominal de 40 mm recomendado pela NBR 6118:2014, dificilmente haveria risco da frente de carbonatação atingir as armaduras de estruturas confeccionadas com algum dos traços estudados. Assim, de um modo geral, o desempenho de todos os traços foi satisfatório, indicando que a utilização de cada um deles é cabível, a depender dos elementos de sua destinação final. O emprego do CAA permitiu a substituição de cimento Portland por adições minerais, e a consequente diminuição do consumo de cimento, sem grandes perdas na trabalhabilidade, nas propriedades mecânicas e na durabilidade frente à carbonatação.

Palavras-chave: Concreto autoadensável; carbonatação, adição mineral; análise microestrutural

ABSTRACT

CARBONATION IN SELF-COMPACTING CONCRETES WITH SUBSTITUTIONS OF PORTLAND CEMENT FOR MINERAL ADDITIONS

Author: Luiza Rodrigues Meira de Miranda

Supervisor: Dra. Valdirene Maria Silva Capuzzo

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, march of 2018

A self-compacting concrete (SCC) must simultaneously have three characteristics: fluidity, cohesion and passing ability. Its dosage requires a higher volume of paste and fines when compared to conventional concrete. The use of mineral additions in the SCC is inevitable to improve its self-compacting characteristics, reduce material costs and allow the incorporation of different types of waste that would be dumped into the environment, promoting solutions that aim at the sustainable development of the construction sector. Normally the researches developed with the incorporation of mineral additions in the self-compacting concrete aim at the study of mechanical properties disassociated with durability issues. It is known that one of the main mechanisms of depassivation of structural concrete reinforcement is carbonation, which is directly linked to the ease of CO₂ diffusion within the concrete, environmental conditions and permeability properties. To evaluate the durability against the action of the accelerated carbonation of SCC with Portland cement substitutions by mineral additions, six types of concrete were measured. As mineral addition, limestone filler and metakaolin were used, replacing the mass of Portland cement in the proportions of 10 and 20%, as well as a concrete with a ternary combination between the additions and the cement. The behavior of the concrete in the fresh state was evaluated by performing the slump flow test, L-box, V-funnel, visual stability index and specific mass in order to classify the SCC according to the criteria of NBR 15823: 2017, besides the use of the equations proposed by Sedran and De Larrard (1999) for the determination of the theoretical rheological parameters. Tests were also carried out in the hardened state of axial compression, tensile strength by diametrical compression, modulus of elasticity, water absorption by capillarity and accelerated carbonation, following the recommendations of ISO 1920-12: 2015. The mercury intrusion porosimetry, thermogravimetric (TG/DTG) and X-ray diffraction tests were used to evaluate how the microstructural changes caused by the mineral additions interfere in the durability of the CAA. With the parameters and dosage criteria employed, it was possible to classify all concrete as self-compacting. The concretes with the use of limestone showed inferior performance to those containing metakaolin in all of the hardened state properties evaluated. According to the extrapolations made based on the nominal 40 mm cover recommended by NBR 6118: 2014, there is hardly any risk of the carbonation front reaching the reinforcement of structures made with any of the studied concretes. Thus, in general, the performance of all the SCC was satisfactory, indicating that the use of each of them is appropriate, depending on the elements of their final destination. The use of the CAA allowed the replacement of Portland cement by mineral additions, and the consequent reduction of cement consumption, without losing the efficiency of workability, mechanical properties and durability against carbonation.

Keywords: Self-compacting concrete; carbonation; mineral addition, microstructural analysis.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA.....	3
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.2.1	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>4</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	5
2.1.1	<i>Propriedades do CAA no estado fresco</i>	<i>7</i>
2.1.2	<i>Parâmetros reológicos teóricos</i>	<i>10</i>
2.1.3	<i>Propriedades do CAA no estado endurecido</i>	<i>13</i>
2.2	DURABILIDADE.....	15
2.2.1	<i>Carbonatação.....</i>	<i>17</i>
2.3	TÉCNICAS MICROESTRUTURAIS UTILIZADAS PARA ANÁLISE DO CAA.....	27
2.3.1	<i>Porosimetria por intrusão de mercúrio</i>	<i>28</i>
2.3.2	<i>Análise termogravimétrica (TG/DTG).....</i>	<i>29</i>
2.3.3	<i>Difração de raios-X.....</i>	<i>31</i>
3	METODOLOGIA	32
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	33
3.1.1	<i>Cimento Portland.....</i>	<i>33</i>
3.1.2	<i>Adições minerais</i>	<i>36</i>
3.1.3	<i>Agregados.....</i>	<i>39</i>
3.1.4	<i>Aditivo superplastificante.....</i>	<i>40</i>
3.2	DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	41
3.3	ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	44
3.3.1	<i>Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams.....</i>	<i>44</i>
3.3.2	<i>Determinação da habilidade passante – Método da caixa L.....</i>	<i>46</i>
3.3.3	<i>Determinação da viscosidade plástica– Método do funil V.....</i>	<i>47</i>
3.3.4	<i>Parâmetros reológicos teóricos</i>	<i>47</i>
3.4	ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	48

3.4.1	<i>Propriedades mecânicas</i>	48
3.4.2	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	48
3.4.3	<i>Carbonatação acelerada</i>	49
3.4.4	<i>Ensaio microestruturais</i>	52
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1	ENSAIOS DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL NO ESTADO FRESCO	54
4.1.1	<i>Ensaio de autoadensabilidade</i>	54
4.1.2	<i>Parâmetros reológicos teóricos</i>	59
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS	62
4.2.1	<i>Resistência à compressão simples</i>	62
4.2.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	65
4.2.3	<i>Módulo de elasticidade</i>	68
4.3	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	70
4.4	CARBONATAÇÃO ACELERADA DO CAA	73
4.6	ENSAIOS MICROESTRUTURAIS	80
4.6.1	<i>Porosimetria por intrusão de mercúrio</i>	80
4.6.2	<i>Análise termogravimétrica (TG/DTG)</i>	85
4.6.3	<i>Difração de raios-X</i>	90
4.7	RELAÇÃO ENTRE A CARBONATAÇÃO E OS DEMAIS ENSAIOS REALIZADOS	93
4.7.1	<i>Relação entre carbonatação e as propriedades mecânicas</i>	94
4.7.3	<i>Relação entre carbonatação e a absorção de água por capilaridade</i>	96
4.7.4	<i>Relação entre a carbonatação e a porosimetria por intrusão de mercúrio</i>	97
4.7.5	<i>Relação entre carbonatação e a termogravimetria (TG/DTG)</i>	97
4.8	RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS.....	98
5.	CONCLUSÕES	101
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Guia para zona reológica do CAA. Adaptado de Nielsson e Wallevik, (2003).	9
Figura 2 - Correlação entre os resultados teóricos de viscosidade plástica e tensão de escoamento com os resultados experimentais obtidos utilizando um viscosímetro.....	11
Figura 3 - Domínio dos parâmetros reológicos para CAA, adaptado de Wallevik e Wallevik (2011)	12
Figura 4 - Valores típicos de viscosidade plástica e tensão de escoamento após realização de ensaios em diferentes países.....	13
Figura 5 - Classificação dos poros	29
Figura 6 - Etapas do programa experimental desenvolvido na pesquisa	33
Figura 7 - Granulometria a laser do cimento Portland	34
Figura 8 - Difratoograma de raios-X do CP II F - 40.....	36
Figura 9 - Granulometria a laser das adições minerais	37
Figura 10 - Difratoograma de raios-X do fíler calcário	38
Figura 11 - Difratoograma de raios-X do metacaulim	38
Figura 12 - Composição granulométrica dos agregados miúdos	40
Figura 13 - Composição granulométrica dos agregados graúdos	40
Figura 14 - Representação das classes do índice de estabilidade visual (IEV).....	45
Figura 15 - Representação do coeficiente de sorvidade e da absorção inicial	49
Figura 16 - Detalhes da câmara de carbonatação acelerada.....	50
Figura 17 - Corpo de prova prismático utilizado no ensaio de carbonatação acelerada, com as faces seladas com parafina para o direcionamento do fluxo de CO ₂	50
Figura 18 - Ensaio de espalhamento pelo método do cone de Abrams dos concretos analisados	55
Figura 19 - Vista e corte dos concretos para determinação do índice de estabilidade visual (IEV). a) REF; b) F10; c) M10; d) F20; e) M20; f) M15F5	56
Figura 20 - Ensaio do t ₅₀₀ dos concretos analisados.....	57
Figura 21 - Ensaio do funil V dos concretos analisados	58
Figura 22 - Ensaio da caixa L, com três barras de aço, realizado nos concretos analisados....	58
Figura 23 - (a) Relação entre a viscosidade plástica teórica e o t ₅₀₀ ; (b) Relação entre a tensão de escoamento teórica e o espalhamento.....	61
Figura 24 - - Resistência à compressão dos concretos aos 7, 14 e 28 dias de idade	63

Figura 25 - Resistência à compressão do CAA em relação ao REF, aos 28 dias (a) Traços com fíler calcário; (b) Traços com metacaulim; (c) Traços com 10% de substituição de cimento Portland; (d) Traços com 20% de substituição de cimento Portland.	64
Figura 26 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos	66
Figura 27 - Relação entre a resistência à tração obtida experimentalmente e os valores inferior, superior e médio estimados através das equações propostas pela NBR 6118:2014	67
Figura 28 - Módulo de elasticidade dos concretos	68
Figura 29 - Relação entre o módulo de elasticidade obtido experimentalmente e os valores estimados através das equações propostas pela NBR 6118:2014	70
Figura 30 - Absorção de água por capilaridade de todos os concretos	71
Figura 31 - Coeficiente de sorvidade de todos os concretos	72
Figura 32 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.....	73
Figura 33 - Profundidade de carbonatação dos corpos de prova prismáticos em relação ao REF. (a) Traços com fíler calcário; (b) Traços com metacaulim; (c) Traços com 10% de substituição de cimento Portland; (d) Traços com 20% de substituição de cimento Portland.....	74
Figura 34 - Profundidade da frente de carbonatação acelerada dos dois tipos de corpos de prova (prismático e cilíndrico) utilizados.....	75
Figura 35 - Frente de carbonatação acelerada dos corpos de prova prismáticos. (a) REF; (b) F10; (c) M10; (d) F20; (e) M20; (f) M15F5.....	77
Figura 36 - - Frente de carbonatação dos corpos de prova cilíndricos. (a) REF; (b) F10; (c) M10; (d) F20; (e) M20; (f) M15F5	78
Figura 37 - Coeficiente de carbonatação de todos os traços, de acordo com a geometria do corpo de prova utilizado	79
Figura 38 - Relação do incremento de volume com o diâmetro dos poros	81
Figura 39 - Relação entre o volume acumulado e o diâmetro dos poros	81
Figura 40 - Relação do incremento de volume e do volume acumulado com o diâmetro dos poros, em relação ao REF (a) Traços com fíler calcário; (b) Traços com metacaulim; (c) Traços com 10% de substituição de cimento Portland; (d) Traços com 20% de substituição de cimento Portland.	83
Figura 41 - Análise térmica (TG) dos concretos	85
Figura 42 - Análise térmica diferencial (DTG) dos concretos	87
Figura 43 - Difratogramas de raios-X das pastas correspondentes aos concretos estudados... 91	

Figura 44 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a resistência à compressão. a) Corpos de prova prismáticos; b) Corpos de prova cilíndricos.....	94
Figura 45 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a resistência à tração. a) Corpos de prova prismáticos; b) Corpos de prova cilíndricos.....	95
Figura 46 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e o módulo de elasticidade. a) Corpos de prova prismáticos; b) Corpos de prova cilíndricos.....	95
Figura 47 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a sorvidade. a) Corpos de prova prismáticos; b) Corpos de prova cilíndricos.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo de adições minerais utilizadas, em substituição e/ou adição ao cimento Portland, em trabalhos sobre concreto autoadensável que foram submetidos à carbonatação, publicados em periódicos no período de 2012 a 2018.	6
Tabela 2 - Resumo das condições de ensaio utilizadas pelos autores de trabalhos sobre concreto autoadensável que foram submetidos à carbonatação, publicados em periódicos no período de 2012 a 2018.	19
Tabela 3 - Resumo dos resultados de carbonatação natural e acelerada encontrados pelos autores de trabalhos sobre concreto autoadensável que foram submetidos à carbonatação, publicados em periódicos no período de 2012 a 2017.	24
Tabela 4 - Faixas de temperatura característica de decomposição dos hidratos segundo diversos autores	29
Tabela 5 - Propriedades do cimento CP II F - 40.....	34
Tabela 6 - Composição química do cimento CP II F - 40.....	35
Tabela 7 - Propriedades das adições minerais.....	36
Tabela 8 - Composição química das adições minerais.....	37
Tabela 9 - Propriedades dos agregados	39
Tabela 10 - Características do aditivo superplastificante.....	41
Tabela 11 - Critérios do ACI 237R-07 para dosagem de CAA	42
Tabela 12 - Nomenclatura e descrição dos traços utilizados	42
Tabela 13 - Percentual de cada material no esqueleto granular	42
Tabela 14 - Consumo em massa dos materiais	44
Tabela 15 - Resumos dos critérios de autoadensabilidade estabelecidos pela NBR 15823-1:2017	44
Tabela 16- Classificação dos concretos autoadensáveis de acordo com o ensaio de espalhamento e suas aplicações.....	45
Tabela 17 - Descrição dos índices de estabilidade visual (IEV)	46
Tabela 18 - Classificação dos concretos autoadensáveis de acordo com o ensaio da caixa L e suas aplicações	46
Tabela 19 - Classificação dos concretos autoadensáveis de acordo com o ensaio do funil V e suas aplicações	47
Tabela 20 - Resultados dos ensaios dos concretos autoadensáveis no estado fresco.....	54
Tabela 21 - Parâmetros reológicos teóricos dos concretos	60

Tabela 22 - Valores médios da resistência à compressão simples dos concretos	62
Tabela 23 - Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio dos concretos....	84
Tabela 24 - Porcentagem dos principais produtos de hidratação formados em cada traço, de acordo com Hoppe Filho et al. (2017).....	87
Tabela 25 - Porcentagem dos principais produtos de hidratação formados em cada traço, corrigidos para a mesma base de não voláteis, de acordo com Hoppe Filho et al. (2017)	88
Tabela 26 - Valores percentuais de C-S-H primário e secundário, de acordo com Alonso-Domínguez (2017).....	89
Tabela 27 - Síntese dos resultados obtidos nos ensaios do CAA nos estados fresco e endurecido	93

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AMV – Aditivo modificador de viscosidade

CAA – Concreto autoadensável

CC – Concreto convencional

d_F - Diâmetro final de espalhamento

EDX - Espectrometria por fluorescência de raios-X

g - Aceleração da gravidade

IEV - Índice de estabilidade visual

K - Coeficiente de carbonatação

Ks - Coeficiente de sorvidade

Ldc – Região de decarbonatação

Ldh – Região de desidratação

Ldx – Região de desidroxilação

SP – Superplastificante

γ - Taxa de cisalhamento

μ - Viscosidade plástica

ρ - Massa específica do concreto

τ - Tensão de cisalhamento

τ_0 - Tensão de escoamento

1 INTRODUÇÃO

Com o decorrer do tempo, o homem foi criando meios para desafiar seus próprios limites, o que proporcionou o surgimento de estruturas mais complexas e que sofriam um alto grau de sollicitação. Esses arranjos dificultaram a concretagem de elementos estruturais, já que os equipamentos de vibração não conseguiam perpassar as armaduras para vibrar o concreto da forma adequada. Assim, falhas de concretagem começaram a ser mais frequentes, diminuindo a durabilidade e vida útil das estruturas e causando riscos aos usuários. Tornou-se fundamental, então, a criação de uma alternativa que fosse capaz de passar por um emaranhado de armaduras, se adequando a qualquer taxa projetada e dispensando o adensamento externo. Surgiu assim o Concreto Autoadensável (CAA), desenvolvido inicialmente no Japão na década de 1980 (OKAMURA; OUCHI, 1999).

Para que um concreto possa receber a denominação de autoadensável é imprescindível que ele possua, simultaneamente, três características: fluidez, habilidade passante e coesão. Quando comparado ao concreto convencional, o CAA exige um maior cuidado na sua dosagem e produção, sendo necessário um controle rígido na escolha dos materiais e na sua variabilidade durante o processo. É importante a inclusão de um alto teor de finos e/ou a utilização de um aditivo modificador de viscosidade, que deixam a mistura mais estável e conseqüentemente menos suscetível à segregação durante todo o processo de transporte e lançamento nas fôrmas (EFNARC, 2002; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2014).

A caracterização do comportamento no estado fresco é fundamental para o concreto autoadensável. As características do concreto fresco, especialmente aqueles de consistência fluida, são muito influenciadas por suas propriedades reológicas, nominalmente a tensão de escoamento e a viscosidade plástica. A reologia do concreto é controlada pela fricção da pasta, onde as finas partículas presentes influenciam química e fisicamente seu comportamento. Essas duas propriedades funcionam juntas e evitam que o concreto segregue. Se a viscosidade plástica for muito baixa, então uma alta tensão de escoamento (em termos de CAA) é necessária para manter o concreto coeso. Já para altas viscosidades o valor da tensão de escoamento costuma ser insignificante. Geralmente a tensão de escoamento é relacionada à fluidez do concreto e a viscosidade plástica é associada a resistência à segregação (SHEINN; TAM, 2003; NIELSSON; WALLEVIK, 2003).

As propriedades do concreto dependem dos materiais e suas proporções que influenciam tanto o concreto em seu estado fresco como no seu estado endurecido. Para que uma estrutura de concreto atenda às especificações do projeto, é preciso considerar uma série de fatores como as propriedades dos materiais constituintes do concreto, a dosagem da mistura e a execução da concretagem. Assim, as propriedades do estado fresco causam impacto direto no comportamento do concreto endurecido que, basicamente, deve apresentar resistência mecânica e durabilidade compatíveis com as condições de projeto e ao ambiente ao qual a estrutura fica exposta.

Um dos fatores que contribuíram para a popularidade das estruturas de concreto armado é que o concreto fornece uma barreira de proteção para o aço, protegendo-o de agressões externas, além de garantir o meio alcalino necessário para que a armadura tenha sua proteção química. Isso relaciona diretamente a durabilidade das estruturas de concreto armado com a qualidade do cobrimento de concreto, que por sua vez está relacionada com a espessura e a permeabilidade desse material. A NBR 6118:2014 especifica os cobrimentos mínimos necessários de acordo com a classe de agressividade do ambiente em que a estrutura se encontra, dado que as agressões externas e demais interações das estruturas com o ambiente podem acarretar em comprometimentos de funcionalidade e estabilidade. A corrosão das armaduras aparece como a principal causa de danos nas estruturas de concreto armado, podendo ser provocada pela penetração de íons cloreto e/ou a carbonatação. (CASCUDO, 1999; SILVA, 2007).

Essa dissertação pretende avaliar o comportamento de diferentes traços de concreto autoadensável frente à ação da carbonatação acelerada, de acordo com o estabelecido pela ISO 1920-12:2015. Este trabalho contribui para o estudo sobre durabilidade e está inserido no Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (PECC-UnB), junto a trabalhos desenvolvidos por outros pesquisadores que abordaram corrosão de armaduras em estruturas de concreto (TEXEIRA, 1998; FEIJÃO, 2000; LARA, 2003; MAIA, 2003; COSTA, 2012); o caso específico da corrosão provocada por íons cloreto (FILHO, 2005; SANTOS, 2006) e métodos de proteção contra agentes agressivos (MONTEIRO, 1996; CASTANHEIRA, 1997; GUIMARÃES, 1997; VASCONCELOS, 1997; SILVA, 2005). Além dos trabalhos que abordaram diretamente o caso da carbonatação (POZZAN, 2001; PESSÔA, 2002; FIGUEIREDO, 2004; NEVES, 2006) e estudos em concreto autoadensável (MENDES, 2016; VIEIRA, 2016).

1.1 JUSTIFICATIVA

As características do CAA são muito influenciadas por suas propriedades reológicas (viscosidade plástica e a tensão de escoamento), sendo importante uma viscosidade moderada para garantir a estabilidade desejada e uma baixa tensão de escoamento, proporcionando o aumento da fluidez (MELO, 2005). A obtenção do CAA envolve o uso de agregados com granulometria controlada, aditivos plastificantes e superplastificantes, além de incorporação de finos para garantir a trabalhabilidade, sem ocorrência de segregação. Normalmente as pesquisas desenvolvidas com a incorporação de adições minerais no concreto autoadensável visam o estudo de propriedades mecânicas desassociadas a questões de durabilidade.

A utilização de finos no CAA contribui significativamente para a sustentabilidade da tecnologia do concreto, uma vez que grande parte das adições minerais é composta de resíduos de diversos setores industriais, que prejudicariam o meio ambiente se lançados de forma inadequada. A utilização de adições minerais em substituição ao cimento Portland é uma prática já comum na indústria da construção civil, porém é importante que essa substituição seja feita de maneira racional, assegurando que o desempenho do CAA seja mantido, tanto para as condições de lançamento como para as propriedades mecânicas e para a durabilidade.

Devido ao alto teor de finos o CAA tem uma microestrutura mais refinada em comparação ao concreto convencional com mesma relação água/cimento, o que contribui para que seu desempenho frente a ação de agentes deletérios seja superior. Por esse motivo não existem muitas pesquisas que avaliem os parâmetros de durabilidade do CAA.

Devido a inexistência de um ensaio normatizado de carbonatação acelerada, a comparação dos resultados de pesquisa era difícil, devido à grande variabilidade em função da ausência de padronização dos parâmetros de ensaio. Entretanto, com a promulgação da ISO 1920-12:2015 a qual será bastante relevante aos estudos futuros sobre carbonatação acelerada e espera-se uma melhoria na qualidade das pesquisas sobre o tema.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é avaliar a durabilidade do CAA frente à ação da carbonatação acelerada, segundo os critérios da ISO 1920-12:2015, substituindo-se o cimento Portland por fíler calcário e metacaulim, em combinações binárias e ternária.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Avaliar a influência da utilização de 10 e 20% de substituição de cimento Portland por filer calcário e metacaulim, em combinações binárias e ternária, nas propriedades do estado fresco do CAA, segundo requisitos da NBR 15823:2017;
- Estudar as propriedades mecânicas do CAA, através dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade;
- Estudar a absorção de água por capilaridade e a sorvidade do CAA; com diferentes adições e teores de substituição ao cimento Portland, avaliando como esses resultados influenciam na frente de carbonatação;
- Verificar como a frente de carbonatação se comporta nos traços de combinações binárias e ternária propostos, utilizando dois tipos diferentes de corpos de prova;
- Avaliar como as mudanças microestruturais provocadas pelas adições minerais interferem na durabilidade dos concretos, utilizando os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, análise termogravimétrica (TG/DTG) e difração de raios-X;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

O CAA aparece como uma evolução no âmbito dos concretos especiais e tem como principal característica sua capacidade de autoadensabilidade, ou seja, é capaz de se mover no interior das fôrmas, passando por qualquer espaço entre as armaduras devido apenas ao seu peso próprio, sem necessidade de nenhuma intervenção externa. Porém, essa fluidez aparece atrelada à uma grande coesão da mistura, o que resulta em peças mais homogêneas e com um tempo de vida útil maior. Sua dosagem exige um alto teor de finos, sendo comum o uso de aditivos e adições minerais (MELO, 2005).

A utilização do CAA ainda acontece de forma tímida, embora ele ofereça vantagens à obra, como: a eliminação de vibração externa, diretamente responsável pela diminuição da mão-de-obra, do consumo de energia e da geração de ruídos; agilidade na concretagem; obtenção de peças de maior qualidade e complexidade, tornando o procedimento mais econômico e aumento da vida útil das fôrmas. É importante salientar ainda o apelo ambiental, já que a maioria dos finos empregados são resíduos de indústrias de diversos setores, que seriam descartados e acabariam causando grande impacto ao meio ambiente (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2014).

A caracterização do comportamento no estado fresco é fundamental para o concreto autoadensável. Sabe-se que o CAA necessita de uma combinação adequada dos parâmetros reológicos (tensão de escoamento e viscosidade plástica) para uma mistura com mobilidade suficiente, mas sem riscos de segregação. A caracterização e o controle das propriedades do concreto fresco são mais críticas para o CAA do que para o concreto convencional, já que a qualidade final de estruturas executadas com CAA dependerá fortemente de tais propriedades. (ZERBINO et al., 2009)

O uso de adições minerais finas no CAA é inevitável para melhorar suas características de autoadensabilidade e reduzir o consumo de material, principalmente o cimento Portland. Essa redução diminui o calor de hidratação gerado pelo alto consumo de cimento, além de trazer vantagens econômicas. Diversos benefícios podem ser observados na utilização das adições minerais, sendo esse uso realizado já no processo produtivo ou incorporado posteriormente, em substituição ou adição a massa de cimento utilizada.

Uma prática que vem sendo aperfeiçoada na construção civil é a utilização de resíduos como adição mineral, já que uma grande quantidade de resíduos é gerada nas diversas etapas de uma obra, sendo observados sérios problemas no que diz respeito à sua destinação, que são consequência de um processo de gestão deficiente (GOMES et al., 2005). A Tabela 1 apresenta um resumo de trabalhos sobre carbonatação em CAA, publicados em periódicos internacionais de relevância, nos anos de 2012 a 2018, que reforçam a vasta incorporação de adições minerais e resíduos na produção de CAA, com destaque para Kim et al. (2015) que utilizaram resíduos de mineração de tungstênio, Matos et al. (2015) o pó de vidro, Carsana et al. (2016) cinza de incineração de resíduos urbanos, Sharma e Khan (2017) a escória de cobre e Muttashar et al. (2018) a granada.

Tabela 1 - Resumo de adições minerais utilizadas, em substituição e/ou adição ao cimento Portland, em trabalhos sobre concreto autoadensável que foram submetidos à carbonatação, publicados em periódicos no período de 2012 a 2018.

Autor	Ano	Adição mineral utilizada
Turk et al.	2012	CAA com substituições por cinza volante e sílica ativa
Mohammed et al.	2013	CAA com substituições por fíler calcário, cinza volante e sílica ativa
Sideris e Anagnostopoulos	2013	CAA com diferentes tipos de cimentos, adições e agregados
Zhao et al.	2013	Efeito da relação entre o peso dos agregados finos e o peso total de agregados em propriedades do CAA contendo substituições por cinza volante
Demirci e Sahin	2014	CAA com adição de fíler calcário e substituição por cinza volante
Nicolas et al.	2014	CAA e outros tipos de concreto com substituições por metacaulim
Owsiak e Grzmil	2014	CAA com substituições por fíler calcário, cinza volante e escória granulada de alto forno
Kim et al.	2015	CAA com substituições por resíduos de mineração de tungstênio
Calado et al.	2015	CAA com adições de metacaulim
Frazão et al.	2015	CAA reforçado com fibras com substituições por fíler calcário
Silva e Brito	2015	CAA com substituições por fíler calcário e cinza volante
Dogan e Ozkul	2015	CAA com diferentes tipos de cimentos pozolânicos
Zhao et al.	2015	CAA com substituições por cinza volante e escória granulada de alto forno
Río et al.	2015	Compósitos autoadensáveis de cimento com cinza volante, fibra de aço, fibra de polipropileno, agregado leve e compósitos autoadensáveis de cimento de alta resistência
Matos et al.	2015	CAA com adições de fíler calcário e pó de vidro

Fu et al.	2015	CAA com adições de cinza volante e escória granulada de alto forno
Singh e Singh	2016	CAA com substituições por cinza volante e metacaulim e substituições de agregado graúdo natural por reciclado
Singh e Singh	2016	CAA com teores altos e baixos de cinza volante e substituições de agregado graúdo natural por reciclado
Calvo et al.	2016	CAA com e sem substituição de fíler calcário para produção de pré-moldados
Carsana et al.	2016	CAA com substituições por cinza volante, fíler calcário e cinza de incineração de resíduos urbanos
Sharma e Khan	2017	CAA com escória de cobre em substituição ao agregado miúdo
Lenka e Panda	2017	CAA com substituições por metacaulim
Samimi et al.	2018	CAA com substituições por zeólito e pedra-pome
Sharma e Khan	2018	CAA com escória de cobre em substituição ao agregado miúdo e substituições por metacaulim
Massana et al.	2018	CAA de alta resistência com adições de nano e microsílca
Muttashar et al.	2018	CAA com granada em substituição ao agregado miúdo

Além disso, o CAA é muito versátil, e existe a possibilidade de criação de novas classes de concretos especiais. Frazão et al. (2015) utilizaram fibras de aço, o que caracteriza o concreto autoadensável reforçado com fibras. Singh e Singh (2016) utilizaram substituições de agregado graúdo natural por reciclado, que é um agregado leve, e caracteriza o concreto autoadensável leve. E o estudo de Ríó et al. (2015) evidencia bastante a versatilidade do CAA uma vez que são estudados CAA com substituições de fíler calcário e sílica ativa, CAA reforçado com fibra de aço e de polipropileno e CAA leve com vermiculita e perita como agregado leve. Sabe-se, ainda, que o CAA pode facilmente atingir classes de alta resistência mecânica, tendo-se o concreto autoadensável de alta resistência, como realizado por Massana et al. (2018).

2.1.1 Propriedades do CAA no estado fresco

As propriedades do concreto autoadensável no estado fresco estão ligadas a reologia dos concretos, avaliada através dos critérios de autoadensabilidade, tais como: fluidez (SF), viscosidade plástica aparente (VF ou VS) e habilidade passante (PL). A NBR 15823:2017 determina os critérios e parâmetros para classificação, controle e aceitação do CAA no estado fresco, sendo a fluidez avaliada conforme os resultados de espalhamento; a viscosidade segundo

o tempo de espalhamento (t_{500}) ou o tempo de escoamento (T_v) e a habilidade passante de acordo com os resultados da caixa L. É realizada, ainda, a avaliação do índice de estabilidade visual (IEV), que foi inserido como critério de aceitação na última revisão da norma.

A reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria sendo, assim, uma ferramenta apropriada para descrever a trabalhabilidade e mobilidade de compostos frescos à base de cimento, como pastas, argamassas ou concretos (WALLEVIK, 2003).

É de comum acordo na literatura que o concreto pode ser, com boa precisão, considerado um fluido de Bingham, cujo modelo reológico é descrito pela Equação 1.

$$\tau = \mu\dot{\gamma} + \tau_0 \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo o termo τ é a tensão de cisalhamento (Pa), μ é a viscosidade plástica (Pa.s), $\dot{\gamma}$ é taxa de cisalhamento (s^{-1}) e τ_0 é a tensão de escoamento (Pa). O valor da tensão de escoamento representa a resistência ao escoamento enquanto a viscosidade plástica é uma medida da resistência do material a um aumento na taxa de fluxo. Geralmente a tensão de escoamento é relacionada à fluidez do concreto e a viscosidade plástica é associada a resistência à segregação (SHEINN E TAM, 2003).

De maneira geral, a tensão de escoamento do CAA é muito baixa (próxima de zero), já a viscosidade plástica pode variar significativamente. No CAA, a cooperação entre os parâmetros reológicos é importante para a obtenção de uma mistura com mobilidade e estabilidade adequadas, evitando riscos de segregação (ZERBINO et al., 2009).

Zerbino et al. (2009) afirmam que no concreto convencional (CC) a tensão de escoamento pode variar de valores muito baixos até 1000 Pa ou mais, enquanto a viscosidade plástica (medida por um viscosímetro BML) varia apenas entre 15 e 114 Pa.s. Wallevik (2003) diz que a tensão de escoamento do CC pode variar de algumas centenas a milhares de Pa, enquanto o CAA, em comparação, tem valores quase nulos desse parâmetro, uma vez que estes variam de cerca de zero a 60 Pa. Já as medidas de viscosidade plástica têm uma grande variação, principalmente entre diferentes países, indo de 20 Pa.s para mais de 100 Pa.s (em casos extremos podem ser superior a 200 Pa.s) (WALLEVIK, 2003).

Ainda no tema reologia, existe o conceito da reografia, que consiste em um diagrama que relaciona a viscosidade (eixo x) e a tensão de escoamento (eixo y) e que revela de forma

sistemática os efeitos de diversas mudanças (materiais constituintes, tempo, teor de aditivos etc) no comportamento reológico de suspensões cimentícias. O efeito de dois ou mais constituintes pode ser adicionado em uma reografia para estimar o efeito combinado, o que constitui a chamada abordagem reografia-vetorizada. Essa abordagem é importante já que cada constituinte tem uma implicação significativamente diferente no comportamento do concreto no estado fresco. De modo geral, a utilização de reografias fornece informações que ajudam a descobrir onde se está, para onde ir e como chegar lá (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011).

Na Figura 1, têm-se os valores “necessários” do diâmetro final do espalhamento (em mm) determinando no ensaio com cone de Abrams para a obtenção do CAA. A área é um guia para o campo reológico aceitável do CAA, sendo a área escura no centro considerada como a “zona ótima”. Pode-se notar que se a viscosidade plástica for baixa ou abaixo de 40 Pa.s, o CAA deve ter um valor de tensão de escoamento significativo (dependendo da viscosidade). Por outro lado, se o CAA é “viscoso”, isto é, com viscosidade plástica acima de 70 Pa.s, o valor de tensão de escoamento deve ser aproximadamente zero. Vale salientar que esses valores são baseados em anos de pesquisa desenvolvida no Icelandic Building Research Institute (IBRI) (WALLEVIK, 2003).

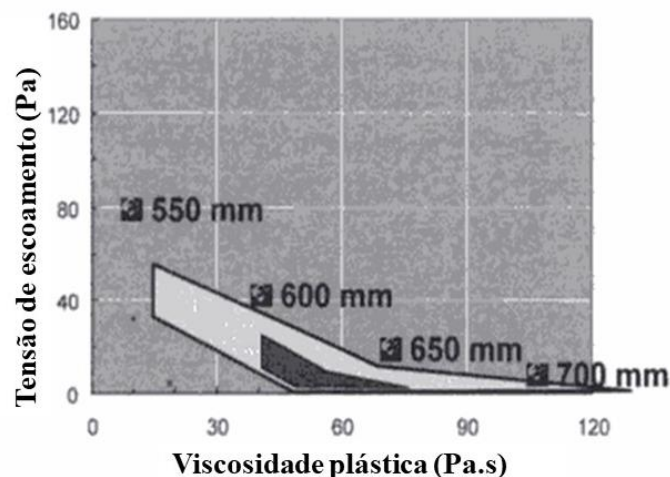


Figura 1 - Guia para zona reológica do CAA. Adaptado de Nielsson e Wallevik, (2003).

Zerbino et al. (2009) afirmam que o formato da zona de autoadensabilidade demonstra a necessidade de interação entre os parâmetros reológicos e a segregação do concreto é prevenida quando os dois parâmetros estão adequadamente equilibrados. Os concretos de alta viscosidade geralmente requerem uma tensão de escoamento muito baixa (perto de zero), enquanto uma

maior tensão é recomendada em um CAA de baixa viscosidade. Porém, se ambos os parâmetros forem muito baixos, o risco de segregação aumenta.

A reologia do concreto é controlada pela fricção da pasta, onde as finas partículas presentes influenciam química e fisicamente seu comportamento. A tensão de escoamento indica a distância entre as partículas da pasta, enquanto que a viscosidade representa a frequência de contato entre elas. Os materiais componentes dos concretos, com destaque para os aditivos químicos e adições minerais, exercem grande influência no seu comportamento reológico. Em comparação ao cimento, as adições adsorvem grande quantidade de água, o que reduz a água livre da mistura e, assim, promove um aumento da viscosidade e estabilidade. Já o aumento da fluidez sofre maior influência do uso de aditivos superplastificantes, cuja presença é fundamental para que os finos contribuam para o melhor empacotamento da mistura granular. Porém, as adições também podem contribuir para a fluidez devido a sua elevada finura, uma vez que os pequenos grãos preenchem os vazios entre os maiores (cimento e agregados), promovendo um melhor arranjo granulométrico e conseqüente melhor aproveitamento da água de amassamento (GALLIAS et al., 2000).

2.1.2 Parâmetros reológicos teóricos

Uma descrição completa do comportamento do concreto no estado fresco pode ser realizada com o uso de viscosímetros ou reômetros (ZERBINO et al., 2009). Os viscosímetros e reômetros mais avançados geralmente são projetados para serem operativamente insensíveis, ou seja, as variações na técnica de realização do teste não afetam os resultados obtidos. Além disso, eles determinam os parâmetros do material em termos de grandezas físicas fundamentais, não dependendo dos detalhes do aparelho com o qual são medidos (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011). Porém esses equipamentos são complexos e dispendiosos e sua utilização fica restrita a centros de pesquisa. Desta forma, muitos estudos foram desenvolvidos para avaliar a relação dos parâmetros reológicos medidos por reômetros com valores empíricos obtidos em campo utilizando-se equipamentos mais simples, como o cone de Abrams.

Sedran e De Larrard (1999) propuseram duas equações que estimam os chamados parâmetros reológicos teóricos utilizando como dados de entrada o diâmetro final de espalhamento, o t_{500} e a massa específica do concreto no estado fresco. Vale salientar que essas equações foram propostas a partir de resultados de concretos fluidos, que não são necessariamente autoadensáveis.

A viscosidade plástica se relaciona com o tempo necessário para o concreto atingir a marca de 500 mm (t_{500}) pela Equação 2, cujo erro médio é de 35 Pa.s.

$$\mu = \frac{\rho \cdot g}{10000} (0,026d_F - 2,39)t_{500} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo μ é a viscosidade plástica em Pa.s, ρ a massa específica do concreto em kg/m^3 , d_F o diâmetro final de espalhamento em mm, t_{500} o tempo necessário para o concreto alcançar um espalhamento de 500 mm e g a aceleração da gravidade em m/s^2 .

Já a tensão de escoamento pode ser relacionada com o diâmetro final de espalhamento através da Equação 3, que tem um erro médio de 95 Pa.

$$\tau_0 = \frac{\rho \cdot g}{11740} (808 - d_F) \quad (\text{Equação 3})$$

Em que τ_0 é a tensão de escoamento em Pa, ρ a massa específica do concreto em kg/m^3 , d_F o diâmetro final de espalhamento em mm e g a aceleração da gravidade em m/s^2 .

Nos gráficos apresentados na Figura 2, têm-se os dados experimentais utilizados para a proposição das Equações 2 e 3. Nota-se que a relação entre valores teóricos, que foram obtidos através dos ensaios empíricos, e os valores experimentais, obtidos com um reômetro, está próxima a reta, ou seja, esses valores são correspondentes. Percebe-se também que a maioria dos valores de tensão de escoamento está na região de 0 a 400 Pa e os valores de viscosidade plástica na região de 0 a 100 Pa.s, mas com vários pontos atingindo valores até 200 Pa.s.

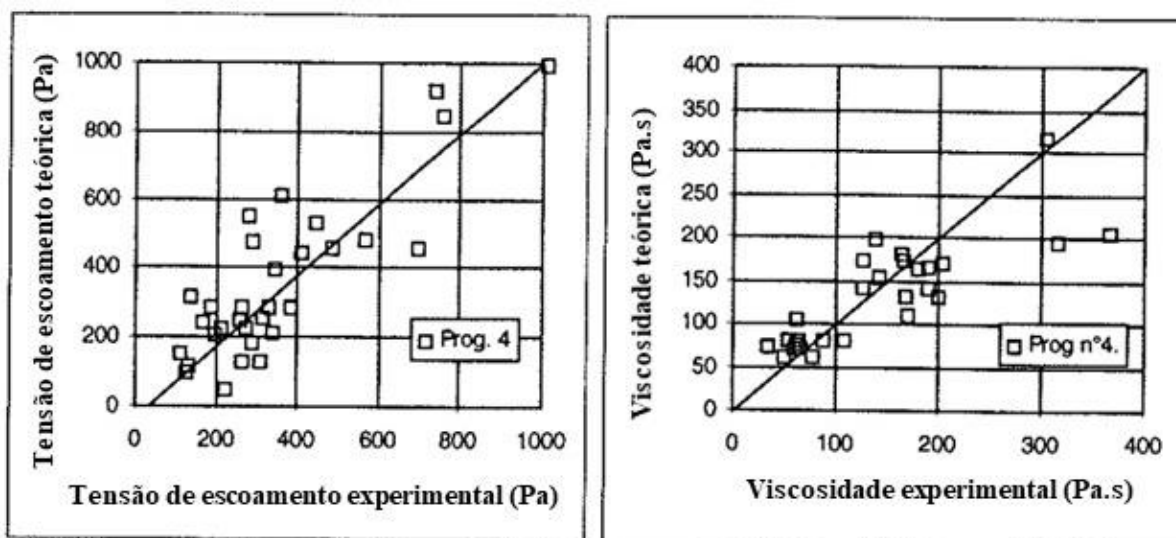


Figura 2 - Correlação entre os resultados teóricos de viscosidade plástica e tensão de escoamento com os resultados experimentais obtidos utilizando um viscosímetro.

Na Figura 3 podem ser vistas as “caixas de trabalhabilidade” do CAA, propostas por Wallevik e Wallevik (2011). Essas “caixas” são uma área dentro de um reograma, e consistem em um certo domínio de tensão de escoamento e viscosidade plástica que caracterizam o material. Cada “caixa” está associada a um tipo específico de concreto, de modo que várias “caixas” podem ser representadas em um único reograma. Deve ficar claro que uma “caixa de trabalhabilidade” não precisa necessariamente consistir em um quadrado perfeito, podendo ser um polígono bidimensional ou regiões pontuadas sem um limite exato. Nota-se, pela Figura 3, que existe uma área de valores geralmente típicos que caracterizam um CAA e uma outra, menor, com os valores mais recomendados dos parâmetros reológicos. O termo “HY” significa alta tensão de escoamento, “LV” baixa viscosidade plástica e “Easy CC” são valores atribuídos a concretos de fácil adensamento, mas que não são autoadensáveis.

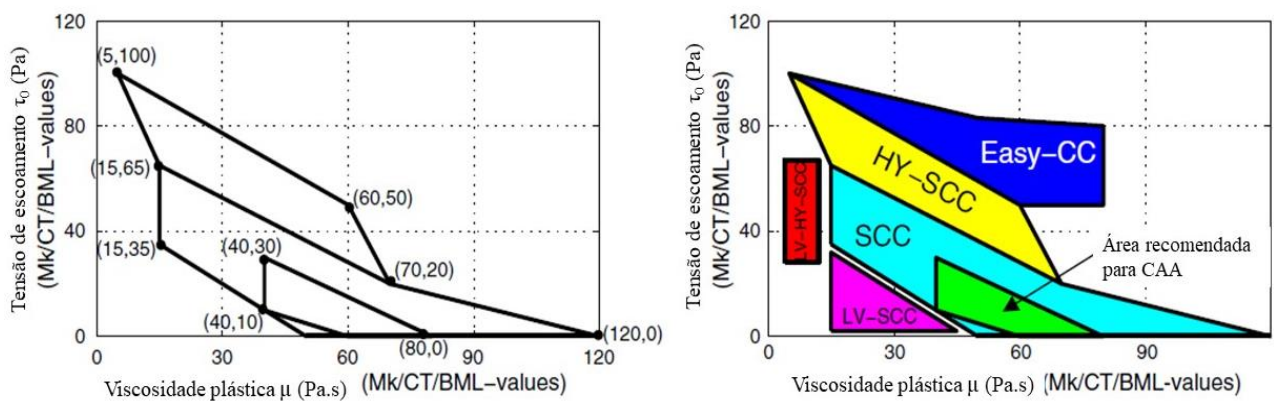


Figura 3 - Domínio dos parâmetros reológicos para CAA, adaptado de Wallevik e Wallevik (2011)

Wallevik e Wallevik (2011) apresentam em seu trabalho o gráfico da Figura 4, onde pode-se observar os valores típicos de viscosidade plástica e tensão de escoamento de acordo com o país onde o ensaio foi realizado.

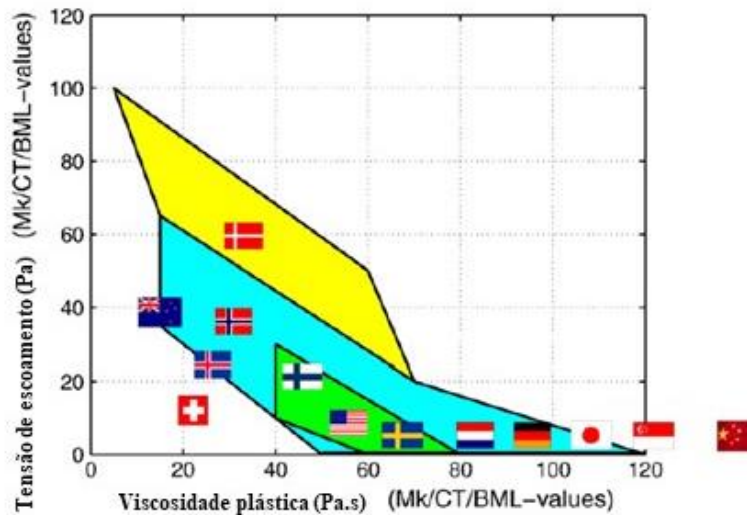


Figura 4 - Valores típicos de viscosidade plástica e tensão de escoamento após realização de ensaios em diferentes países.

Fonte: (WALLEVIK E WALLEVIK, 2011).

É importante observar que não existem dados característicos do Brasil, o que demonstra a importância de estudos que visem a obtenção desses resultados. O trabalho de Mendes (2016) aparece como pioneiro nesse âmbito, uma vez que foram utilizadas as Equações 2 e 3 para o cálculo dos parâmetros reológicos teóricos do CAA e encontrada uma boa correlação com resultados das argamassas referentes a esses concretos, que foram obtidos utilizando um reômetro.

2.1.3 Propriedades do CAA no estado endurecido

As características do estado endurecido do concreto são relacionadas ao seu desempenho no ambiente de utilização e estão ligadas a questões mecânicas, da estrutura porosa e de durabilidade. O concreto é um material que pode ser trabalhado para resistir a diferentes níveis de solicitação, levando em consideração o porte da obra, a tecnologia adotada e ainda a relação custo-benefício. A resistência pode ser resumida como a capacidade de um material absorver as cargas aplicadas sem romper (ISAIA, 2011). O comportamento mecânico do concreto normalmente é avaliado através de três propriedades: a resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade.

Turk et al. (2012) produziram CAA com 25, 30, 35 e 40 % de substituição de cimento Portland por cinza volante e 5, 10, 15 e 20% por sílica ativa, além de um concreto convencional e um traço de referência, ambos sem adições minerais. A resistência a compressão foi determinada aos 3, 7, 28 e 130 dias e encontraram que todas as misturas com adição mineral, independente

do tipo e teor de substituição, tiveram maior resistência que o concreto convencional em idades avançadas. Entre as adições a sílica ativa promoveu o maior ganho, o que pode ser explicado pela redução do tamanho dos poros e pelo refinamento dos cristais causado pela adição, que tem partículas muito finas e reativas.

Nicolas et al. (2014) estudaram CAA, concretos de liberação imediata, concretos de uso geral, concretos com função estrutural e concretos de baixo e alto desempenho contendo 100% de cimento Portland e com uma substituição de 25% por metacaulim. Nos tipos de concreto analisados as misturas que continha metacaulim apresentaram maior resistência a compressão após um ano.

Kim et al. (2015) produziram CAA com substituições de cimento Portland por resíduos de mineração de tungstênio, nos teores de 0% (concreto de referência), 10, 20, 30 e 40% e encontraram que a resistência a compressão diminuiu 30, 36, 40 e 55% de acordo com o respectivo aumento do teor de incorporação do resíduo.

Matos et al. (2015) produziram um traço de CAA com 30% de adição de fíler calcário (referência) e outro onde metade do fíler foi substituído por pó de vidro. Em relação às propriedades mecânicas, ambas as misturas apresentaram ganho de resistência e, aos 83 dias, o traço com pó de vidro atingiu valores mais elevados (74 MPa) que o referência (69 MPa). Uma tendência similar foi observada quanto ao módulo de elasticidade, mas neste caso a influência do pó de vidro não foi tão pronunciada.

Zhao et al. (2015) produziram CAA com substituições de cimento Portland por cinza volante e escória granulada de alto forno, nos teores de 20, 30 e 40% para cada adição, além da mistura de referência. Eles realizaram ensaio de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias e encontraram que a resistência dos concretos diminuiu com o aumento do teor de substituição de ambas as adições. A diferença foi mais pronunciada nas primeiras idades, com valores até 42% menores em relação a referência. Aos 90 dias, porém, essa diferença diminuiu significativamente, chegando apenas até um máximo de 5%. Isso se justifica pela reação pozolânica que continua formando produtos de hidratação em idades mais avançadas

Como o concreto é um material poroso, a grande maioria dos processos e mecanismos que provocam a sua deterioração estão relacionados com a movimentação de água no seu interior, sendo essa água pura ou contaminada. Essa porosidade (volume, dimensão e interconectividade dos poros) é regida por características intrínsecas dos materiais constituintes do concreto e de

sua dosagem. A sorvidade é uma característica intrínseca do material, relacionada à absorção capilar de água, porosidade e interconexão entre poros, ou seja, trata-se do fenômeno de transporte de fluídos nos materiais porosos, especificamente a capacidade deles de absorver e transmitir água por capilaridade.

Turk et al. (2012), que produziram CAA com 25, 30, 35 e 40 % de substituição de cimento Portland por cinza volante e 5, 10, 15 e 20% por sílica ativa, além de um concreto convencional e um traço de referência, ambos sem adições minerais encontraram que os valores de sorvidade dos corpos de prova de CAA com cinza volante e sílica ativa foram inferiores aos encontrados no CC, independentemente do tipo e quantidade de adições minerais. As misturas com sílica ativa apresentaram os valores de sorvidade mais baixos em comparação aos demais traços executados e concluíram que elas tinham a zona de transição menos porosa e o refinamento da estrutura dos poros.

Sideris e Anagnostopoulos (2013) produziram 8 tipos de CAA utilizando fíler calcário, com diferentes classes de resistência e os respectivos concretos convencionais para comparação. Considerando a sorvidade, os autores observaram uma maior durabilidade em todas as misturas de CAA em relação aos concretos convencionais da mesma classe de resistência. Porém, diferença no coeficiente de sorvidade entre CAA e CC em geral diminuiu à medida que a relação a/c também diminuiu e tornou-se bem próxima para as misturas da classe de maior resistência testada, que tinha relação a/c = 0,42 e classe de resistência C35.

Owsiak e Grzmil (2014) produziram 3 traços de CAA com 40% de substituição de cimento Portland por escória granulada de alto forno, cinza volante e fíler calcário e eles foram submetidos a carbonatação acelerada por 90 dias. Os corpos de prova carbonatados apresentaram maior absorção superficial de água e maior penetração de água em relação aos não carbonatados, sendo as maiores absorções as do traço com fíler calcário, seguido pelo traço com cinza volante e por último o traço com escória granulada de alto forno, que apresentou os menores valores.

2.2 DURABILIDADE

A NBR 6118:2014 define durabilidade como a “capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.” As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do

projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil. Segundo a NBR 15575-1:2013 “a durabilidade de um produto se extingue quando ele deixa de atender às funções que lhe foram atribuídas, quer seja pela degradação que o conduz a um estado insatisfatório de desempenho, quer seja por obsolescência funcional.”

Para se avaliar questões de durabilidade, é importante considerar os mecanismos de envelhecimento e deterioração da estrutura de concreto, que a NBR 6118:2014 elenca como: lixiviação, expansão por sulfato e reação álcali-agregado; além dos mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura, que se referem a despassivação da armadura por ação de cloretos ou da carbonatação.

A durabilidade de uma estrutura de concreto está intimamente associada à permeabilidade da camada superficial, que deve limitar a entrada de substâncias que podem iniciar ou propagar possíveis ações deletérias (CO₂, cloreto, sulfato, água, oxigênio, álcalis, ácidos etc.). Na prática, a durabilidade depende da seleção do material, da composição do concreto, bem como do controle durante a concretagem, compactação, acabamento e cura (EFNARC, 2005).

Uma estrutura possui uma boa durabilidade quando consegue manter seu desempenho pelo tempo de vida útil projetado, sob a ação de fatores de degradação, sejam eles físicos como fissuração causada pela cristalização de sais nos poros, abrasão, exposição a temperaturas extremas, ação de intempéries; ou químicos como a lixiviação da pasta de cimento devido a soluções ácidas, reação álcali-agregado, ataque por sulfato e corrosão das armaduras. É importante salientar que nenhum material é indefinidamente durável, visto que as interações com o meio ambiente, as propriedades dos constituintes e a microestrutura se modificam com o passar do tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Existem diversos fatores que influem na durabilidade de uma estrutura, o concreto é um deles, podendo-se destacar ainda a espessura do revestimento, a qualidade de execução das peças, deformabilidade da estrutura. Helene (1993) descreve a durabilidade como dependente de quatro fatores, sendo eles: Composição ou traço do concreto, compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura, cura efetiva do concreto armado e revestimento ou espessura do concreto de revestimento das armaduras. Sabe-se que uma definição mais adequada de durabilidade exige não só a avaliação desses fatores, mas a definição de parâmetros básicos

como a agressividade do meio, características construtivas, critérios de desempenho e a vida útil desejada para a estrutura.

A corrosão das armaduras aparece como a principal causa de danos nas estruturas de concreto armado, podendo ser provocada pela penetração de íons cloreto e/ou a carbonatação e é definida como a degradação de um material por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, podendo estar associada ou não a esforços mecânicos. A armadura que está presente no interior alcalino do concreto está protegida da corrosão por uma espécie de filme extremamente fino e muito aderente ao aço, que pode ser composto por variações da magnetita (Fe_3O_4 ao $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), e que o envolve e tem um caráter passivo, e é chamado de proteção química ou camada de passivação. Caso o concreto que esteja funcionando como cobertura das armaduras na estrutura apresente alguma patologia, ele passa a não agir mais como uma proteção, permitindo que as armaduras sofram ataque desses íons agressivos ou ainda de substâncias ácidas presentes na atmosfera (SILVA, 2007; RIBEIRO et al., 2014).

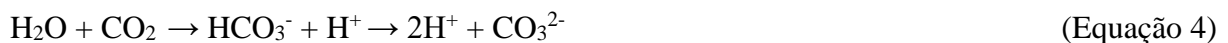
Uma consequência da corrosão é a perda de massa, com diminuição da seção da armadura e o surgimento de fissuras na direção paralela a esta. Os produtos da corrosão são uma série de óxidos e hidróxidos de ferro que ocupam volumes 3 a 10 vezes maiores que o aço original, provocando tensões internas que aumentam com o avanço do processo corrosivo e consequente fissuração do concreto. Pode também ser observado o aparecimento de manchas avermelhadas devido aos óxidos de ferro (HELENE, 1993; RIBEIRO et al., 2014).

2.2.1 Carbonatação

A carbonatação é um fenômeno que acontece naturalmente nas estruturas de concreto, sendo necessária a presença de determinada concentração de dióxido de carbono e certo teor de umidade na atmosfera. É um processo físico-químico que progride lentamente no interior das estruturas de concreto pela penetração do dióxido de carbono (CO_2) a partir da superfície externa para a interna. Depende, basicamente, do processo físico governado pela estrutura da rede de poros (geometria, distribuição, interconectividade e tortuosidade) que controla a difusão do CO_2 e do processo químico da reação de neutralização da água do poro saturada de hidróxido de cálcio e dos compostos alcalinos hidratados contidos na matriz cimentícia que, por ciclos de molhagem e secagem, precipitam o carbonato de cálcio, sob a ação do anidrido carbônico. O principal efeito da carbonatação é a redução da alcalinidade do concreto. A redução do pH altera as condições de estabilidade química da película passivante da armadura pela redução do

hidróxido de cálcio na solução de poros, podendo iniciar seu processo corrosivo quando na presença de umidade. A corrosão produz óxidos e hidróxidos de ferro, que aumentam de volume, fissurando e comprometendo as estruturas de concreto armado (TAYLOR, 1997; NUNES, 2014; MAZZA, 2015).

O processo de carbonatação, que ocorre pela reação entre o CO₂ da atmosfera e compostos hidratados do cimento, está diretamente ligado à facilidade que o dióxido de carbono tem para difundir-se no interior do concreto, às condições ambientais e às propriedades de permeabilidade do concreto. Segundo Taylor (1997), quando o CO₂ penetra no concreto ele é dissolvido na água dos poros da pasta cimento, ocorrendo a formação do ácido carbônico (Equação 4). Sabe-se que a dissolução dos aluminatos e silicatos hidratados formados no processo de hidratação do cimento torna a alcalinidade da água contida nos poros da pasta cimento Portland alta (com pH entre 13 e 14), o que acontece devido às hidroxilas e íons Ca²⁺ (Equação 5). Desta forma, esses álcalis de cálcio (Ca²⁺) reagem com os íons carbonatos provenientes do CO₂, formando o carbonato de cálcio (Equação 6), cujo pH fica em torno de 9, havendo uma conversão dos compostos hidratados em elementos menos alcalinos.



Em condições naturais de exposição (0,03 a 1% de CO₂), o avanço da frente de carbonatação leva vários anos para apresentar resultados passíveis de análise. Por isso, muitas pesquisas são desenvolvidas utilizando um sistema de teste acelerado, que submete o concreto a teores elevados de CO₂ e permite um controle rígido de todas as condições de exposição, fornecendo uma resposta rápida do comportamento do material ante a carbonatação. Outra vantagem de acelerar o processo de carbonatação é a redução dos custos de pesquisa. Para a medida do avanço da frente de carbonatação utiliza-se uma solução de fenolftaleína, uma vez que na parte não carbonatada da amostra, onde o concreto ainda é altamente alcalino, ocorre uma coloração roxo-púrpura, enquanto que na parte carbonada da amostra, onde devido à carbonatação a alcalinidade foi reduzida, nenhuma coloração é observada (RICHARDSON, 1988; TAYLOR, 1997; PAULETTI et al., 2007).

A partir da profundidade de carbonatação determinada experimentalmente, é possível estimar a velocidade de carbonatação do concreto por meio da determinação do coeficiente de

carbonatação (K). Diversas formulações matemáticas foram propostas, mas nesse trabalho será utilizada a proposição da Equação 7, sendo x é a profundidade de carbonatação em mm, K o coeficiente de carbonatação, que é dependente do ambiente e do material, em mm/semana^{0,5} e t o tempo de exposição ao ambiente acelerado de carbonatação em semanas. Segundo Richardson (1988), fica claro que a relação entre a profundidade de carbonatação e a idade do concreto não é linear.

$$x = K \cdot \sqrt{t} \quad (\text{Equação 7})$$

Existe, ainda, uma grande dificuldade no meio técnico de comparar os resultados de pesquisas sobre carbonatação acelerada, devido à grande variabilidade em função da ausência de padronização nos ensaios. Não existe um consenso quanto ao tipo e a dimensão dos corpos de prova; a temperatura, a umidade relativa e a concentração de CO₂ do ensaio; nem quanto ao tempo de exposição e aos intervalos de medições do avanço da frente de carbonatação. Isso fica evidente ao se observar a Tabela 2, onde encontra-se um resumo das condições de ensaio utilizadas por autores de trabalhos sobre carbonatação em CAA, publicados em periódicos internacionais de relevância, nos anos de 2012 a 2018.

Tabela 2 - Resumo das condições de ensaio utilizadas pelos autores de trabalhos sobre concreto autoadensável que foram submetidos à carbonatação, publicados em periódicos no período de 2012 a 2018.

Autor	Ano	Tipo e dimensões dos corpos de prova	Tempo de medição	Temperatura	Umidade Relativa	Concentração de CO₂
Turk et al.	2012	Cúbico de 100 × 100 × 100 mm	6, 24 e 72 horas	*	55%	40%
Mohammed et al.	2013	Cilíndrico de 60 x 120 mm	30, 60, 90, 120 e 240 dias	entre 19 e 24 °C	entre 50 a 80%	100%
Sideris e Anagnosto poulos	2013	Cilíndrico de 60 x 100 mm	12, 24 e 36 meses	21 °C	60%	340 ppm
Zhao et al.	2013	Prismático de 100 x 100 x 300 mm	3, 7, 14 e 28 dias	20 ± 3 °C	70 ± 5%	20 ± 3%
Demirci e Sahin	2014	Testemunho cilíndrico de 80 x 160 mm retirado de uma viga	28 dias	20 ± 18 °C	50 ± 5%	50 ± 5%

		experimental de 200 x 250 x 3000 mm				
Nicolas et al.	2014	Prismático de 70 x 70 x 280 mm	28 dias	20 °C	65%	50%
Owsiak e Grzmil	2014	Prismático de 80 × 80 × 350 mm	90 dias	20 °C	60 ± 5%	4,5 ± 0,5%
Kim et al.	2015	Cilíndrico de 100 x 200 mm	7, 14, 28, 56 e 84 dias	20 ± 2 °C	60 ± 5%	10 ± 0,5%
Calado et al.	2015	Cilíndrico de 100 x 200 mm	28 e 90 dias	29 °C.	70%±10 %	7,5% ± 2,5%
Frazão et al.	2015	Prismático de 100 x 100 x 600 mm	Medições em intervalos não especificados até 294 dias	20 ± 2 °C	55 ± 5%	5,0 ± 0,5%
Silva e Brito	2015	Cilíndrico de 100 x 50 mm	7, 28, 91 e 182 dias	23 ± 3 °C	60 ± 5%	5 ± 1 %
Dogan e Ozkul	2015	Cúbico de 100 × 100 × 100 mm	3 anos (carbonatação natural)	23 ± 2 °C	65 ± 5%	x
Zhao et al.	2015	Prismático de 100 x 100 x 300 mm	3, 7, 14 e 28 dias	20 ± 3 °C	70 ± 5%	20 ± 3%
Río et al.	2015	Cúbico de 100 × 100 × 100 mm	12 meses (carbonatação natural)	*	*	0,06%
Matos el at.	2015	Cilíndrico de 150 x 300 mm	28 dias	23 ± 3 °C	60 ± 5%	5 ± 0,1%
Fu et al.	2015	Prismático de 100 x 100 x 400 mm	3, 7, 14, 21, 28, 60 e 120 dias	20 ± 5°C	70 ± 5 %	20 ± 3 %
Singh e Singh	2016	Prismático de 100 x 100 x 500 mm	4, 8, 12 e 16 semanas	25 ± 2 °C	entre 40 e 70%	4%
Singh e Singh	2016	Prismático de 100 x 100 x 500 mm	4, 12 e 16 semanas	25 ± 2 °C	entre 40 e 70%	4%

Calvo et al.	2016	Cilíndricos de 75 x 150 mm e 40 x 80 mm	12 meses (carbonatação natural)	*	em média 50%	x
Carsana et al.	2016	Cúbico de dimensões não especificadas	Diversas medições em intervalos não especificados até 570 dias	20 °C	65%	100%
Sharma e Khan	2017	Prismático de 100 x 100 x 500 mm	4, 8, 12 e 16 semanas	25 ± 2 °C	entre 40 e 70%	4%
Lenka e Panda	2017	Cilíndrico de 100 x 200 mm	7 dias (carbonatação natural) após 90 dias de cura	*	*	*
Samimi et al.	2018	Cilíndrico de 100 x 50 mm	30, 60 e 90 dias	23 ± 2 °C	73 ± 2 %	5%
Sharma e Khan	2018	Prismático de 100 x 100 x 500 mm	4, 8, 12 e 16 semanas	25 ± 2 °C	entre 40 e 70%	4%
Massana et al.	2018	Cilíndrico de 100 x 200 mm	60 e 200 dias	20 ± 2 °C	75 ± 5 %	4,7 ± 2,5%
Muttashar et al.	2018	Cilíndrico de 100 x 200 mm	60 dias	26 °C	Entre 55 e 60%	4%

*Não especificado

Nos trabalhos realizados com corpos de prova cúbicos (Turk et al., 2012; Dogan e Ozkul, 2015; Río et al., 2015), estes tinham a mesma dimensão (100 x 100 x 100 mm), porém as demais condições eram diferentes, e dois destes submeteram as amostras à carbonatação natural. Nos demais trabalhos, que utilizam corpos de prova prismático ou cilíndrico, não há consenso quanto às dimensões, exceto quando um mesmo autor publica mais de um trabalho.

Turk et al. (2012) comparam CAA com diferentes teores de substituição de cimento Portland por cinza volante (CV) e sílica ativa (SA) a um concreto convencional (CC) e encontraram que a resistência à carbonatação do CC foi menor do que as misturas de CAA para os períodos de carbonatação acelerada analisados. Porém, a resistência à carbonatação do CAA diminuiu com o aumento do teor de CV e SA.

Dogan e Ozkul (2015) estudaram carbonatação natural de CAA com diferentes tipos de cimentos pozolânicos após 3 anos de exposição ambiental. Foram observados dois parâmetros que afetam a carbonatação: a permeabilidade e a quantidade de materiais carbonatáveis. Algumas misturas continham mais cal livre do que outras, que por sua vez exibiam uma sorvidade ligeiramente menor. Eles concluíram que estes efeitos opostos pareciam compensar um ao outro de modo que ambos os concretos exibiram o mesmo desempenho de carbonatação.

Nota-se também que algumas informações são omitidas ou transmitidas de maneira vaga, como nos casos de Turk et al. (2012) que não mencionam a temperatura de ensaio, Frazão et al. (2015) que não especificam os intervalos de medição do avanço da frente de carbonatação e Carsana et al. (2016) que também não especificam os intervalos corretos de medição e nem mencionam as dimensões dos corpos de prova.

Porém, dentre todas as condições de ensaio a que tem uma disparidade maior entre os autores é a concentração de CO₂, que varia de valores muito baixos (0,06%) até 100% do volume. Sabe-se que os resultados obtidos nos ensaios acelerados, onde as condições de contorno são rigorosamente controladas, nunca ocorrerão no ambiente natural das estruturas, uma vez que os eventos reais de degradação são desencadeados por variáveis aleatórias. Entretanto esses resultados permitem gerar modelos de previsão do avanço da frente de carbonatação em estruturas reais e apresentam informações de durabilidade do material utilizado antes de sua aplicação, sendo de extrema importância que o meio técnico e científico tenha possibilidade de comparar seus resultados.

Calado et al. (2015) compararam dois tipos de concreto, um convencional (CC) e um CAA, e os resultados obtidos mostraram que o CAA apresenta uma resistividade elétrica média 11,4% maior que o CC; uma difusão de íons cloreto 63,3% da encontrada no CC; uma penetração média da carbonatação acelerada 45,8% melhor que o CC e a porosidade aberta média 55,6% menor que o CC, concluindo que, geralmente, o CAA possui melhores indicadores de durabilidade do que o concreto convencionalmente vibrado.

Singh e Singh (2016) avaliaram a resistência à carbonatação e resistividade elétrica, em CAA com agregados reciclados e incorporação de adições minerais (cinza volante e metacaulim) e observaram uma relação linear entre a profundidade de carbonatação e o período de exposição, bem como entre o coeficiente de carbonatação e a resistência à compressão.

Sideris e Anagnostopoulos (2013) produziram CAA de resistência à compressão média com diferentes tipos de cimentos Portland, adições e agregados e compararam com concretos convencionais de mesma resistência ou mesma relação a/c. O CAA mostrou um melhor desempenho para absorção de água por capilaridade, profundidade de carbonatação e penetração de cloreto quando comparado a um concreto convencional de mesma resistência. Quando a medida comparativa era a relação a/c a melhora no desempenho de durabilidade do CAA foi mais significativa nas misturas produzidas com alta relação a/c, e uma vez que essa relação diminuía os valores que caracterizam a durabilidade tornaram-se mais semelhantes.

Elgalhud et al (2016) encontraram que a carbonatação do concreto aumenta com o aumento do teor de filler calcário adicionado em substituição ao cimento Portland, estando o valor dentro do intervalo permitido pela norma BS EN 197-1: 2011. Este efeito, no entanto, é menos acentuado se o concreto for dosado tendo como base uma mesma resistência à compressão do que se o critério utilizado for a mesma relação a/c, considerando em comparação um concreto apenas com cimento Portland.

Lye et al (2015) afirmam que, em termos gerais, há consenso na literatura publicada nos últimos 35 anos que o uso de cinzas volantes em adição ao cimento no concreto causa aumento da carbonatação, cuja extensão, em geral, aumenta com a elevação do teor de adição. A escala exata deste aumento na carbonatação pode variar dependendo de uma série de fatores associados com os parâmetros de concepção da mistura (mesma resistência ou mesma relação a/c), características químicas e físicas da cinza volante utilizada e da estrutura de poros do concreto endurecido.

Papadakis (2000) demonstrou, para argamassas contendo várias quantidades de cinza volante e sílica ativa como substitutos parciais do cimento, que a profundidade de carbonatação aumenta com o aumento do teor de pozolana, uma vez que a reação pozolânica consome hidróxido de cálcio, o que diminui a reserva alcalina do concreto. Porém, Zhu e Batros (2003) descobriram que em comparação com o CC, o CAA apresenta permeabilidade e absorção por capilaridade menores, que pode ser atribuído a uma zona de transição mais densa e homogênea e refinamento

da estrutura de poros, o que dificulta o ingresso de agentes deletérios no concreto e aumenta a durabilidade. Portanto, é sempre importante um estudo cuidadoso de dosagem para equilibrar os efeitos das adições e se produzir o concreto com as melhores propriedades e o menor custo.

A publicação da norma ISO 1920-12:2015 aparece como uma grande possibilidade de padronização dos ensaios de carbonatação acelerada, uma vez que ela fixa os parâmetros de avaliação e, se utilizada como base dos estudos futuros, possibilitará a comparação dos resultados, a geração de um banco de dados confiável relativo à durabilidade e a possibilidade de avanços na previsão segura da vida útil das estruturas. Na Tabela 3 podem ser visualizados os resultados sobre carbonatação, natural ou acelerada, encontrados pelos autores supracitados, que realizaram estudos sobre carbonatação em CAA e publicaram em periódicos entre os anos de 2012 a 2017.

Tabela 3 - Resumo dos resultados de carbonatação natural e acelerada encontrados pelos autores de trabalhos sobre concreto autoadensável que foram submetidos à carbonatação, publicados em periódicos no período de 2012 a 2017.

Autor	Ano	Idade do ensaio	Resultado
Turk et al.	2012	6, 24 e 72 horas	Resistência à carbonatação do CAA diminuiu com o aumento do teor das adições (cinza volante e sílica ativa), mas foi maior que a do CC para os teores de substituição analisados
Mohammed et al.	2013	30, 60, 90, 120 e 240 dias	A profundidade de carbonatação dos concretos com fíler calcário foi maior do que com a utilização de cinza volante, isolada ou em combinação com a sílica ativa. Entretanto, nenhum dos concretos tem risco de corrosão induzida por carbonatação em ambiente natural
Sideris e Anagnostopoulos	2013	12, 24 e 36 meses	Os concretos autoadensáveis apresentaram menor coeficiente de carbonatação em comparação aos concretos convencionais da mesma classe de resistência, sendo a diferença mais pronunciada para as resistências mais baixas
Zhao et al.	2013	3, 7, 14 e 28 dias	A profundidade de carbonatação diminuiu quando a taxa de agregado miúdo em relação ao total de agregados aumenta de 0,33 para 0,39. Já quando essa relação excede 0,39 há uma tendência de aumento da profundidade de carbonatação

Demirci e Sahin	2014	28 dias	O CAA apresentou menor carbonatação que o CC, tanto quando ambos foram submetidos a cura úmida quanto quando curados ao ar. Independentemente do tipo de concreto, a profundidade de carbonatação diminuiu com o aumento da classe de resistência ao concreto e com a cura úmida
Nicolas et al.	2014	28 dias	A profundidade de carbonatação foi maior nos traços com metacaulim, para os tipos de concreto analisados.
Owsiak e Grzmił	2014	90 dias	Com o teor de substituição de cimento Portland utilizado (40%) a profundidade de carbonatação foi menor para o traço com escória granulada de alto forno (≈ 3 mm), seguido pelo traço que continha cinza volante (≈ 6 mm) e o traço com fíler calcário apresentou o maior valor (≈ 8 mm).
Kim et al.	2015	7, 14, 28, 56 e 84 dias	A profundidade de carbonatação do CAA aumentou 1, 3,2, 4,7 e 6,6 vezes à medida que proporção de incorporação do resíduo de mineração de tungstênio aumentou 10, 20, 30 e 40% em comparação ao concreto de referência aos 84 dias
Calado et al.	2015	28 e 90 dias	CAA apresentou uma profundidade de carbonatação média 45,8% menor que o CC de mesma relação a/c e mesmos materiais constituintes
Frazão et al.	2015	Medições em intervalos não especificados até 294 dias	O CAA convencional apresentou uma resistência à carbonatação 4,66% maior que o CAA reforçado com fibras
Silva e Brito	2015	7, 28, 91 e 182 dias	Não foi observada carbonatação ao fim do ensaio em nenhuma das misturas com um teor de substituição de até 30%, sejam elas apenas com fíler calcário e cinza volante ou com a combinação ternária entre as adições e o cimento Portland. Para maiores teores de substituição (60 e 70%) as misturas com cinza volante apresentaram melhor desempenho que as misturas com fíler calcário e a combinação ternária ficou abaixo de ambas
Dogan e Ozkul	2015	3 anos (carbonatação natural)	O CAA produzido com o cimento CEM II/B-M obteve a menor profundidade de carbonatação (6 mm), seguido do CAA com o cimento CEM I (6 mm) e do CAA com o cimento CEM II/A-P (12 mm). Já os valores obtidos para os traços com os cimentos CEM II/B-P e CEM IV/B-M foram 22 e 24 mm, respectivamente

Zhao et al.	2015	3, 7, 14 e 28 dias	A profundidade de carbonatação do CAA aumentou com o aumento do teor de substituição de cimento Portland tanto por cinza volante quanto por escória granulada de alto forno. Os teores utilizados foram 20, 30 e 40%
Matos et al.	2015	28 dias	CAA com a adição de uma combinação de fíler e pó de vidro apresentou maior profundidade de carbonatação (1,82 mm) que o CAA apenas com adição fíler (0,93 mm)
Fu et al.	2015	3, 7, 14, 21, 28, 60 e 120 dias	CAA teve uma maior resistência à carbonatação que o CC de resistência à compressão comparável. A análise de sensibilidade dos parâmetros de um sistema de reação-difusão proposto mostrou que o coeficiente de difusão do CO ₂ e a umidade do ambiente são cruciais para o processo de carbonatação
Singh e Singh	2016	4, 8, 12 e 16 semanas	Foi observado um aumento da profundidade de carbonatação com o aumento da porcentagem de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado. A incorporação de metacaulim mitigou os valores de carbonatação para os traços com até 25% de agregado reciclado
Singh e Singh	2016	4, 12 e 16 semanas	Nas misturas com baixo e alto volume de cinza volante, a resistência a carbonatação diminuiu com o aumento da quantidade de substituição de agregado natural por agregado reciclado
Calvo et al.	2016	12 meses (carbonatação natural)	Tanto os concretos fabricados em laboratório quanto os extraídos de pré-fabricados apresentaram maior velocidade de carbonatação quando submetidos a cura térmica
Carsana et al.	2016	Diversas medições em intervalos não especificados até 570 dias	Os traços que continham substituições de cimento Portland por cinza de incineração de resíduos urbanos, cinza volante e fíler calcário apresentaram um aumento da profundidade de carbonatação com o aumento do teor de substituição, que foram 15, 30 e 45% para cada adição. Esse resultado foi observado na carbonatação natural e na carbonatação acelerada
Sharma e Khan	2017	4, 8, 12 e 16 semanas	O aumento da inclusão de escória de cobre em substituição ao agregado miúdo reduziu a profundidade de carbonatação. Foram utilizados os teores de 0, 20, 40, 60, 80 e 100% e o estudo sugere que 60% é o teor ótimo de substituição para um comportamento de durabilidade melhorado ou comparável ao CAA de referência.

Lenka e Panda	2017	7 dias (carbonatação natural) após 90 dias de cura	Foram produzidos CAA e CC com substituições de cimento Portland por metacaulim nos teores de 5, 10, 15 e 20%. Em ambos os tipos de concreto o traço com 10% de metacaulim apresentou a menor profundidade de carbonatação. Os traços com substituição tiveram menor carbonatação que o concreto de referência e o CAA teve um melhor desempenho que o CC.
Samimi et al.	2018	30, 60 e 90 dias	Foram produzidos CAA com 10 e 15% de substituição do cimento Portland por zeólito e pedra-pome. A profundidade de carbonatação dos traços com adição foi maior que a do concreto de referência, mas o zeólito foi mais suscetível a degradação. Enquanto o traço com 10% de pedra-pome apresentou velocidade de carbonatação 1,6 vezes maior que o referência o valor do zeólito foi 9,8 vezes superior.
Sharma e Khan	2018	4, 8, 12 e 16 semanas	O aumento da incorporação de escória de cobre em substituição ao agregado miúdo diminuiu a profundidade de carbonatação dos concretos. Isso foi atribuído à presença de maior teor de óxido de ferro na composição da escória, o que aumenta o pH da solução de poro e torna a matriz mais alcalina. Foram utilizados os teores de 0, 20, 40, 60, 80 e 100% e, em todos os traços, 60% de cimento Portland, 30% de cinza volante e 10% de metacaulim.
Massana et al.	2018	60 e 200 dias	Foram produzidos CAA de alta resistência com os teores de 2,5, 5 e 7,5% de adição nano e microsílca e em combinações ternárias de 2,5%/2,5% e 2,5%/5% para cada adição. Nenhum dos concretos estudados exibiu frente de carbonatação ao final do ensaio
Muttashar et al.	2018	60 dias	Foram produzidos CAA com 0, 25, 50, 75 e 100% de substituição do agregado miúdo por granada. A profundidade de carbonatação diminuiu com o aumento do teor de substituição, sendo os valores finais 12,8, 11,2, 9,5, 8,3 e 6,4 mm, respectivamente

2.3 TÉCNICAS MICROESTRUTURAIS UTILIZADAS PARA ANÁLISE DO CAA

A microestrutura dos materiais cimentícios tem uma relação direta com o desempenho de suas propriedades, como a resistência mecânica, carbonatação e permeabilidade. Assim, tornou-se comum a aplicação de técnicas microestruturais para caracterização, entendimento e análise de

materiais de construção civil, sendo possível a obtenção de informações físicas, químicas, mecânicas e de durabilidade. Nenhuma técnica isoladamente provém os dados necessários para uma análise completa, o que torna imprescindível a aplicação de várias técnicas em conjunto para um melhor controle na qualidade das informações e nas interações das propriedades. Nesse trabalho optou-se pelos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, análise termogravimétrica (TG/DTG) e difração de raios-X, que serão descritos nos itens a seguir.

2.3.1 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosimetria por intrusão de mercúrio baseia-se no princípio físico que determina que a pressão necessária para provocar a intrusão de um líquido que "não molha" num capilar de seção circular é inversamente proporcional ao diâmetro do capilar e diretamente proporcional à tensão superficial do líquido e ao ângulo de contato do líquido (RATO, 2006).

O ensaio permite observar o espectro de dimensões dos poros das amostras ensaiadas. Esta técnica se aplica para medidas de poros na faixa de $0,003 \mu\text{m}$ a $400 \mu\text{m}$, sendo mais apropriada para a faixa de $0,1$ a $100 \mu\text{m}$, segundo a BS 7591/1992 (PAES, 2004). Alguns dos resultados obtido são o diâmetro de cada poro (μm) e os volumes de intrusão de mercúrio acumulado e incremental (cm^3/g).

Segundo Paes (2004), o gráfico volume de mercúrio incremental versus diâmetro dos poros indica, por meio do volume de mercúrio intrudido, a quantidade de poros de um determinado diâmetro. O volume de mercúrio acumulado versus diâmetro dos poros mostra a quantidade total de mercúrio intrudido, por unidade de massa da amostra, a um determinado nível de pressão atingida durante o ensaio, representando a porosidade do material até o diâmetro de poro correspondente.

Durante o processo de produção, hidratação e endurecimento do concreto são formados poros de diferentes dimensões, que podem ser classificados de diversas formas. Segundo Mehta e Monteiro (2014) os vazios nos materiais cimentícios são definidos, quanto à sua origem e dimensões, como poros de gel, vazios capilares e vazios de ar incorporado e aprisionado. Porém, não existe um consenso entre os pesquisadores sobre essa classificação e nesse trabalho os poros serão classificados de acordo com suas dimensões em macroporos, mesoporos e microporos, de acordo com as faixas dimensionais que podem ser visualizadas na Figura 5.

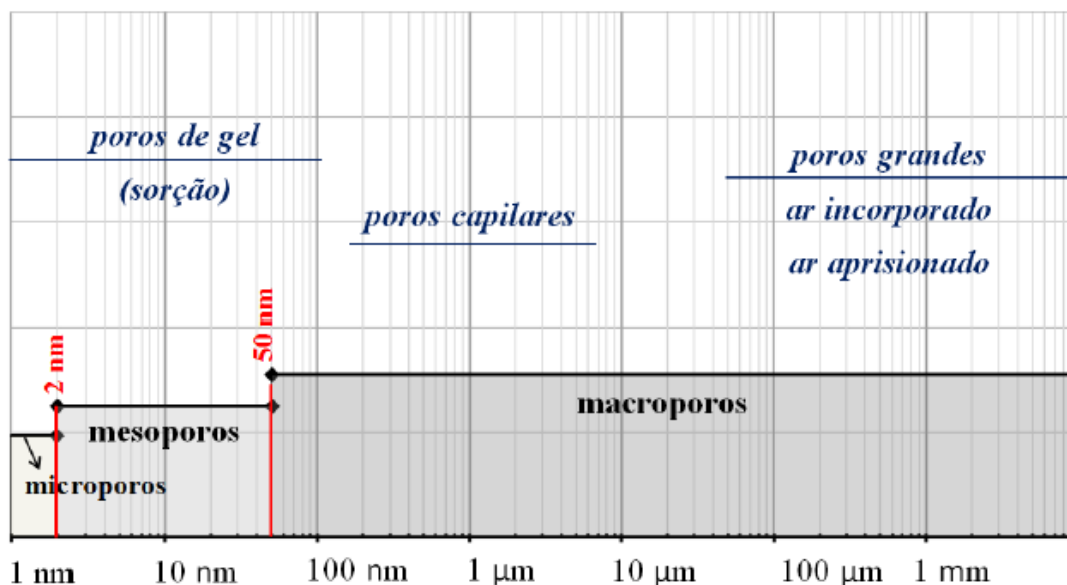


Figura 5 - Classificação dos poros
 Fonte: (SALOMÃO, 2016 adaptado de THOMSON et al., 2004)

2.3.2 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

As reações que ocorrem nas pastas de cimento, quando submetidas a um aumento progressivo da temperatura, apresentam três contribuições endotérmicas típicas, que podem ser quantitativamente analisadas utilizando as curvas de TG/DTG. Desse modo, é possível quantificar o teor dos compostos hidratados formados e os teores de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio remanescentes na matriz hidratada (HOPPE FILHO et al., 2017; MONTEAGUDO et al, 2014).

As regiões de desidratação (Ldh), desidroxilação (Ldx) e descarbonatação (Ldc), que correspondem aos compostos hidratados, são definidas de acordo com faixas de temperatura predefinidas. Tais limites para os intervalos característicos de decomposição dos hidratos diferem entre os pesquisadores, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Faixas de temperatura característica de decomposição dos hidratos segundo diversos autores

Autor	Faixa de temperatura (°C)		
	C-S-H (Ldh)	Ca(OH) ₂ (Ldx)	CaCO ₃ (Ldc)
Alonso-Domínguez et al. (2017)	105 a 430	430 a 530	530 a 1100
Monteagudo et al. (2014)	105 a 430	430 a 530	530 a 1100
Bhatty (1986)	105 a 440	440 a 580	580 a 1000
Pane e Hansen (2004)	140 a 440	440 a 520	520 a 1100
Hoppe Filho et al. (2017)	35 a 385	385 a 485	485 a 1000

O teor de água quimicamente combinada está relacionado à formação do silicato de cálcio hidratado e das fases aluminato hidratadas, sendo o primeiro pico endotérmico do TG/DTG normalmente atribuído à desidratação dos géis C-S-H. A portlandita decompõe para CaO e H₂O numa faixa média de 400 a 550°C. A perda de massa, devido à evaporação da água, pode ser usada para calcular a quantidade remanente de CH, ao ser multiplicada por 4,11, fator que corresponde à relação da massa molecular do hidróxido de cálcio (74,09) e da massa molecular da água (18,01). A perda de CO₂ gerada a partir da descarbonatação da amostra, ao ser multiplicado por 2,27, indica o teor de carbonato de cálcio restante. O fator 2,27 corresponde a relação da massa molecular do carbonato de cálcio (100,09) e da massa molecular do dióxido de carbono (44,00).

Os géis podem ser classificados em função de sua origem química em duas categorias: primários (C-S-H primário), que são produto da hidratação das fases anidras do cimento Portland e secundários (C-S-H secundário), formados a partir da reação entre o CH e as pozolanas. Caso seja de interesse quantificar ambos os géis, Alonso-Domínguez et al. (2017) apresentam uma metodologia para estimar a quantidade teórica de cada tipo de gel de C-S-H, o que permite analisar a eficiência da reação pozolânica. A fórmula tem duas simplificações. Primeiro, a quantidade de água quimicamente combinada do C-S-H primário e secundário é considerada a mesma. E segundo, considerou-se que a estequiometria do C-S-H primário permaneceu inalterada com a aceleração da taxa de hidratação do cimento causada pelas adições minerais. As fórmulas necessárias para o cálculo dos géis primário e secundário estão apresentadas nas Equações 8, 9, 10 e 11.

$$CH_{\text{carbonatado}}(\%) = 0,41 \cdot Ldc \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo CH_{carbonatado} é o percentual de portlandita carbonatada da amostra, 0,41 é a relação da massa da água (18,01) e do dióxido de carbono (44,00) e Ldc é o percentual de descarbonatação.

$$CH_{eq}(\%) = CH_{\text{carbonatado}} + Ldx \quad (\text{Equação 9})$$

Sendo CH_{eq} é o percentual de portlandita equivalente da amostra, CH_{carbonatado} o percentual de portlandita carbonatada e Ldx o percentual de desidroxilação.

$$C - S - H_{\text{primário}}(\%) = \frac{CH_{eq/M} \cdot Ldh_{REF}}{CH_{REF}} \quad (\text{Equação 10})$$

Sendo CH_{eq/M} é o percentual de portlandita equivalente da amostra analisada, Ldh_{REF} o percentual de desidratação da amostra de referência e CH_{REF} o percentual de portlandita equivalente da amostra de referência.

$$C - S - H_{\text{secundário}}(\%) = C - S - H_{\text{total}} - C - S - H_{\text{primário}} \quad (\text{Equação 11})$$

E finalmente, $C - S - H_{total}$ é o percentual de desidratação da amostra em análise, $C - S - H_{primário}$ é o percentual de gel formado a partir da porcentagem de portlandita equivalente de cada amostra.

2.3.3 Difração de raios-X

A técnica de difração de raios-X permite analisar qualitativamente as fases cristalinas do material ensaiado, uma vez que materiais amorfos não apresentam picos no difratograma, de modo que, quanto menor a quantidade de picos do material, maior seu potencial reativo.

A análise qualitativa de uma amostra é realizada através da comparação de seu padrão difratométrico com padrões de referência, disponíveis em bancos de dados de difração de raios-X, mantidos e continuamente atualizados pelo ICDD (International Center for Diffraction Data).

Os picos mais intensos de cada fase presente no banco de dados são comparados com o difratograma da amostra, no que se refere à presença/ausência de fases, intensidade difratada e deslocamento da distância interplanar. Ao final do processo de busca e comparação, os resultados são expressos em ordem decrescente de pontuação.

O feixe difratado detectado é expresso através de picos que se destacam do background (linha de base), registrados no gráfico de intensidade versus ângulo 2θ , constituindo-se assim o padrão difratométrico ou difratograma.

Os parâmetros físicos de determinado conjunto de picos refletem, portanto, características da estrutura cristalina das fases componentes de um material e estão intrinsecamente relacionadas às suas proporções relativas na amostra analisada.

3 METODOLOGIA

O programa experimental realizado para produção e análise dos concretos autoadensáveis foi idealizado considerando duas adições minerais e dois teores de substituição de cimento Portland por essas adições, além de um concreto de referência, sem nenhum teor de substituição, e uma mistura ternária entre as adições minerais e o cimento Portland. A mistura ternária foi realizada porque a combinação entre argilas calcinadas e o calcário têm apresentado resultados favoráveis como uma alternativa de substituição ao clínquer, caso do cimento LC3.

No processo científico, a variável independente é o antecedente e a variável dependente é a consequência, assim pode-se definir a variável independente como responsável por influenciar, determinar ou afetar outra variável; e a variável dependente corresponde aos valores (fenômenos, fatores) que serão explicados ou descobertos uma vez que são influenciados, determinados ou afetados pelo fator independente (MARCONI; LAKATOS, 2003)

Assim, as variáveis independentes, ou controláveis, deste trabalho são o tipo de adição mineral e o teor de substituição de cimento Portland por essas adições. Já as variáveis de resposta (ou dependentes) são as propriedades do CAA no estado fresco, as propriedades mecânicas, a retração, a absorção de água por capilaridade e a carbonatação acelerada.

O procedimento utilizado para desenvolver o programa experimental é apresentado no organograma da Figura 6 e será detalhado nos itens seguintes. O programa experimental foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB), com exceção do ensaio de carbonatação acelerada, que foi realizado no Laboratório de Estruturas (LABEST/UnB), e dos ensaios de caracterização microestrutural, cujos locais de realização estão descritos nos itens 3.4.5.1, 3.4.5.2 e 3.4.5.3.

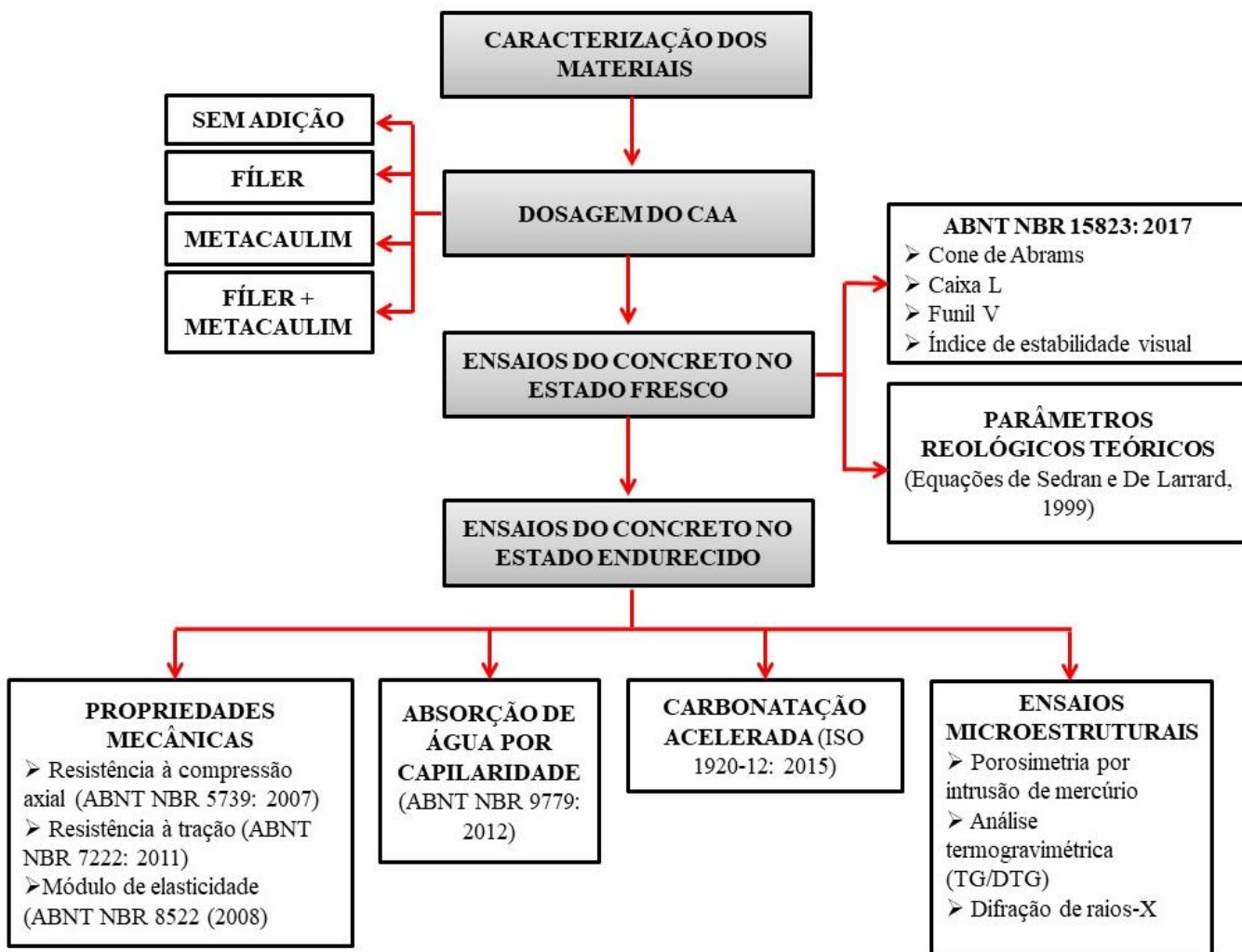


Figura 6 - Etapas do programa experimental desenvolvido na pesquisa

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a produção dos CAA serão empregados materiais locais disponíveis na região de Brasília - DF e sem qualquer tipo de beneficiamento.

3.1.1 Cimento Portland

O aglomerante escolhido foi o cimento Portland composto com fíler (CP II F - 40), com resistência à compressão mínima de 40 MPa aos 28 dias, e a escolha por um cimento composto se deu, pois, seu uso é indicado para aplicações gerais e representa 70% dos cimentos comercializados no Brasil. Os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica do CP II F - 40, bem como os métodos utilizados, estão apresentados na Tabela 5. A curva granulométrica, obtida pelo ensaio de granulometria a laser, pode ser vista na Figura 7.

. Tabela 5 - Propriedades do cimento CP II F - 40

Propriedade	Método de ensaio	Limites NBR 11578 (1991)	CP-II-F-40
Tempo de início de pega (horas)	NBR NM 65 (2003)	≥ 1	2:29
Tempo de fim de pega (horas)		≤ 10	4:42
Massa Específica (kg/m ³)	NBR NM 23 (2001)	-	3,15
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	$\geq 15,0$	37,7
	7 dias	$\geq 25,0$	40,1
	28 dias	$\geq 40,0$	48,5
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas – D10 (µm)	Granulometria a laser	Não se aplica	1,12
Diâmetro Médio (µm)			13,12
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas – D90 (µm)			27,63

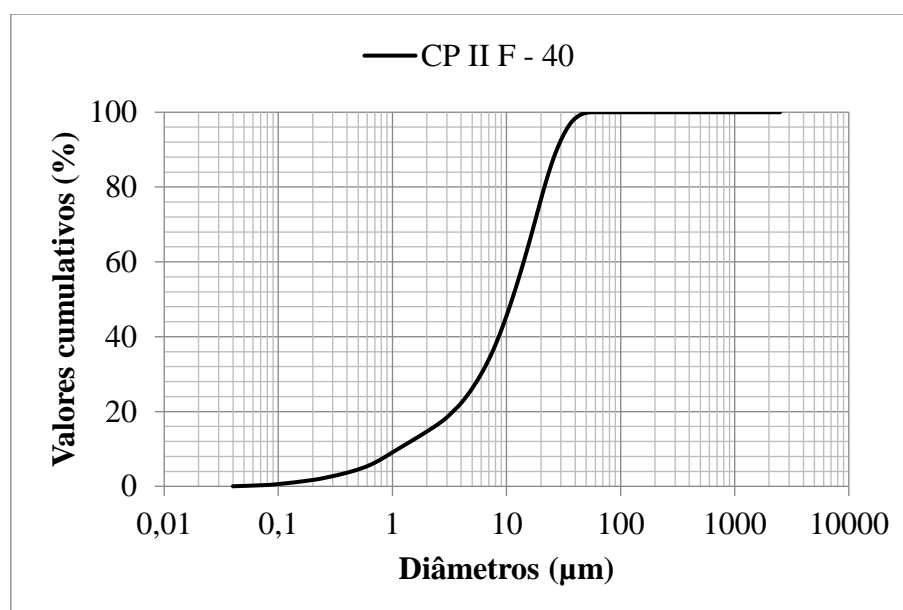


Figura 7 - Granulometria a laser do cimento Portland

Na Tabela 6 é apresentada a composição química do cimento, obtida através do ensaio de espectrometria por fluorescência de raios-X (EDX). O ensaio foi realizado na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília, em um aparelho EDX 720 da marca Shimadzu. Pode-se notar a predominância de óxido de cálcio, uma vez que se trata de um cimento composto com até 10% fíler calcário, ou seja, um elevado teor de clínquer e rico em carbonato de cálcio.

Tabela 6 - Composição química do cimento CP II F - 40, determinada através do ensaio de EDX

Composto químico	% em massa CP II F - 40
CaO	75,20%
SiO₂	9,29%
MgO	2,69%
Fe₂O₃	4,41%
Al₂O₃	2,46%
SrO	0,47%
K₂O	1,87%
TiO₂	0,53%
SO₃	2,76%
MnO	0,14%
ZnO	0,05%

A composição mineralógica do cimento Portland foi analisada através do ensaio de difração de raios-X, realizado no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília utilizando-se um difratômetro de raios-X da marca Rigaku, modelo Última IV com radiação e cobre. A faixa angular (2θ) analisada foi de 2 a 60°, com passo angular de 0,05° e velocidade angular de 5°/min. Essa técnica permite analisar qualitativamente as fases cristalinas do material ensaiado, uma vez que materiais amorfos não apresentam picos no difratograma.

Através do difratograma da Figura 8, podem ser identificados picos característicos de calcita ou carbonato de cálcio (CaCO_3) e o aluminato de cálcio ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5$). Além desses, a análise mineralógica apresentou o silicato tricálcico (C_3S) e o silicato dicálcico (C_2S), também conhecidos como alita e belita, respectivamente. Sabe-se que esses compostos do clínquer são os principais responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica do cimento. Outras fases cristalinas presentes são difíceis de identificar devido a sobreposição de picos do difratograma.

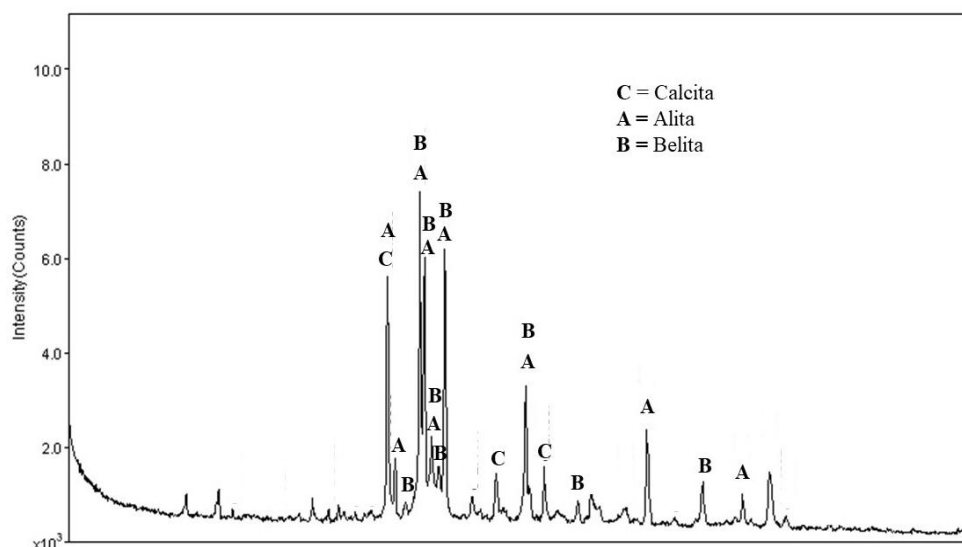


Figura 8 - Difratoograma de raios-X do CP II F - 40

3.1.2 Adições minerais

Dada a necessidade do CAA de uma maior estabilidade da mistura devido às suas características do estado fresco, é necessária a incorporação de finos à mistura. Para isso, optou-se por trabalhar com duas adições minerais, o fíler calcário e o metacaulim. Na Tabela 7 estão os resultados da análise de algumas propriedades físicas de ambas as adições.

Tabela 7 - Propriedades das adições minerais

Propriedade	Método de ensaio	Fíler	Metacaulim
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23 (2001)	2,7	2,6
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas – D10 (µm)		1,88	1,77
Diâmetro Médio (µm)	Granulometria a laser	19,94	18,27
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas – D90 (µm)		43,86	39,36

As curvas granulométricas das adições foram obtidas através do ensaio de granulometria a laser e estão apresentadas na Figura 9. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, utilizando um analisador de tamanho de partículas modelo CILAS 1180 em modo líquido com faixa de análise de 0.04 a 2500.00 µm. Observa-se que as curvas são muito semelhantes e o metacaulim possui apenas uma proporção levemente inferior dos grãos, sendo mais fino. Porém, acredita-se que essa semelhança seja resultado da floculação dos grãos do metacaulim durante o ensaio, uma vez

que visualmente ele é bem mais fino que o fíler calcário. Uma análise mais precisa pode ser realizada com a utilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

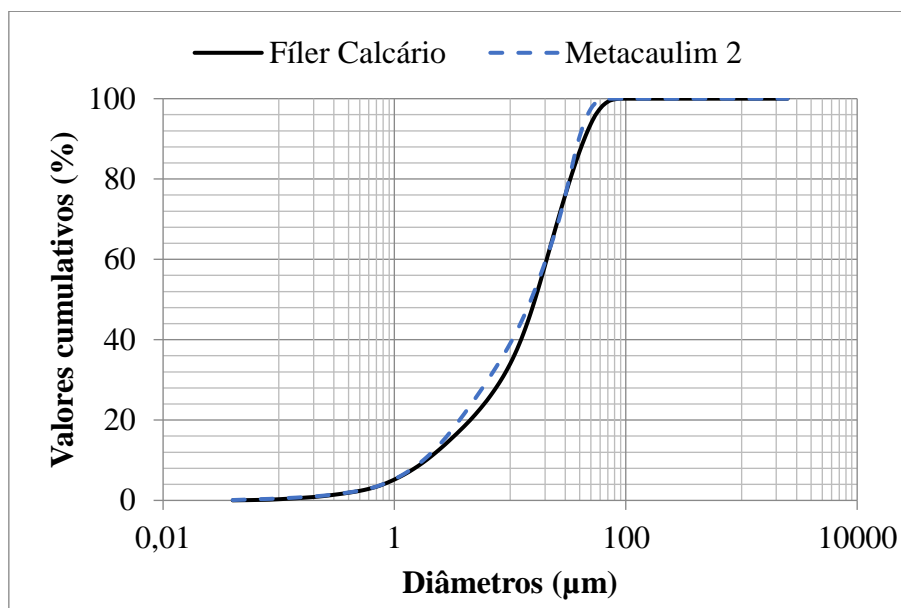


Figura 9 - Granulometria a laser das adições minerais

As composições químicas identificadas nas amostras, pelo método do EDX, estão apresentadas na Tabela 8. É possível identificar, para cada amostra, alguns compostos químicos principais para sua formação mineral. O metacaulim, que é obtido a partir da calcinação de argilas cauliníticas é composto, basicamente, por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) na fase amorfa. Já o fíler calcário, possui 83,10% de CaO em massa e nota-se também a presença de SiO_2 (6,63%) no quartzo e na caulinita.

Tabela 8 - Composição química das adições minerais, determinada através do ensaio de EDX

Composto químico	% em massa	
	Metacaulim	Fíler calcário
SiO_2	50,54%	6,63%
CaO	0,00%	83,10%
Al_2O_3	42,28%	2,12%
Fe_2O_3	3,23%	2,16%
TiO_2	1,63%	0,26%
K_2O	1,07%	0,94%
MgO	1,02%	3,61%
SO_3	0,09%	0,23%
ZrO_2	0,03%	0,00%
Cr_2O_3	0,03%	0,00%
SrO	0,00%	0,96%

No difratograma de raios-X do fíler calcário, Figura 10, é confirmada a sua composição mineral cristalina, constituído por um pico intenso de calcita (CaCO_3), além da presença de quartzo

(SiO₂), dolomita (CaMg(CO₃)₂) e caulinita (1A – Al₂Si₂O₅(OH)₄), o que implica numa baixa reatividade do material, porém apresenta efeito físico, promovendo o refinamento dos poros e servindo de ponto de nucleação das reações.

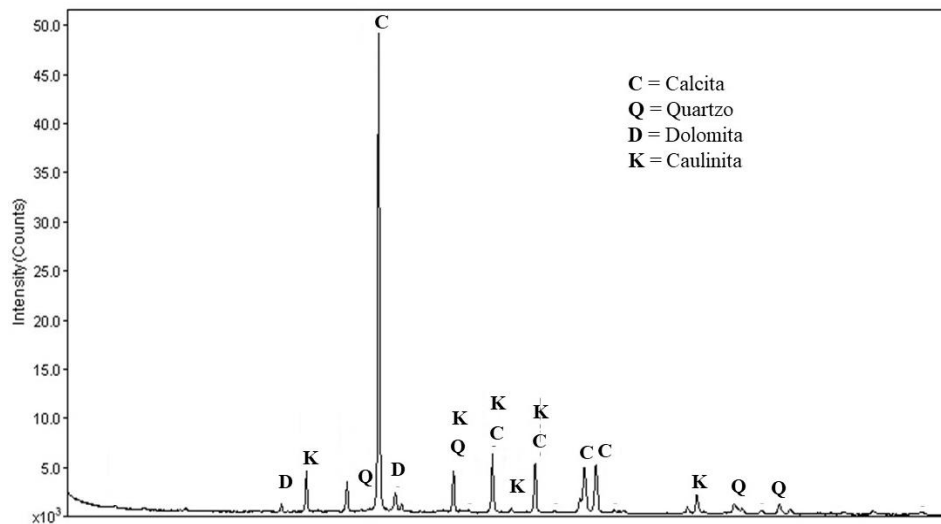


Figura 10 - Difratoograma de raios-X do filer calcário

No difratograma do metacaulim, Figura 11, identifica-se picos de quartzo (SiO₂), caulinita (1A – Al₂Si₂O₅(OH)₄) e muscovita (2M – (K.NH₄Na)Al₂(Si Al)₄O₁₀(OH)₂). Como o material é pozolânico, sabe-se que ele é capaz de reagir com os compostos hidratados do cimento para formar produtos hidratados similares aos decorrentes da hidratação direta do cimento Portland. A presença de um halo amorfo no difratograma, caracteriza essa reatividade.

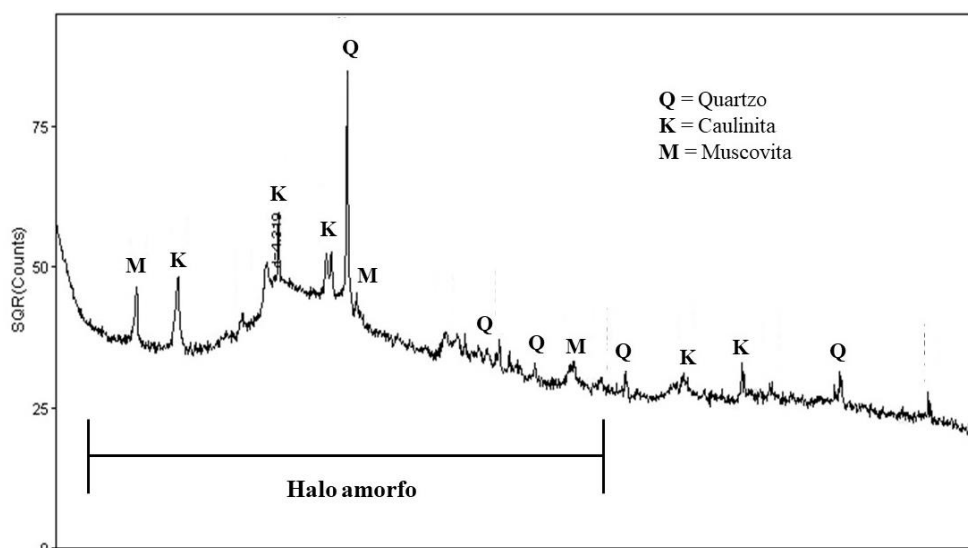


Figura 11 - Difratoograma de raios-X do metacaulim

3.1.3 Agregados

Como agregado miúdo, foram utilizadas duas areias, uma natural rosa de origem quartzosa e uma britada de origem calcária. Foram utilizadas duas faixas granulométricas de agregado graúdo de origem calcária, uma com dimensão máxima característica de 12,5 mm e a outra com essa dimensão igual a 19 mm. A escolha destes agregados foi baseada na disponibilidade de materiais da região. Na Tabela 9 estão apresentados os resultados dos ensaios realizados para caracterização dos agregados, além dos métodos normatizados utilizados.

Tabela 9 - Propriedades dos agregados

Propriedade	Método de ensaio	Areia Rosa	Areia Britada	Brita 12,5	Brita 19
Massa específica (kg/m³)	NBR NM 52 (2009) NBR NM 53 (2009)	2,66	2,73	2,71	2,70
Módulo de Finura	NBR NM 248 (2003)	1,09	3,06	5,9	6,69
Dimensão Máxima (mm)		0,6	4,75	12,5	19

Na Figura 12 pode-se visualizar a distribuição granulométrica das duas areias escolhidas para o desenvolvimento desse trabalho, denominadas areia rosa e areia britada. As zonas demarcadas e denominadas como ótima ou utilizável são definidas pela NBR 7211 (2009) baseadas no valor do módulo de finura. Percebe-se que a areia rosa se encontra abaixo do limite inferior da zona utilizável, cujo valor mínimo de módulo de finura é 1,55. Já a areia britada tem sua curva granulométrica dentro da zona utilizável, com exceção de alguns pontos que estão fora dos limites estabelecidos. Por esses motivos optou-se por utilizar uma combinação das duas areias, de modo que o empacotamento entre elas e os agregados graúdos formem o esqueleto granular mais adequado.

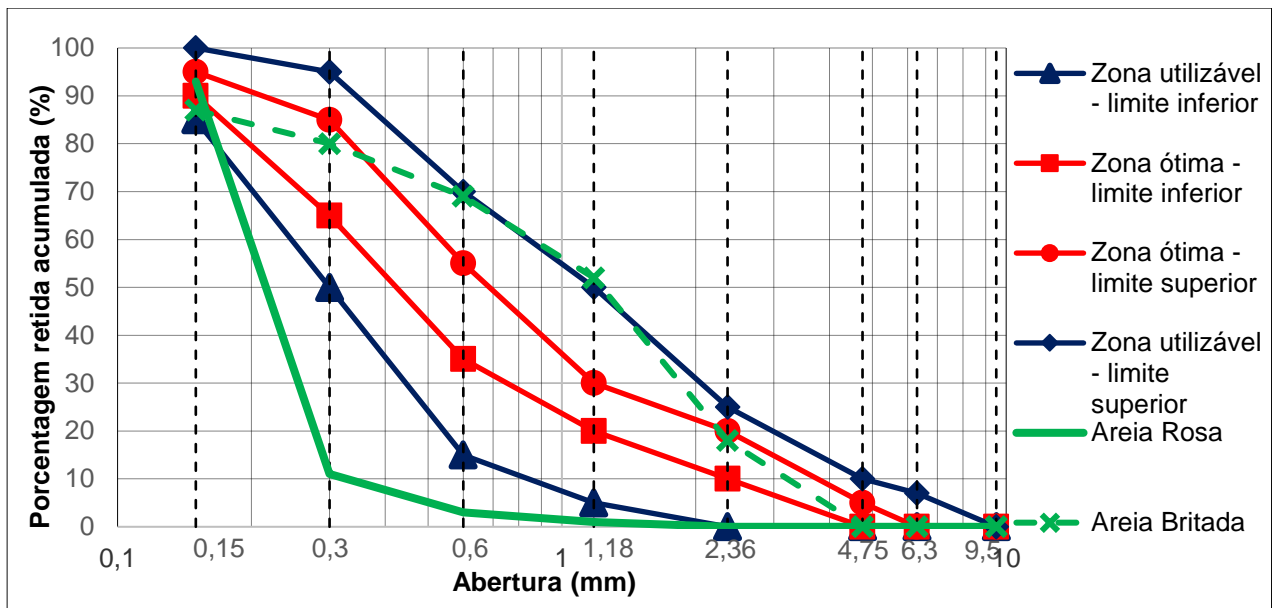


Figura 12 - Composição granulométrica dos agregados miúdos

Pela Figura 13 nota-se que os agregados graúdos utilizados encontram-se nas zonas granulométricas correspondentes aos diâmetros 4,75/12,5 e 9,5/25, também definidas pela ABNT NBR 7211 (2009). Devido aos valores, em mm, encontrados para as dimensões máximas, as pedras britadas foram denominadas de brita 12,5 e brita 19.

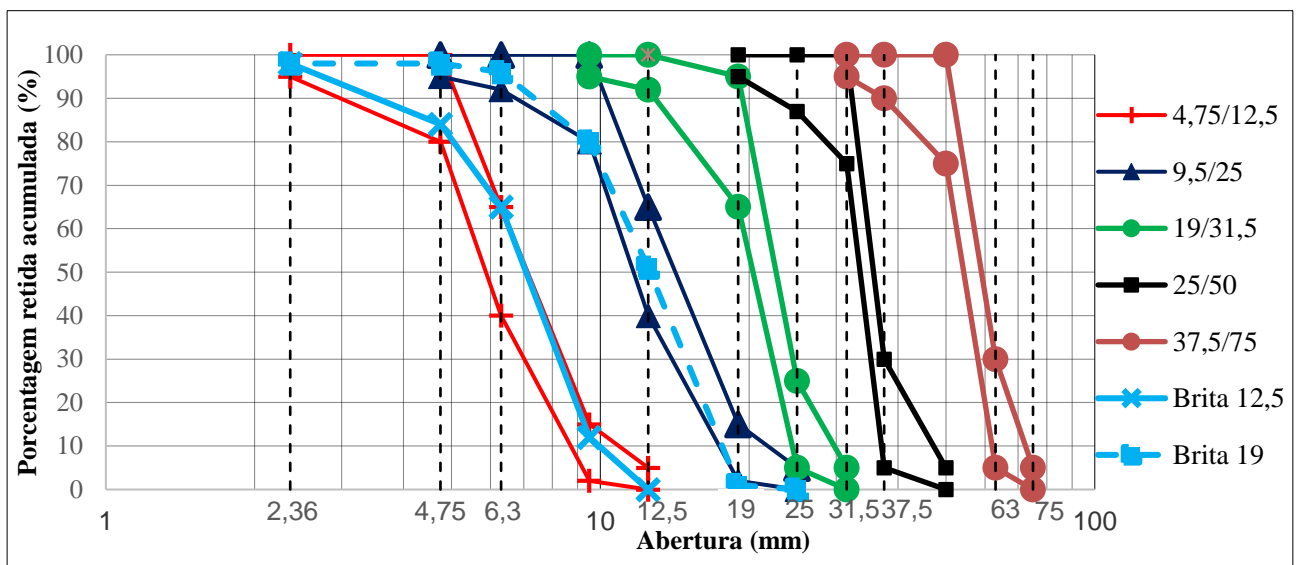


Figura 13 - Composição granulométrica dos agregados graúdos

3.1.4 Aditivo superplastificante

Foi utilizado um aditivo superplastificante de terceira geração, com base química de éter policarboxílico modificado. O mesmo era líquido e livre de cloretos. Na Tabela 10 estão suas principais características, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 10 - Características do aditivo superplastificante

Aditivo superplastificante	GLENIUM® 51
Base química	Éter policarboxílico modificado
Dosagem recomendada (%)	0,2 a 1,0
Aparência	Líquido branco turvo
pH	5 - 7
Densidade (g/cm³)	1,067 - 1,107
Sólidos (%)	28,5 - 31,5
Viscosidade (cP.s)	< 150

Esse aditivo atua como dispersante do cimento, promovendo super plastificação e alta redução de água, o que conseqüentemente torna o concreto mais trabalhável sem alteração do tempo de pega. Ele atende aos requisitos da NBR 11768 (2011) para os tipos P e SP e foi disponibilizado gratuitamente pelo fabricante.

3.2 DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

A dosagem do CAA foi realizada utilizando o conceito da composição do esqueleto granular através do ensaio de massa unitária no estado compactado. Foi utilizado como critério os limites do ACI 237R-07, apresentados na Tabela 11, e a relação água/aglomerante (a/agl) fixa igual a 0,55. O valor de 0,55 foi escolhido por compreender a classe de agressividade III da NBR 6118: 2014, um dos cenários de maior vulnerabilidade do material. Vale salientar que como esse valor está fora dos limites do ACI, esses limites não foram rigorosamente seguidos, mas serviram de base para os ajustes do traço.

Outro parâmetro fixado foi o consumo de aglomerante de $C=475 \text{ kg/m}^3$, valor máximo apresentado pelas recomendações do ACI 237R-07. Como adição mineral, foram escolhidos o fíler calcário e o metacaulim, empregados em substituição a massa de cimento Portland, nas proporções de 10 e 20%, além de um traço com uma combinação ternária entre as adições e o cimento. Em todo o trabalho os concretos foram denominados de acordo com o teor de substituição que foi empregado e o tipo de adição mineral e o detalhamento da dessa nomenclatura pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 11 - Critérios do ACI 237R-07 para dosagem de CAA

	Limite Mínimo	Limite Máximo	Observações
Agregado graúdo (l/m³)	280	320	Esse volume pode chegar até 500 se o diâmetro nominal máximo for de 10 mm
Volume de pasta (l/m³)	340	400	
Volume de argamassa (l/m³)	680	720	
Relação a/agl	0,32	0,45	
Consumo de cimento + fino (kg/m³)	386	475	Esse consumo pode ser menor com a utilização de AMV

Tabela 12 - Nomenclatura e descrição dos traços utilizados

TRAÇO	DESCRIÇÃO
REF	Traço de referência, sem nenhum teor de adição mineral
F10	Traço com 10% de substituição em massa de cimento Portland por fíler calcário
M10	Traço com 10% de substituição em massa de cimento Portland por metacaulim
F20	Traço com 20% de substituição em massa de cimento Portland por fíler calcário
M20	Traço com 20% de substituição em massa de cimento Portland por metacaulim
M15F5	Composição ternária com 15% de metacaulim e 5% de fíler calcário em substituição em massa ao cimento Portland

A determinação do esqueleto granular foi realizada em três etapas. Inicialmente, com a composição entre as duas pedras britadas. Ao se encontrar a proporção ótima, foi executado um outro ensaio com o acréscimo da areia britada calcária. Por fim, foi inserida na composição a areia rosa quartzosa. Em cada etapa buscou-se a composição com a maior massa unitária compactada seca e, assim, o menor índice de vazios, de acordo com a NBR NM 45:2006, até se atingir a composição considerada ótima, que é representada como MATERIAL 3. O valor percentual de cada material empregado em cada etapa pode ser visualizado na Tabela 13. Fazendo as devidas ponderações, através das Equações 12 e 13, têm-se o esqueleto granular ideal da mistura, que corresponde ao maior empacotamento dos agregados graúdos e miúdos, ou seja, a proporção de maior massa unitária da mistura. Esse cenário foi atingido com 33,6% de brita 19 mm, 14,4% de brita 12,5 mm, 32% de areia britada, 20% de areia rosa.

Tabela 13 - Percentual de cada material no esqueleto granular

MATERIAL 1	70% de BRITA 19 + 30% de BRITA 12,5
MATERIAL 2	60% do MATERIAL 1 + 40% de AREIA BRITADA
MATERIAL 3	80% do MATERIAL 2 + 20% de AREIA ROSA

$$0,6 \times (0,7 B_{19} + 0,3 B_{12,5}) + 0,4 A_B \quad (\text{Equação 12})$$

$$0,8 \times (0,42 B_{19} + 0,18 B_{12,5} + 0,4 A_B) + 0,2 A_R \quad (\text{Equação 13})$$

Sendo B_{19} a brita 19 mm, $B_{12,5}$ a brita 12,5 mm, A_B a areia britada e A_R a areia rosa.

O procedimento de mistura utilizado consistiu em 3 etapas. Inicialmente foram colocados na betoneira os agregados graúdos, o cimento Portland, as adições minerais (quando presentes) e aproximadamente 1/3 da água. Esses materiais foram misturados por cerca de 1 minuto, para garantir uma melhor incorporação do cimento nos agregados e uma consequente melhora na zona de transição. Em seguida, foram adicionados os agregados miúdos e o restante da água e realizada mais uma mistura, por cerca de 1 minuto. Então, limpou-se as laterais da betoneira para retirar algum material que pudesse estar aderido e assegurar que todo ele fosse homogeneamente misturado. Por fim, adicionava-se o teor de superplastificante estimado e realizava-se uma mistura final por cerca de mais 5 minutos.

Com o concreto pronto, executava-se o ensaio do espalhamento pelo método do cone de Abrams. Caso esse espalhamento não estivesse dentro do intervalo da classe SF2 (entre 660 e 750 mm) delimitada pela NBR 15823:2017, adicionava-se mais superplastificante à mistura. Essa classe foi escolhida por ser adequada para a maioria das aplicações correntes. Uma vez que a classe de espalhamento fosse satisfeita, eram realizados imediatamente os ensaios de índice de estabilidade visual, caixa L, funil V e medida a massa específica do concreto no estado fresco.

Logo após esses procedimentos os corpos de prova foram moldados para os ensaios do estado endurecido. O REF foi o primeiro concreto dosado e a partir da determinação de seu traço unitário foram realizados os demais traços com as substituições do cimento Portland por adições minerais. Esse traço foi 1: 0: 0: 0,64: 1,03: 0,46: 1,08: 0,55 e está no formato cimento Portland: fíler calcário: metacaulim: areia rosa: areia britada: brita 12,5: brita 19: relação a/c. Os consumos em massa dos traços estão apresentados na Tabela 14. As pequenas variações observadas nos valores são causadas pela diferença nas massas específicas das adições.

Tabela 14 - Consumo em massa dos materiais

	Consumo em massa (kg/m ³)								
	Cimento	Fíler	Metacaulim	Areia Rosa	Areia Britada	Brita 12,5	Brita 19	Água	SP
REF	475,00	0,00	0,00	306,11	489,77	220,40	514,26	261,25	1,66
F10	427,59	47,51	0,00	304,70	487,52	219,38	511,90	261,31	1,66
M10	427,50	0,00	47,50	303,68	485,89	218,65	510,19	261,25	3,09
F20	379,83	94,96	0,00	303,26	485,21	218,35	509,47	261,14	2,14
M20	380,00	0,00	95,00	299,98	479,96	215,98	503,96	261,25	7,12
M15F5	379,75	23,73	71,20	301,83	482,92	217,32	507,07	261,08	4,03

3.3 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Os critérios de autoadensabilidade estabelecidos pela NBR 15823-1:2017 são apresentados na Tabela 15. Tomou-se essa tabela como base para análise dos resultados dos ensaios realizados no estado fresco. Além desses ensaios também foi determinada a massa específica dos concretos.

Tabela 15 - Resumos dos critérios de autoadensabilidade estabelecidos pela NBR 15823-1:2017

	Espalhamento	t ₅₀₀	Caixa L	Funil V
Critérios da NBR 15823-1:2017	SF1 – 550 a 650 mm	VS1 ≤ 2 s	PL1 ≥ 0,80 – duas barras de aço	VF1 < 9 s
	SF2 – 660 a 750 mm			
	SF3 – 760 a 850 mm	VS2 > 2s	PL2 ≥ 0,80 - três barras de aço	VF2 - 9 a 25 s

3.3.1 Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams

O ensaio de espalhamento pelo método do cone de Abrams fornece um resultado qualitativo da coesão e da tensão de escoamento do concreto. Utiliza-se o cone de Abrams e uma chapa metálica para determinar a fluidez do CAA pela ação de seu peso próprio. O ensaio foi realizado conforme ABNT NBR 15823-2, 2017. O cone foi preenchido com o CAA contínua e uniformemente. O tempo de escoamento necessário para o concreto atingir um espalhamento de 500 mm (t₅₀₀) foi determinado utilizando um cronômetro, acionado assim que o fluxo se iniciou. Quando o concreto parou de escoar foi determinado o espalhamento final, por duas medidas perpendiculares do diâmetro.

Na Tabela 16 têm-se a divisão das classes de espalhamento, os intervalos que delimitam essas classes e possíveis aplicações dos concretos que se enquadram em cada uma delas.

Tabela 16- Classificação dos concretos autoadensáveis de acordo com o ensaio de espalhamento e suas aplicações

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)	Aplicação	Exemplo
SF 1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre	Lajes
SF 2	660 a 750	Estruturas que exigem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto auto adensável	Estacas e certas fundações profundas
SF 3	760 a 850	Adequada para a maioria das aplicações correntes	Paredes, vigas, pilares e outras
SF 3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm).	Pilares-parede Paredes-diafragma Pilares

Fonte: (ABNT NBR 15823-1, 2017)

O chamado ensaio de índice de estabilidade visual (IEV) é executado paralelamente ao ensaio de espalhamento. Ele foi inserido como parâmetro de aceitação em 2017, ano da última revisão da norma e consiste na verificação da resistência à segregação por aspecto visual. Para realização do ensaio, após a medição do diâmetro de espalhamento deve ser realizada uma avaliação do IEV. As imagens da Figura 14 representam a aparência das classes de estabilidade do concreto e foram utilizadas como base de avaliação. O objetivo do ensaio é avaliar visualmente possíveis sinais de segregação na distribuição da argamassa ao longo do perímetro e a ocorrência de exsudação.

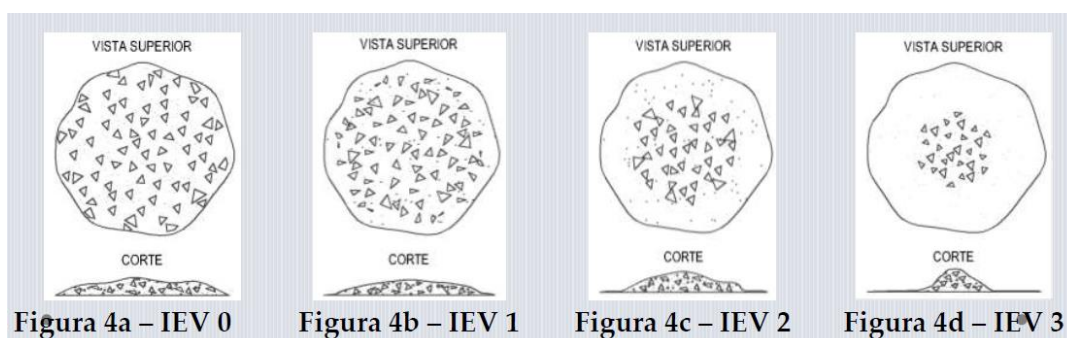


Figura 14 - Representação das classes do índice de estabilidade visual (IEV)

Fonte: (Barbosa, 2016).

Na Tabela 17 são apresentadas as classes de índice de estabilidade visual, bem como uma descrição do aspecto do concreto que se enquadra nas respectivas classes. Esses critérios e valores foram utilizados para avaliar, de forma qualitativa, a estabilidade do CAA.

Tabela 17 - Descrição dos índices de estabilidade visual (IEV)

Classe	Observações
IEV 0 (Altamente estável)	Sem evidência de segregação ou exsudação
IEV 1 (Estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação
IEV 2 (Instável)	Uma pequena auréola de argamassa ($\leq 10\text{mm}$) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto
IEV 3 (Altamente instável)	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades

Fonte: (Barbosa, 2016).

3.3.2 Determinação da habilidade passante – Método da caixa L

Esse ensaio simula o comportamento do concreto ao ser lançado em uma fôrma de concreto armado, uma vez que a caixa L contém barras de aço equidistantes entre si, que representam as armaduras de uma estrutura qualquer. Sendo assim, esse ensaio fornece um resultado qualitativo do concreto quanto à sua resistência ao bloqueio. Vale salientar, que nesse trabalho foram utilizadas 3 barras de aço na caixa L, situação considerada mais crítica para a determinação da habilidade passante, uma vez que o espaço disponível para o concreto fluir é menor.

Na Tabela 18 têm-se a divisão das classes de viscosidade plástica aparente, os intervalos que delimitam essas classes e possíveis aplicações dos concretos que se enquadram em cada uma delas.

Tabela 18 - Classificação dos concretos autoadensáveis de acordo com o ensaio da caixa L e suas aplicações

Classe de viscosidade plástica aparente	Caixa L (H2/H1)	Aplicação	Exemplo
PL 1	$\geq 0,80$, com duas barras de aço	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm	Lajes, painéis, elementos de fundação.
PL 2	$\geq 0,80$, com três barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados.

Fonte: (ABNT NBR 15823-1, 2017).

3.3.3 Determinação da viscosidade plástica– Método do funil V

Esse ensaio fornece um resultado qualitativo da viscosidade do concreto sob fluxo confinado. Na Tabela 19 têm-se a divisão das classes de viscosidade plástica aparente, os intervalos que delimitam essas classes em fluxo livre (VS), obtido através do t_{500} , e em fluxo confinado (VF), obtido pelo funil V. Além de possíveis aplicações dos concretos que se enquadram em cada uma delas.

Tabela 19 - Classificação dos concretos autoadensáveis de acordo com o ensaio do funil V e suas aplicações

Classe de viscosidade plástica aparente	t_{500} (s)	Funil V (s)	Aplicação	Exemplo
VS 1/VF 1	≤ 2	≤ 8	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre	Lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente
VS 2/ VF 2	> 2	9 a 25	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as formas e melhor resistência à segregação. Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.	Vigas, pilares e outras.

Fonte: (ABNT NBR 15823-1, 2017)

3.3.4 Parâmetros reológicos teóricos

O cálculo dos parâmetros reológicos teóricos foi realizado utilizando o procedimento descrito no item 2.1.2, onde os valores de espalhamento e t_{500} , obtidos pelo método do cone de Abrams, e a massa específica no estado fresco foram inseridos nas Equações 2 e 3, propostas por Sedran e De Larrard (1999).

3.4 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

3.4.1 Propriedades mecânicas

Para avaliação das propriedades mecânicas foram moldados corpos de provas cilíndricos de dimensões 100 x 200 mm, com regularização do topo realizada por meio de retífica. Cada resultado consiste na média dos valores obtidos em três corpos de prova. O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado de acordo com a NBR 5739:2007. Os corpos de prova foram ensaiados nas idades de 7, 14 e 28 dias, sendo curados em câmara úmida até as idades determinadas. Aos 28 dias também foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade à compressão, seguindo as recomendações das normas NBR 7222:2011 e NBR 8522:2008, respectivamente.

3.4.2 Absorção de água por capilaridade

Esse ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9779:2012, utilizando-se 3 corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 x 200 mm. Após 28 dias de cura em câmara úmida, determinou-se a massa dos corpos de prova ao ar e em seguida eles foram levados para estufa, a temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, até constância de massa. Após a determinação dos valores de massa seca, os corpos de prova foram depositados em um recipiente com o nível de água constante em 5 ± 1 mm. Foram efetuadas determinações de suas massas com 3, 6, 24, 48 e 72 horas, contadas a partir da colocação dos corpos de prova em contato com a água. Ressalta-se que os corpos de prova foram posicionados sobre suportes, para garantir um contato efetivo entre a sua face inferior e a água.

Além disso, foi determinado o coeficiente de sorvidade (K_s) dos concretos. A sorvidade é uma característica intrínseca do material, relacionada à absorção capilar de água, porosidade e interconexão entre poros, ou seja, trata-se do fenômeno de transporte de fluídos nos materiais porosos, especificamente a capacidade deles de absorver e transmitir água por capilaridade. Seu coeficiente pode ser calculado pela linearização do gráfico da absorção capilar versus o tempo. O comportamento da absorção capilar se enquadra em uma função logarítmica, com uma absorção de água inicial, que ocorre no momento em que o material seco entra em contato com a água. Para linearizar tal gráfico, é necessário expressar o eixo das abscissas na forma da raiz quadrada do tempo, segundo procedimento proposto pelo comitê técnico TC 116-PCD (RILEM, 1999). Desta forma, o coeficiente de sorvidade é o coeficiente angular da reta obtida

e a absorção inicial é o coeficiente linear, como pode ser observado na Figura 15. (MEDEIROS et al., 2017; RAISDORFER, 2015).

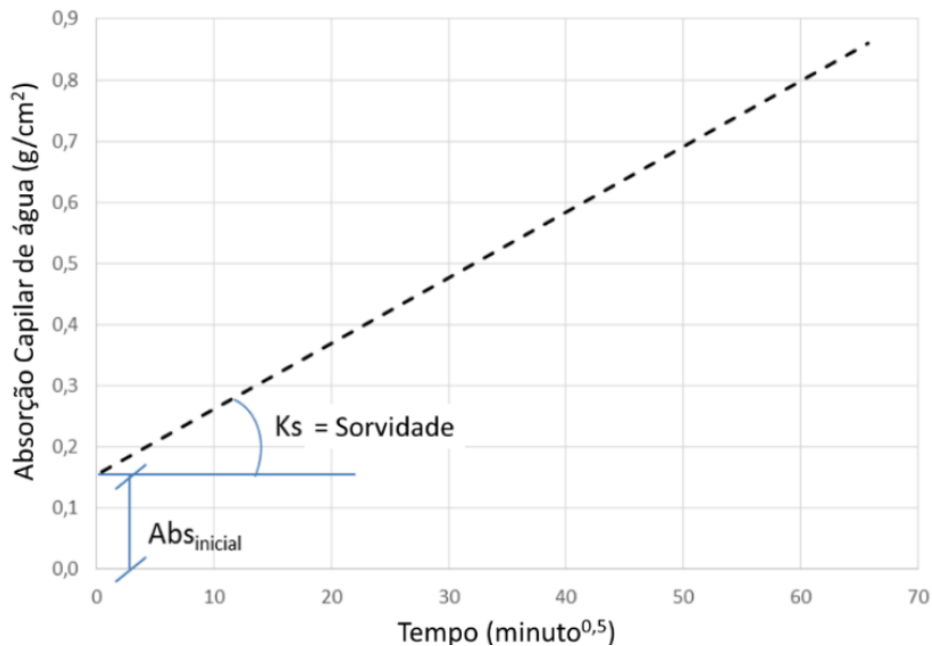


Figura 15 - Representação do coeficiente de sorvidade e da absorção inicial
Fonte: Medeiros et al. (2017)

3.4.4 Carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado conforme as recomendações da ISO 1920-12:2015. Foram moldados 2 corpos de prova prismáticos de 400 x 100 x 100 mm por traço, tipo indicado para realizar leituras por mais de um período de exposição. Foi utilizada uma câmara de carbonatação acelerada, Figura 16, cujos parâmetros de funcionamento seguiram as recomendações estabelecidas pela ISO 1920-12: 2015. Tal norma fixa as condições de ensaio, sendo a temperatura de 22 ± 2 °C e umidade relativa de $55 \pm 5\%$, porém para locais de clima quente, como é o caso de Brasília-DF, os valores sofrem alterações, passando para uma temperatura de 27 ± 2 °C e umidade relativa de $65 \pm 5\%$. A concentração de CO₂ deve ser de $3,0 \pm 0,5\%$, em volume, para qualquer condição climática.



Figura 16 - Detalhes da câmara de carbonatação acelerada

Após 28 dias de cura úmida os corpos de prova passaram por um período de 20 dias de pré-condicionamento para estabilização da umidade interna, com a utilização de sílica gel e uma solução de carbonato de cálcio. O momento dessa estabilização foi definido pela constância de massa dos corpos de prova. Antes de serem inseridos na câmara de carbonatação eles foram selados com parafina, deixando apenas duas faces expostas às condições de ensaio, para um direcionamento no fluxo de difusão do CO_2 , como pode ser visto na Figura 17.

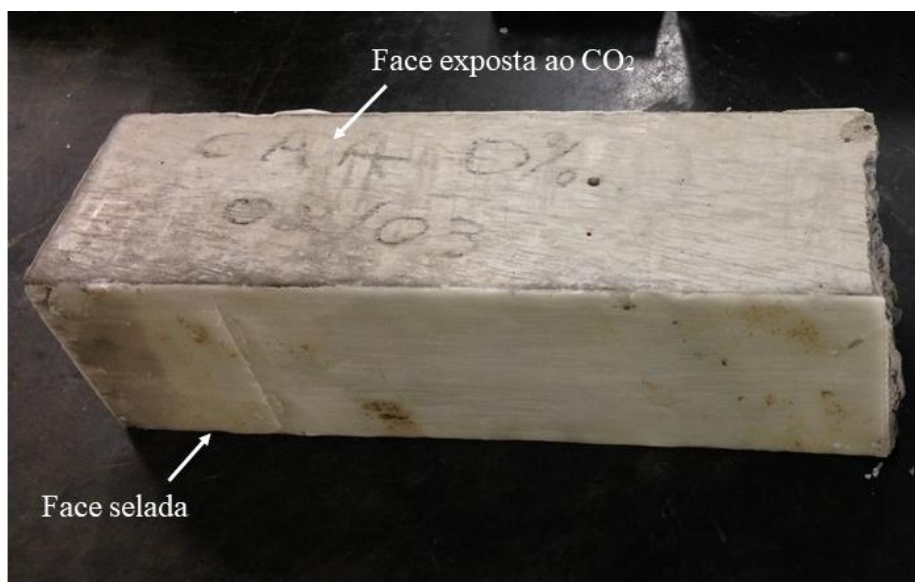


Figura 17 - Corpo de prova prismático utilizado no ensaio de carbonatação acelerada, com as faces seladas com parafina para o direcionamento do fluxo de CO_2 .

Os corpos de prova foram colocados na câmara de carbonatação acelerada por um período de 70 dias e foram realizadas medições da profundidade da frente de carbonatação com 56, 63 e 70 dias de exposição, utilizando uma solução de fenolftaleína indicadora de pH e um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm. Foram utilizados dois corpos de prova e foram realizadas pelo menos 6 medidas em cada um dos lados expostos ao fluxo de CO₂, sendo o resultado final uma média dos valores. A cada medição era retirado um pedaço de cerca de 5 cm do corpo de prova e em seguida o lado fraturado era selado novamente e o CP era recolocado na câmara, de modo que todas as leituras eram feitas no mesmo corpo de prova.

Além dos corpos de prova prismáticos, foram inseridos na câmara 3 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, a fim de se verificar como a diferença no tipo e dimensões destes corpos de prova e o direcionamento da difusão do dióxido de carbono afetam no avanço da frente de carbonatação, em cada período de exposição analisado. Vale ressaltar que os corpos de prova cilíndricos passaram pelo processo de pré-condicionamento.

Através de um display LCD 16x4 era possível visualizar os parâmetros de ensaio do interior da câmara, porém só havia um controle automatizado para a estabilidade da concentração de CO₂. A umidade e temperatura eram apenas determinadas com a utilização de um sensor DHT11. Esse sensor realiza leituras de temperaturas de 0 a 50 °C e de umidades de 20 a 90%. Para manter a umidade foi utilizada uma solução de brometo de sódio. Além disso, foi utilizada uma lâmpada incandescente, que era ligada sempre que havia a necessidade de uma elevação da temperatura.

Dentro da câmara também havia um sensor COZIR-WR, da CO₂ METER Inc., onde se pode determinar a concentração de CO₂ de 0 até 100%, com uma precisão de 0,01%. Para que o valor da concentração se mantivesse no estabelecido pela ISO 1920-12:2015, foi desenvolvido sistema utilizando uma solenoide. Cada vez que o valor da concentração ficava abaixo do desejado a válvula era aberta para injeção de CO₂ e quando o valor retornava para $3,0 \pm 0,5\%$ a válvula era automaticamente fechada. Também foram colocados pequenos ventiladores no interior da câmara para circulação do ar e garantia da homogeneidade da concentração do ambiente.

3.4.5 Ensaaios microestruturais

Para analisar como a substituição de cimento Portland por adições minerais modifica a microestrutura dos concretos foram escolhidos os seguintes ensaios: Porosimetria por intrusão de mercúrio, difração de raios-X, e análise termogravimétrica (TG e DTG). Para realização desses ensaios, foram preparadas as pastas que correspondem a cada concreto estudado. O procedimento de mistura utilizado foi o mesmo de determinação da pasta de consistência normal, segundo as recomendações da NBR NM 43. Após 28 dias de cura, foi realizada a paralisação da hidratação dessas pastas, utilizando o procedimento descrito por Scrivener et al. (2016). Depois, foram retiradas amostras de acordo com as necessidades de cada ensaio.

3.4.5.1 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

A análise térmica por termogravimetria (TG e DTG) foi realizada no Laboratório de Análise Instrumental da Universidade de Brasília, campus Gama. Para cada traço foi utilizado cerca de 10g da pasta em pó. A faixa de temperatura analisada foi de 30 a 1200°C, com rampa de aquecimento de 10°C/min, atmosfera de N₂ com fluxo de 100 mL/min e cadinho de alumina.

O procedimento de análise está de acordo com o descrito por Hoppe Filho et al. (2017), portanto nesse trabalho foram utilizadas as faixas de temperaturas determinadas pelos autores. Sendo assim, para determinar Ldh, considerou-se a perda de massa entre 35 e 385°C, para o Ldx entre 385 e 485°C e para Ldc entre 485 e 1000°C.

3.4.5.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizada no Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa - PR, em amostras de aproximadamente 1 cm³. O equipamento utilizado foi o AutoPore IV 9500 V1.05 da Micromeritics Instrument Corporation. No ensaio, o mercúrio foi intrudido nas amostras de forma contínua sendo considerado um ângulo de contato de 130° e uma tensão superficial do mercúrio de 4,85.10⁻¹ N/m, com um incremento de pressão de 0,0007 a 414 MPa.

3.4.5.3 Difração de raios-X

A difração de raios-X foi realizada no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília utilizando-se um difratômetro de raios-X da marca Rigaku, modelo Última IV com radiação e cobre. A faixa angular (2θ) analisada foi de 2 a 60°, com passo angular de 0,05° e velocidade angular de 5°/min. Para a identificação das fases cristalinas esse equipamento utiliza um software de análise de difração em pó, o PDXL e o Cristalografia Open (COD) que é um banco

de dados das estruturas cristalinas, publicados na União Internacional de Cristalografia, Sociedade Mineralógica da América.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL NO ESTADO FRESCO

4.1.1 Ensaio de autoadensabilidade

Para analisar as propriedades de autoadensabilidade dos concretos em estudo, foram realizados os ensaios recomendados pela NBR 15823:2017. O ensaio de espalhamento pelo método do cone de Abrams foi utilizado para avaliar a fluidez, a caixa L foi usada para avaliar a habilidade passante, o t_{500} e o funil V foram empregados para a viscosidade plástica aparente e o índice de estabilidade visual para detectar sinais de segregação na distribuição da argamassa ao longo do perímetro e a ocorrência de exsudação. Segundo a mesma norma, um concreto só pode ser classificado como autoadensável se estiver dentro dos parâmetros estabelecidos para os ensaios citados.

Como critério de dosagem optou-se por fixar a classe de espalhamento dos concretos como SF2, cujo diâmetro de espalhamento deve estar contido no intervalo de 660 a 750 mm. Os concretos que atendem a essa classe são adequados para a maioria das aplicações correntes, segundo a NBR 15823-1:2017. A escolha dessa classe de espalhamento se deu devido a utilização da brita 19 mm. Na Tabela 20 pode ser visto um resumo dos resultados dos ensaios realizados para avaliar os critérios de autoadensabilidade dos traços estudados.

Tabela 20 - Resultados dos ensaios dos concretos autoadensáveis no estado fresco

	REF	F10	M10	F20	M20	M15F5
t_{500} (s)	1,47	1,05	2,38	1,25	2,15	1,86
ESPALHAMENTO (mm)	683	660	665	685	675	690
FUNIL V (s)	2,95	3,29	2,76	2,69	3,16	2,26
FUNIL V - 5min (s)	3,59	4,2	3,28	2,88	3,8	2,76
CAIXA L	0,82	0,87	0,85	0,9	0,9	0,87
MASSA ESPECÍFICA (kg/m³)	2350	2260	2310	2310	2320	2300
TEOR DE SUPERPLASTIFICANTE (%)	0,35	0,35	0,7	0,45	1,1	0,85

Como premissa da pesquisa, o traço realizado era fixo, com variação da substituição de cimento Portland por adição mineral e para alcançar o espalhamento dentro do intervalo proposto, os ajustes foram feitos no teor de superplastificante. Nota-se que foi necessário um teor mais alto de aditivo para os traços que continham metacaulim, uma vez que a alta superfície específica

desse material influencia a demanda de água e promove viscosidade à mistura. O mesmo foi encontrado por Melo (2010), que produziu CAA com substituições de cimento Portland por metacaulim nos teores de 5, 10, 15 e 20% e encontrou que, quanto maior o teor, maior o consumo de aditivo superplastificante.

Apenas o traço F10 apresentou espalhamento dentro da classe SF2 com a utilização do mesmo teor de superplastificante dosado para o concreto de referência, que foi de 0,35%. O M10 apresentou um valor de espalhamento muito próximo ao F10, porém demandou o dobro da quantidade de aditivo. O traço com o maior teor de superplastificante (1,1%) foi o que continha 20% de substituição de cimento Portland por metacaulim (M20). Vieira (2017) produziu CAA com substituições por diferentes adições, com finuras variadas e encontrou um menor espalhamento para as adições mais finas, também caracterizando que essas misturas exigem uma maior demanda de água necessária para a molhagem das partículas do concreto, que pode ser realizada com a maior dosagem de aditivo.

Na Figura 18 é possível uma melhor visualização dos resultados do espalhamento pelo método do cone de Abrams, bem como das linhas que representam os limites estabelecidos pela NBR 15823-1:2017 para classificação dos concretos segundo esse requisito de fluidez.

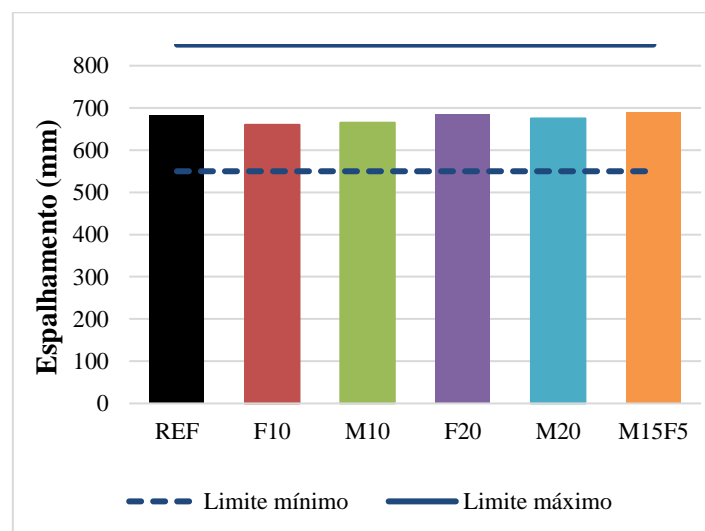


Figura 18 - Ensaio de espalhamento pelo método do cone de Abrams dos concretos analisados

Além da medida do diâmetro de espalhamento, o método do cone de Abrams também fornece a possibilidade da análise do índice de estabilidade visual dos concretos, através da observação da estabilidade desses concretos ao fim do fluxo de escoamento. As vistas e cortes utilizadas para análise são apresentadas na Figura 19.

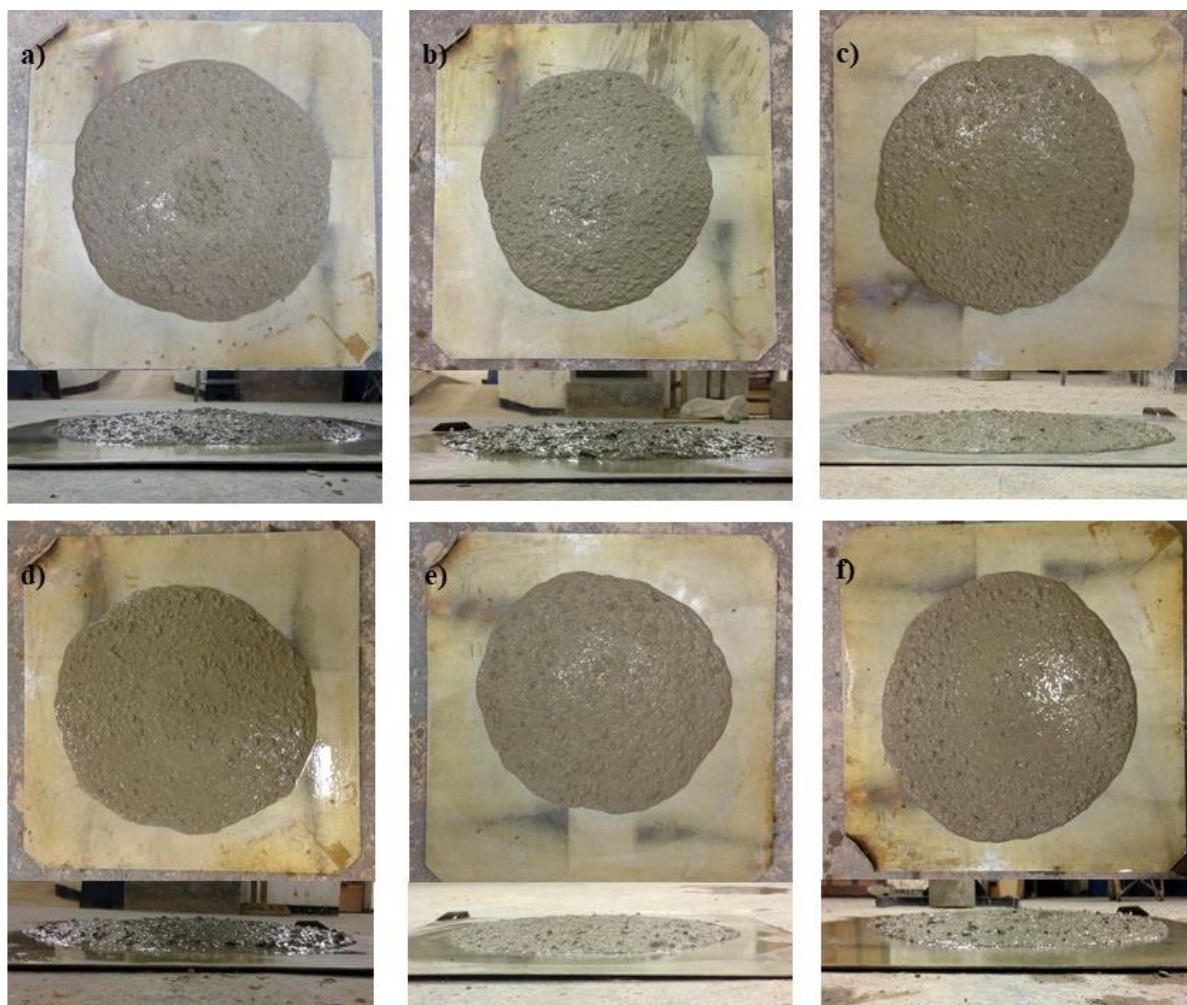


Figura 19 - Vista e corte dos concretos para determinação do índice de estabilidade visual (IEV). a) REF; b) F10; c) M10; d) F20; e) M20; f) M15F5

Não foi observado nenhum sinal evidente de exsudação ou segregação em nenhum dos concretos, sendo possível classifica-los como IEV 0, ou seja, altamente estáveis.

O tempo necessário para o concreto atingir um espalhamento de 500 mm (t_{500}) foi determinado utilizando um cronômetro, acionado assim que o fluxo se iniciou. Na Figura 20 estão os resultados encontrados e o limite intermediário estabelecido, uma vez que a NBR 15823-1:2017 não delimita um tempo máximo para a marca ser atingida.

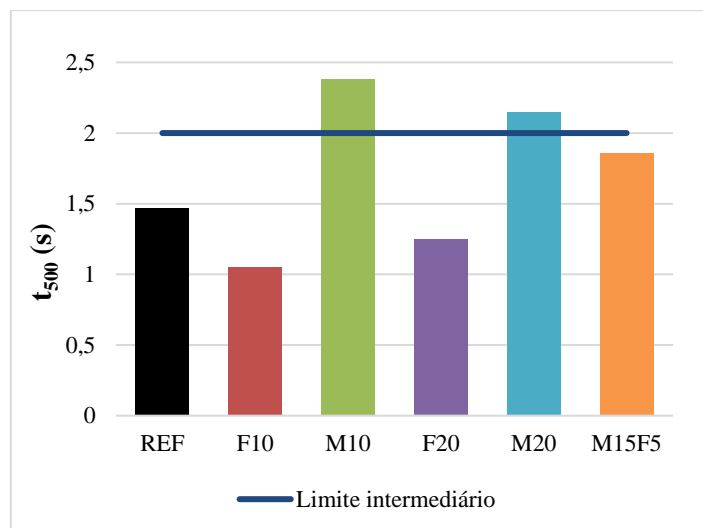


Figura 20 - Ensaio do t_{500} dos concretos analisados

Pode-se observar que os dois traços que continham apenas metacaulim, M10 e M20, estão acima da linha intermediária sendo classificados como VS2, ou seja, são concretos adequados para a maioria das aplicações correntes, apresentando efeito tixotrópico que gera menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação. Os demais traços se encaixaram na classe VS1, cuja recomendação é de aplicação em elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, contando que seja realizado um controle de exsudação e segregação. Porém, vale ressaltar, que devido ao diâmetro máximo característico de uma das britas utilizadas (19 mm), nenhum dos concretos realizados é recomendado para altas taxas de armadura.

O ensaio do funil V permite a análise da viscosidade plástica aparente dos concretos sob fluxo confinado, diferente do t_{500} cujo escoamento acontece em fluxo livre. Na Figura 21 têm-se os resultados dos traços estudados, bem como as faixas de tempo delimitadas pela NBR 15823-1:2017.

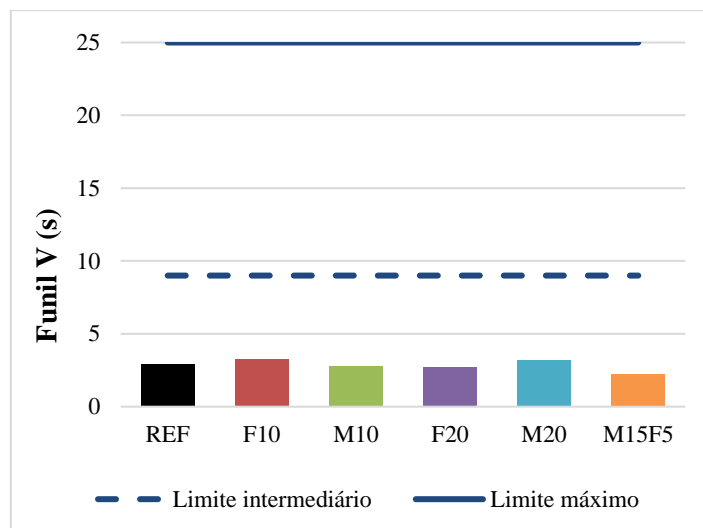


Figura 21 - Ensaio do funil V dos concretos analisados

Nota-se que os concretos estão abaixo do limite intermediário e na mesma classe de viscosidade plástica aparente, classe VF1. O tempo do funil V foi maior em relação ao do t_{500} para os traços, o que era esperado já que, devido ao confinamento, o concreto necessita de mais tempo para escoar. Diferente do observado no ensaio do t_{500} , os concretos estão dentro da mesma classe de viscosidade, dessa forma os traços M10 e M20 tiveram classificações diferentes de acordo com o tipo de fluxo, esse livre ou confinado.

Os resultados do ensaio da caixa L, que avalia a habilidade do concreto de passar por obstáculos bem como sua coesão, estão apresentados na Figura 22. Vale salientar que as determinações foram realizadas com a utilização de uma caixa L com três barras de aço.

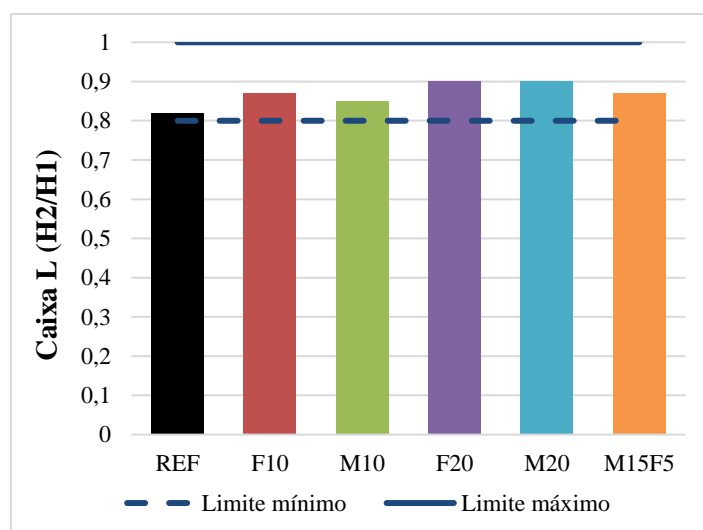


Figura 22 - Ensaio da caixa L, com três barras de aço, realizado nos concretos analisados

Os concretos estudados foram enquadrados na classe PL2, sendo passíveis de aplicação em elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 a 80 mm.

Através da análise desses parâmetros pode-se afirmar que os concretos são autoadensáveis, uma vez que se enquadram em alguma das classes definidas pela NBR 15823-1:2017 nos ensaios executados, cumprindo, assim, com os requisitos de fluidez, habilidade passante e coesão.

4.1.2 Parâmetros reológicos teóricos

No CAA, a interação entre os parâmetros reológicos é importante para a obtenção de uma mistura com mobilidade e estabilidade adequadas, evitando riscos de segregação. Wallevik (2003) diz que se a viscosidade plástica for baixa ou abaixo de 40 Pa.s, o CAA deve ter um valor de tensão de escoamento significativo (dependendo da viscosidade). Por outro lado, se o CAA é "viscoso", isto é, com viscosidade plástica acima de 80 Pa.s, o valor de tensão de escoamento deve ser aproximadamente zero.

De acordo com os resultados experimentais obtidos por Sedran e De Larrard (1999), determinados com um reômetro BT RHEOM, que serviram de base para a proposição das Equações 2 e 3, a maioria dos valores de tensão de escoamento está na região de 0 a 400 Pa e os valores de viscosidade plástica na região de 0 a 100 Pa.s, mas com vários pontos atingindo valores até 200 Pa.s. Pelas “caixas de trabalhabilidade”, determinadas com o reômetro Mk/CT/BML, descritas por Wallevik e Wallevik (2011) e apresentadas na Figura 3, tem-se que os valores mais recomendados para obtenção do CAA são uma tensão de escoamento de 0 a 30 Pa e uma viscosidade plástica de 40 a 80 Pa.s. Já na faixa de valores geralmente recomendados, a tensão de escoamento pode variar de 0 a 100 Pa e a viscosidade plástica de 5 a 120 Pa.s. Ressalta-se que os autores utilizaram reômetros diferentes para a definição das faixas mencionadas e que um mesmo concreto se comporta de maneira distinta a depender do equipamento utilizado no ensaio, de modo que a faixa de comparação mais acertiva para esse estudo é a determinada por Sedran e De Larrard (1999).

Na Tabela 21 são apresentados os valores dos parâmetros reológicos teóricos, calculados através das Equações 2 e 3, propostas por Sedran e De Larrard (1999), com a utilização dos resultados obtidos no espalhamento pelo método do cone de Abrams.

. Tabela 21 - Parâmetros reológicos teóricos dos concretos

	REF	F10	M10	F20	M20	M15F5
TENSÃO DE ESCOAMENTO TEÓRICA (Pa)	239	273	270	232	252	222
VISCOSIDADE PLÁSTICA TEÓRICA (Pa.s)	51	34	79	43	73	64

É possível observar que os valores dos parâmetros reológicos teóricos de todos os traços propostos estão dentro da faixa descrita por Sedran e De Larrard (1999). Quando se observa o intervalo descrito por Wallevik e Wallevik (2011), em relação a viscosidade plástica, apenas o F10 não se enquadra na zona de valores mais recomendados, mas está dentro da faixa geral. Já em relação a tensão de escoamento os concretos apresentaram valores bem distantes de ambas as faixas. Essa divergência entre os resultados era esperada já que os modelos teóricos não foram propostos com dados de um mesmo reômetro, ou seja, não são comparativos.

Derabla e Benmalek (2014) afirmam que como o fíler é inerte, atua no preenchimento dos vazios e em um melhor empacotamento das partículas da pasta, havendo assim uma diminuição na fricção e viscosidade com o aumento do teor de fíler adicionado, o que melhora o fluxo do CAA. Nos resultados desse trabalho, houve uma diminuição na viscosidade plástica teórica do F10 e do F20 em comparação ao REF, mas esse valor não foi menor com o aumento da quantidade de fíler calcário na mistura, sendo a diminuição de 33,8% para o F10 e de 15,8% para o F20. Os autores também encontraram que um CAA que continha escória granulada de alto-forno era mais viscoso que um com fíler calcário. Por se tratar de uma adição reativa, como é o caso do metacaulim, demanda uma maior quantidade de água, o que reduz a fluidez e o fluxo do concreto. Os valores calculados para os traços com a utilização de metacaulim foram superiores a viscosidade do REF. Mais uma vez o traço com 10% de adição teve um aumento mais pronunciado, de modo que a viscosidade do M10 foi 54,8% maior que a do REF, enquanto que a do M20 foi de 42,9%. A viscosidade do M15F5 foi 25,7% maior, provavelmente devido ao efeito fíler que ajudou no deslizamento das partículas. Vale salientar, que essas alterações na viscosidade estão diretamente ligadas a estabilidade da mistura, sendo necessário dosar o quanto se quer aumentar ou diminuir esse valor, garantindo uma mistura sem segregação.

Laskar e Talukdar (2008) observaram que os parâmetros reológicos do concreto com uma combinação ternária de cimento Portland e adições minerais estavam entre os valores com a

mistura binária de cada adição com o cimento, para um mesmo teor de substituição. Esse fato foi parcialmente observado nos concretos analisados. O M15F5 é composto pela combinação ternária entre cimento Portland, metacaulim e fíler e o teor total de substituição do cimento é de 20%, tornando-o comparável ao F20 e M20, que foram produzidos com apenas uma das adições cada. O valor de tensão de escoamento do M15F5 foi de 221,85 Pa, e está abaixo dos valores do M20 (252,28 Pa) e F20 (232,28 Pa). Já em relação a viscosidade plástica, o valor do M15F5 foi 63,84 Pa.s e está entre e os valores do M20 e F20, que foram 72,58 e 42,79 Pa.s, respectivamente.

Nas Figura 23 (a) e (b), estão os gráficos que representam a relação entre a viscosidade plástica teórica e o t_{500} e a tensão de escoamento teórica e o espalhamento, respectivamente. Percebe-se que a relação entre a tensão de escoamento e o espalhamento é inversamente proporcional, ou seja, quanto menor o valor do espalhamento maior a tensão de escoamento, enquanto um maior valor de t_{500} corresponde diretamente a uma também maior viscosidade plástica. Esse resultado está de acordo com o encontrado por Zerbino (2009). Devido a quantidade restrita de pontos utilizados o comportamento da viscosidade plástica aparenta ser linear, mas segundo Zerbino (2009) ele é logarítmico.

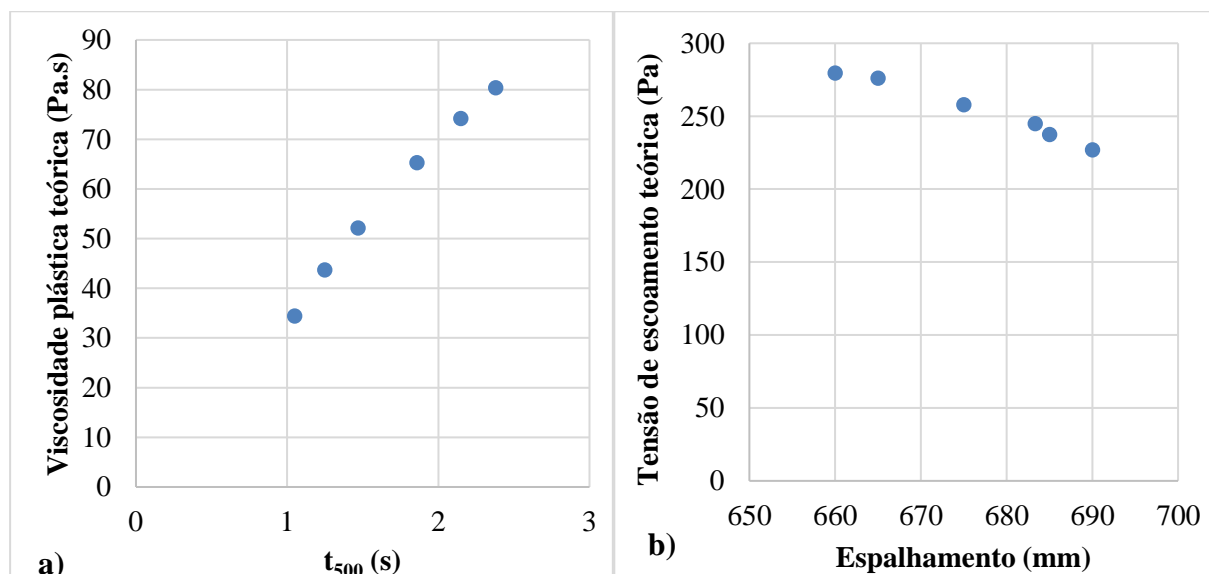


Figura 23 - (a) Relação entre a viscosidade plástica teórica e o t_{500} ; (b) Relação entre a tensão de escoamento teórica e o espalhamento

Zerbino et al. (2009), que utilizaram um reômetro Mk/CT/BML, encontraram que concretos das classes SF2 e SF3 geralmente têm tensões de escoamento menores que 20 Pa, ao passo que na classe SF1, foram medidos valores até 60 Pa. Ao mesmo tempo, nos CAA da classe VF1/VS1, a viscosidade plástica geralmente é inferior a 80 Pa.s, enquanto para a classe

VF2/VS2 valores de 100 Pa.s ou superiores foram medidos. Por critério de dosagem, os concretos do presente trabalho são da classe SF2, mas apresentaram valores de tensão de escoamento extremamente superiores aos citados pelos autores. Considerando a viscosidade plástica aparente obtida pelo ensaio do funil V, os CAA são VF1 e possuem viscosidade plástica teórica inferior a 80 Pa.s. Quando se observa os valores do t_{500} , apenas os traços M10 e M20 foram classificados como VS2 e, apesar de apresentarem valores fora da faixa citada, foram os dois traços com maior viscosidade plástica teórica calculada.

De um modo geral, os concretos se enquadraram nos critérios de autoadensabilidade da NBR 15823:2017 e, portanto, são considerados CAA. Os resultados obtidos com a utilização das equações de Sedran e De Larrard (1999) corroboram essa consideração, visto que todos os valores dos parâmetros reológicos teóricos se enquadraram ao modelo dos autores. Já com as faixas descritas por Wallevik e Wallevik (2011), os resultados de tensão de escoamento encontrados pelas formulações teóricas não foram condizentes com os valores esperados. Já os valores de viscosidade plástica atenderam os limites recomendados (40 a 80 Pa.s) ou geralmente recomendados (5 a 120 Pa.s). Vale salientar que as fórmulas utilizadas para encontrar os valores teóricos dos parâmetros possuem um erro médio de 35 Pa.s para a viscosidade plástica e 95 Pa para a tensão de escoamento e que o tipo de reômetro utilizado têm influência direta nos resultados reológicos.

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

4.2.1 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples dos concretos foi determinada seguindo as recomendações da NBR 5739: 2007, nas idades de 7, 14 e 28 dias. O comportamento dos concretos em relação a essa propriedade pode ser visualizado no gráfico da Figura 24 e pelos valores da Tabela 22.

Tabela 22 - Valores médios da resistência à compressão simples dos concretos

Idade (dias)	Resistência à compressão simples (MPa)					
	REF	F10	M10	F20	M20	M15F5
7	35,9	30,8	43,3	28,7	58,1	45,5
14	37,9	33,9	46,2	30,2	61,3	49,8
28	41,0	38,0	49,0	34,7	61,8	53,0

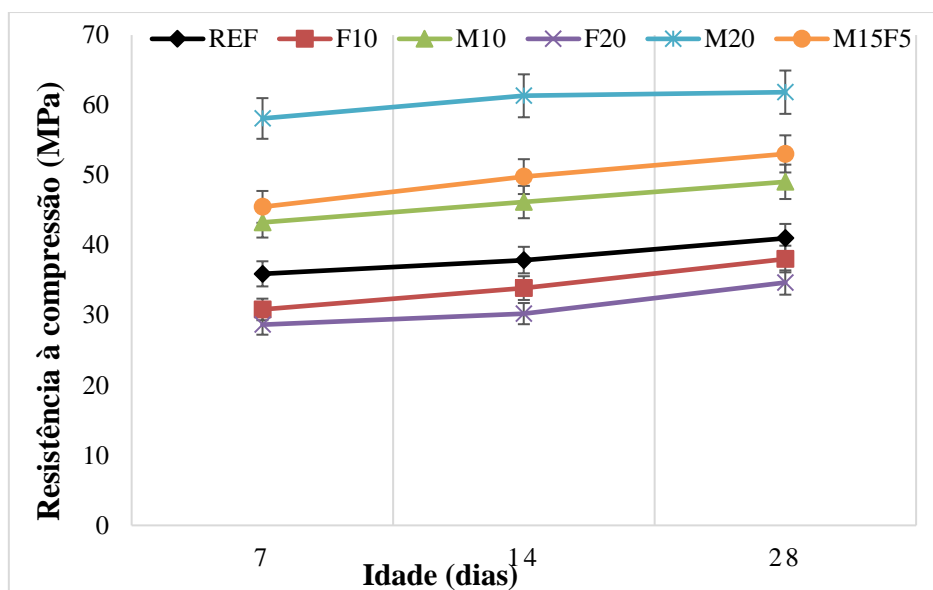
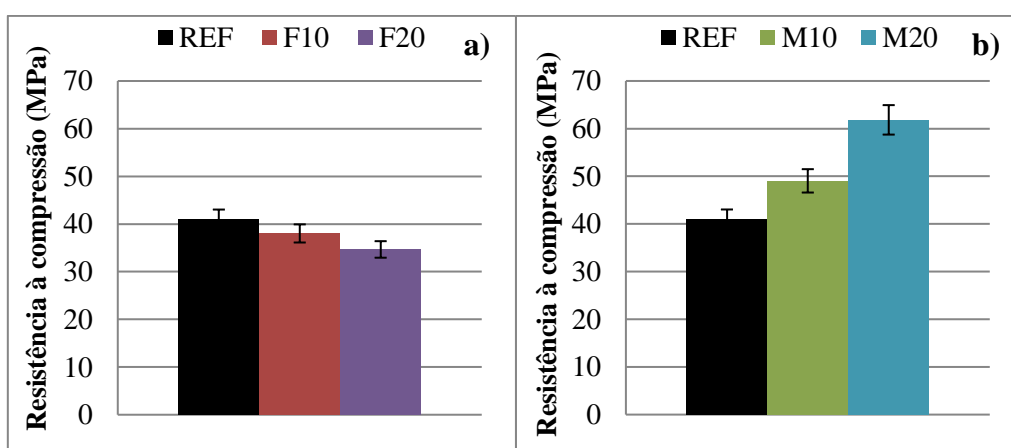


Figura 24 - - Resistência à compressão dos concretos aos 7, 14 e 28 dias de idade

Os concretos apresentaram ganho de resistência com o avanço da idade e todos os traços que contém metacaulim obtiveram desempenho superior ao concreto de referência. A melhora na resistência com a utilização metacaulim em relação ao fíler calcário é mais evidente no teor de 20% de substituição, onde o M20 alcançou uma resistência de 61,8 MPa e o F20 apenas 34,7 MPa, valores esses que são o extremo superior e inferior, respectivamente, de todos os traços. Na Figura 25 têm-se a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias, em relação ao concreto de referência.



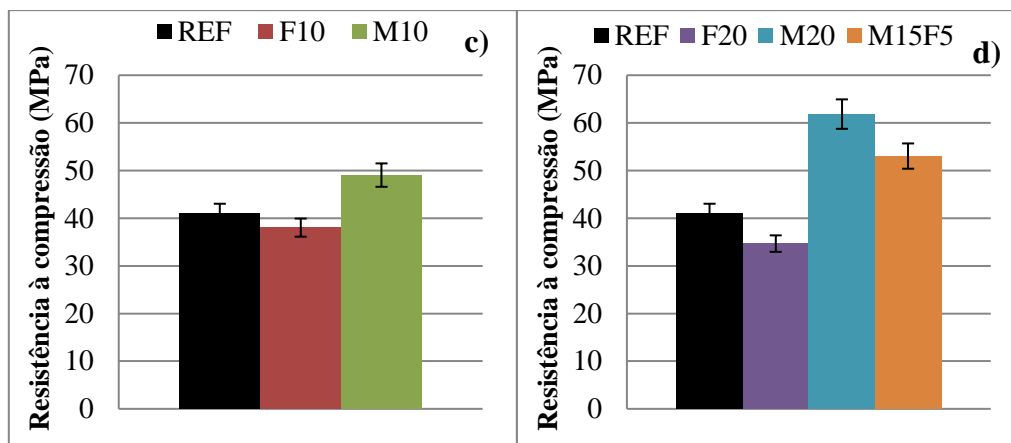


Figura 25 - Resistência à compressão do CAA em relação ao REF, aos 28 dias (a) Traços com fíler calcário; (b) Traços com metacaulim; (c) Traços com 10% de substituição de cimento Portland; (d) Traços com 20% de substituição de cimento Portland.

Pela Figura 25 (a) nota-se que nos concretos com substituição de cimento Portland por fíler calcário a resistência diminuiu a medida que o teor de substituição aumentou, sendo essa diminuição de 7,2% para o F10 e de 15,4% para o F20. Sabe-se que o uso de matérias inertes no concreto causa o efeito fíler, que promove um refinamento do sistema de poros, já que a finura das partículas serve como ponto de nucleação para formação dos hidratos. É comum que, devido a isso, aja um aumento de resistência nos concretos, porém a alta relação água/aglomerante adotada para todos os traços e o fato de trabalhar em substituição ao cimento Portland provavelmente tiveram maiores influências. Melo (2010) encontrou um aumento na resistência com o aumento do teor de fíler calcário para CAA com relação a/agl de 0,4 e uma diminuição quando essa relação passou para 0,5.

Na Figura 25 (b), têm-se a comparação dos traços com metacaulim em relação ao traço de referência. Foi observado um aumento de resistência com a utilização de 10% de metacaulim em substituição ao cimento de 19,7%. Já com a utilização de 20% de metacaulim houve um ganho significativo de 50,9%, sendo o M20 o traço com o melhor desempenho nessa propriedade. Esse comportamento era esperado uma vez que o material pozzolânico reage com o hidróxido de cálcio formado na hidratação dos silicatos, formando uma quantidade extra de C-S-H, que é o produto de hidratação que mais contribui com a resistência do material.

O aumento de resistência com o aumento do teor de substituição de cimento Portland por metacaulim também foi obtido por Sfikas et al. (2014), que produziram CAA com substituições de 7, 11, 14 e 20% de metacaulim. Dadsetan e Bai (2017), produziram CAA com 10 e 20% de substituição de cimento Portland por metacaulim e 10, 20 e 30% de substituição por escória granulada de alto forno e cinza volante, e o traço com 20% de metacaulim apresentou a melhor

resistência. Já Melo e Carneiro (2010) verificaram que a resistência à compressão diminuiu do teor de 5% para o de 35% de substituição, indicando que existe um limite de adição que pode ser incorporada ao concreto sem que ocorram prejuízos nessa propriedade.

A comparação entre os traços que continham 90% de cimento Portland pode ser melhor visualizada na Figura 25 (c). Mais uma vez fica clara a melhora na resistência mecânica com a utilização do metacaulim, que promoveu um ganho de quase 20% mesmo com 10% a menos de cimento na mistura. Já em relação ao F10, o M10 apresentou uma resistência quase 30% superior.

Na Figura 25 (d) estão os traços com 20% de substituição de cimento, pelas adições de maneira individual e na composição ternária realizada. Apenas o traço F20 causou diminuição na resistência à compressão. As adições minerais de alta reatividade têm como característica uma elevada área superficial, responsável por potencializar a fixação da cal pela atividade pozolânica, o que promove um aumento da resistência à compressão da matriz hidratada (HOPPE FILHO et al., 2017). Nesse âmbito é esperado que os traços com metacaulim propiciem incremento na resistência mesmo com menos cimento na mistura. O M15F5 promoveu um aumento de 29,4% na resistência e teve o segundo melhor desempenho dentre os concretos analisados, o que mostra que, em relação a essa propriedade, é viável a utilização da combinação das adições.

Quando se trabalha com substituições cimento Portland por adições minerais, existe a evidente diminuição no consumo de cimento dos traços. O concreto de referência foi produzido com um consumo $C = 475 \text{ kg/m}^3$ e com os percentuais de substituição empregados esse consumo passou a ser de $C = 428 \text{ kg/m}^3$ para 10% de substituição e de $C = 380 \text{ kg/m}^3$ para o teor de 20%. Vale salientar que mesmo com a diminuição na resistência em relação ao REF, o traço F20, que foi o que apresentou o pior desempenho nessa propriedade, ainda poderia ser utilizado em componentes e elementos estruturais de concreto armado submetidos a classe de agressividade ambiental III da NBR 6118:2014, uma vez que a norma determina que os concretos sejam pelo menos da classe C30 e a resistência do F20 foi de 34,7 MPa.

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado nos concretos aos 28 dias, de acordo com a NBR 7222:2011. Na Figura 26 estão os resultados dos traços.

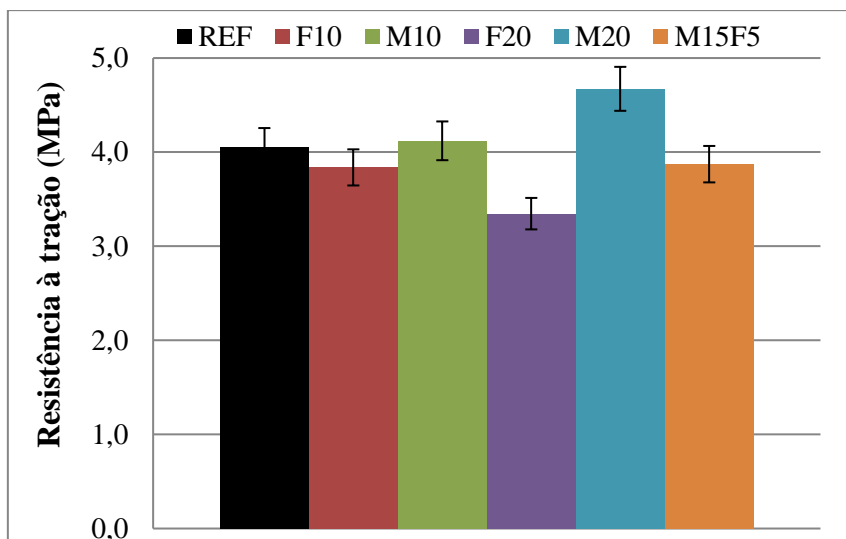


Figura 26 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos

A tendência de comportamento dos concretos foi semelhante ao observado na resistência à compressão, porém com percentuais menores de ganho ou perda de resistência. A maior diferença ocorreu para o CAA M15F5, que teve uma maior resistência à compressão e uma menor resistência à tração quando comparado ao CAA REF.

Observando separadamente alguns cenários da resistência à tração dos concretos em relação ao concreto de referência, nota-se a diminuição da propriedade com o aumento no teor de substituição de fíler calcário empregado, sendo o F10 5,3% menos resistente que o REF e o F20 17,4%, apresentando o pior desempenho nessa propriedade.

Ambos os traços que continham apenas metacaulim tiveram um ganho de resistência em relação a REF, porém, diferente do ocorrido na resistência à compressão, que o M10 teve um ganho de quase 20% em relação ao REF, os valores de resistência à tração foram praticamente os mesmos, sendo o M10 apenas 1,7% maior. Já o M20 mais uma vez foi o traço com o melhor resultado, apresentando um ganho de resistência à tração de 15,3%.

Considerando os traços que continham 10% a menos de cimento Portland, a diferença entre eles foi bem menor do que o observado na resistência à compressão, mas de modo similar o F10 teve uma perda de resistência (5,3%) e o M10 um ganho (1,7%).

Nos traços com apenas 80% de cimento Portland em sua composição observa-se que somente o M20 promoveu um acréscimo na resistência à tração. O M15F5, como já mencionado, foi o traço que com a maior alteração de comportamento, uma vez que apresentou um ganho de

resistência à compressão de 29,4% em relação ao REF, e uma diminuição de 4,5% de resistência à tração.

A NBR 6118:2014 diz que a resistência à tração indireta deve ser obtida de acordo com o método de ensaio determinado pela NBR 7222:2011, porém na impossibilidade de realização do ensaio, o valor médio ou característico pode ser estimado considerando um limite superior ($f_{ctk,sup}$) que corresponde a $1,3 f_{ct,m}$ e um limite inferior ($f_{ctk,inf}$) que corresponde a $0,7 f_{ct,m}$. A Equação 14 deve ser utilizada para determinar o $f_{ct,m}$ de concretos de classe até C50 e a Equação 15 para concretos entre as classes C55 a C90.

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (\text{Equação 14})$$

$$f_{ct,m} = 2,12 \cdot \ln (1 + 0,11 \cdot f_{ck}) \quad (\text{Equação 15})$$

No gráfico da Figura 27 estão os valores de resistência à tração obtidos experimentalmente bem como as retas que representam os valores de limites inferior e superior e o valor médio, estimados através das equações descritas pela NBR 6118:2014.

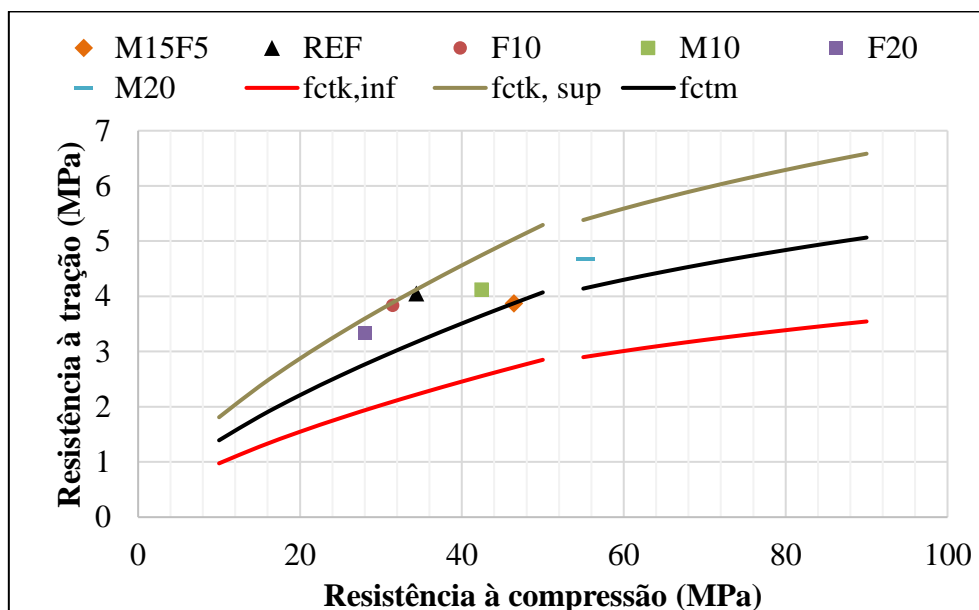


Figura 27 - Relação entre a resistência à tração obtida experimentalmente e os valores inferior, superior e médio estimados através das equações propostas pela NBR 6118:2014

Todos os valores obtidos de forma experimental estão dentro dos limites delimitados pelas equações de estimativa. Os valores dos traços que contém apenas metacaulim (M10 e M20) ficaram entre o valor médio e o limite superior, enquanto o traço de composição ternária teve o valor em cima da reta que representa o valor médio. Já os traços com fíler calcário e o REF ficaram bem próximos ou em cima do limite superior.

4.2.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade dos concretos também foi obtido aos 28 dias. Foram seguidas as definições da NBR 8522:2008 e os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 28.

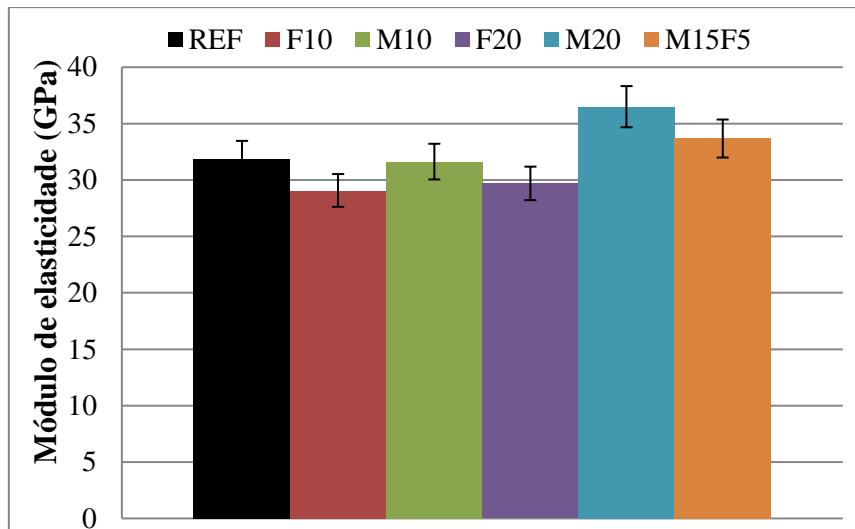


Figura 28 - Módulo de elasticidade dos concretos

De um modo geral, os valores encontrados são mais baixos que os comumente observados nos concretos convencionais. Segundo a EFNARC (2005), isso ocorre devido ao maior teor de pasta do CAA em relação ao CC. Uma vez que a deformabilidade da pasta é superior à dos agregados, ocorre uma diminuição na rigidez do concreto.

Diferentemente do observado nas resistências à compressão e a tração, o valor de módulo de elasticidade das misturas com fíler calcário não diminuiu com o aumento do teor de substituição e foi menor para o F10. Esse resultado do F10 foi o menor de todos os concretos, com uma diminuição de 8,8% em relação ao REF, enquanto a diminuição do F20 foi de 6,8%.

Assim como na resistência a tração, o valor de módulo de elasticidade do M10 foi praticamente o mesmo do REF. Dessa vez, porém, o M10 tem um valor 1% menor, sendo a única propriedade mecânica em que esse traço é inferior ao REF. Já o M20, como nas demais propriedades, apresentou o maior resultado, sendo seu módulo de elasticidade 14,5% superior ao do concreto de referência. Como o esqueleto granular é o mesmo para todos os concretos, a mudança nos valores é atribuída à rigidez das pastas. Uma vez que os resultados do M20 foram os melhores para todas as propriedades mecânicas avaliadas, entende-se que a estrutura de sua pasta é a mais densa e rígida de todos os concretos ou que a utilização do metacaulim promoveu um aumento na resistência da zona de transição da pasta com os agregados.

Analisando os traços em que foi realizada uma substituição de 10% do cimento Portland por adição mineral, ambos os concretos tiveram uma diminuição do módulo de elasticidade, sendo a do M10 quase insignificante e bem menor que a F10.

Já nos traços em que a substituição foi de 20%, assim como ocorreu com a resistência à compressão, nos dois traços que contém metacaulim houve um acréscimo no valor do módulo de elasticidade. Essa foi a única propriedade mecânica em que o F20 não teve o menor resultado entre os concretos. O M15F5, assim como na resistência à compressão, apresentou o segundo maior valor dentre os concretos, promovendo um aumento de 5,7% no módulo de elasticidade.

De modo semelhante ao que ocorre para a resistência à tração, a NBR 6118:2014 também apresenta equações para estimativa do módulo de elasticidade. A norma afirma que o módulo de elasticidade deve ser obtido de acordo com o método de ensaio determinado pela NBR 8522:2008, porém quando não houver a possibilidade de realização do ensaio, o valor pode ser estimado utilizando a Equação 16 para concretos com valores de f_{ck} entre 20 e 50 MPa e a Equação 17 para concretos com valores de f_{ck} entre 55 e 90 MPa.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{Equação 16})$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot 5600 \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \quad (\text{Equação 17})$$

No gráfico da Figura 29 estão os pontos com os valores obtidos experimentalmente, pelo procedimento recomendado pela NBR 8522:2008, bem como as retas que representam os resultados estimados com as Equações 16 e 17.

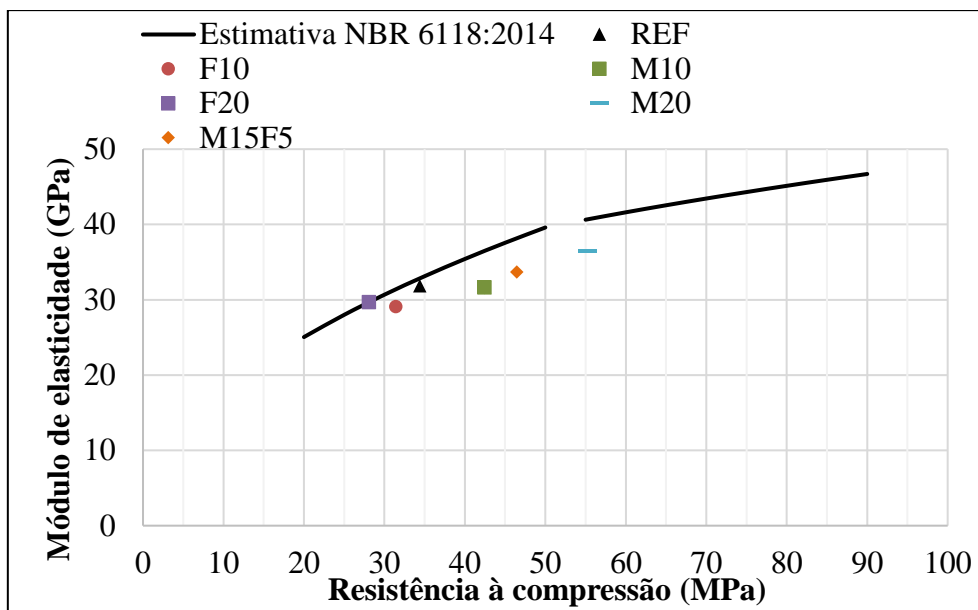


Figura 29 - Relação entre o módulo de elasticidade obtido experimentalmente e os valores estimados através das equações propostas pela NBR 6118:2014

Percebe-se que para menores resistências à compressão os valores obtidos experimentalmente são mais próximos aos estimados com as equações propostas pela norma. Já quando os valores de resistência estão acima da classe C40 os valores experimentais se afastam mais do que foi estimado, ou seja, a norma superestima. Vale salientar que as equações foram propostas para concretos convencionais e que, como mencionado, o CAA geralmente apresenta menores valores de módulo de elasticidade inerentes às suas características de composição. Desse modo, era esperado que os valores ficassem abaixo do estimado, fato que ocorreu nos traços analisados. Ressalta-se, porém, que mesmo os valores encontrando-se abaixo do estimado pela norma eles ficaram próximo da reta de estimativa, uma vez que foi utilizada a brita 19 mm no esqueleto granular dos traços.

4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado em três corpos de prova cilíndricos, de 10 x 20 cm, após 28 dias de cura na câmara úmida. Na Figura 30 estão apresentados os resultados de todos os traços estudados. De um modo geral, pode-se observar que os traços que contém fíler calcário apresentaram uma absorção maior que as misturas com metacaulim.

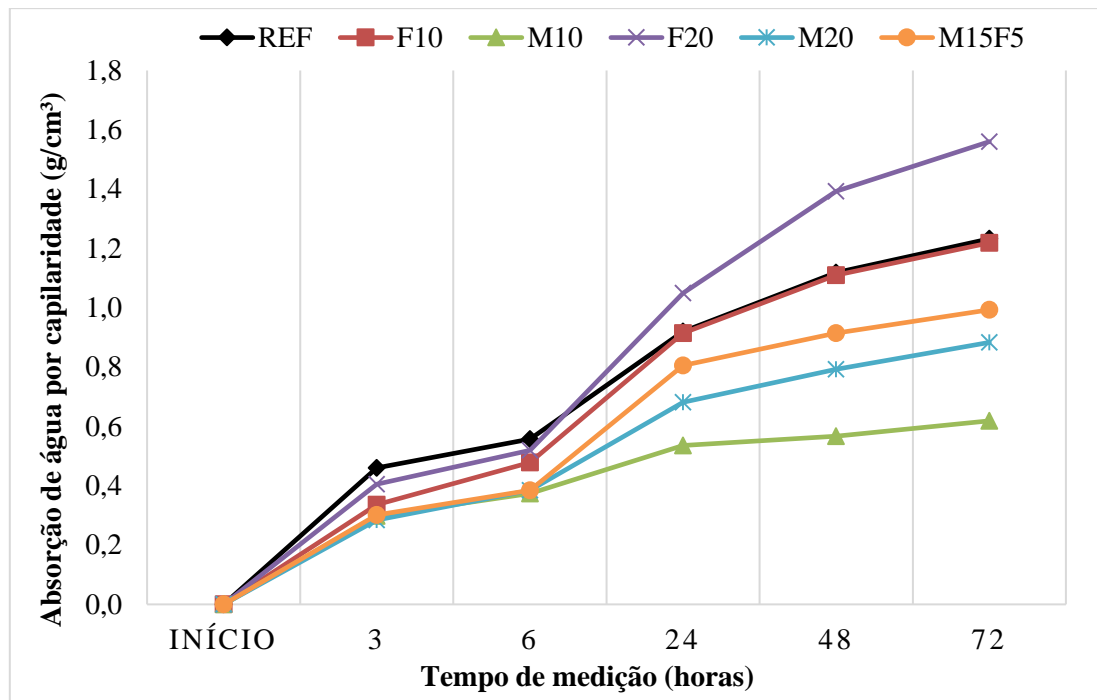


Figura 30 - Absorção de água por capilaridade de todos os concretos

Percebe-se que, nas primeiras horas de ensaio, o REF teve valores de absorção maiores que as demais misturas. Com o decorrer do ensaio, no entanto, o F20 atingiu absorções superiores, sendo o traço com os maiores valores nessa propriedade e alcançando uma absorção 26,6% maior que a do REF. Já o F10, mesmo com uma menor absorção inicial, a partir de 24 horas até o final do ensaio atingiu valores praticamente iguais ao REF, sendo seu valor final apenas 1% menor. Esse comportamento é inerente à distribuição e tamanho dos poros.

Ambos os traços que contam apenas com o metacaulim como adição mineral apresentaram absorção menor que o REF em todos os tempos de medição analisados. Nota-se, que até as 6 horas de ensaio os dois traços apresentaram valores iguais, sendo a diferença entre eles notada a partir da medição com 24 horas. Ao fim do ensaio, o M10 foi o traço com a menor absorção, com uma redução de 49,8% em relação ao REF, menor valor observado entre os concretos. O M20, por sua vez, teve um valor 28,3% menor ao REF, sendo o segundo traço com o melhor desempenho nessa propriedade.

Em relação aos traços com 10% de substituição, observa-se que o F10 e o M10 apresentam valores próximos de absorção inicial, porém ao decorrer do ensaio essa diferença cresce, uma vez que, como mencionado, a absorção final do F10 é praticamente a mesma do REF e o M10 apresenta o menor valor dessa propriedade.

Com até 6 horas de contato com a água, a absorção capilar do REF é maior que a de todos os concretos com 20% menos cimento em sua composição. A partir dessa determinação, o F20 passa a ter uma absorção maior que a do REF, enquanto os traços com metacaulim continuam com valores inferiores, com a absorção final do M15F5 sendo 19,4% menor.

O coeficiente de sorvidade é uma forma de analisar comparativamente materiais de composições diferentes, uma vez que se trata de uma característica intrínseca do material (MEDEIROS et al., 2017). No gráfico da Figura 31 podem ser vistos os coeficientes de sorvidade dos concretos, obtidos com o procedimento descrito no item 3.4.2. Os concretos com fíler calcário apresentaram um valor de Ks maior que o concreto de referência, em percentuais de 5% para o F10 e 34,6% para o F20, que novamente foi o traço de menor desempenho. Já todos os traços que continham metacaulim diminuíram a sorvidade em relação ao REF, provavelmente devido ao refinamento dos poros promovido pela reação pozolânica. O Ks do M15F5 foi 14,5% menor em relação ao REF, o do M20 foi 26,3% e, por fim, a composição M10 reduziu a sorvidade em mais da metade (53,1%) do valor de referência, alcançando, mais uma vez, a melhor performance em uma propriedade.

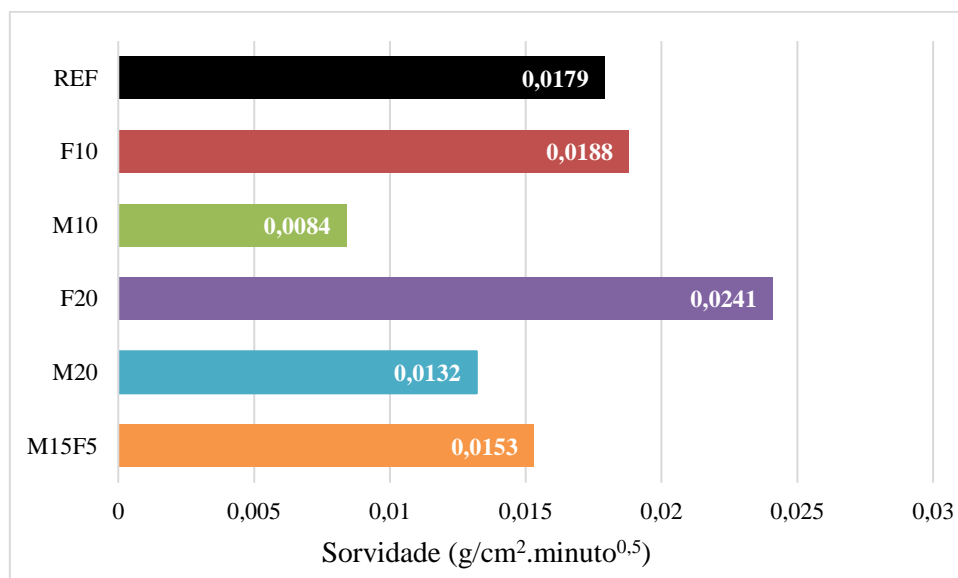


Figura 31 - Coeficiente de sorvidade de todos os concretos

É possível, ainda, encontrar uma relação entre a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias, como apresentado na Figura 32.

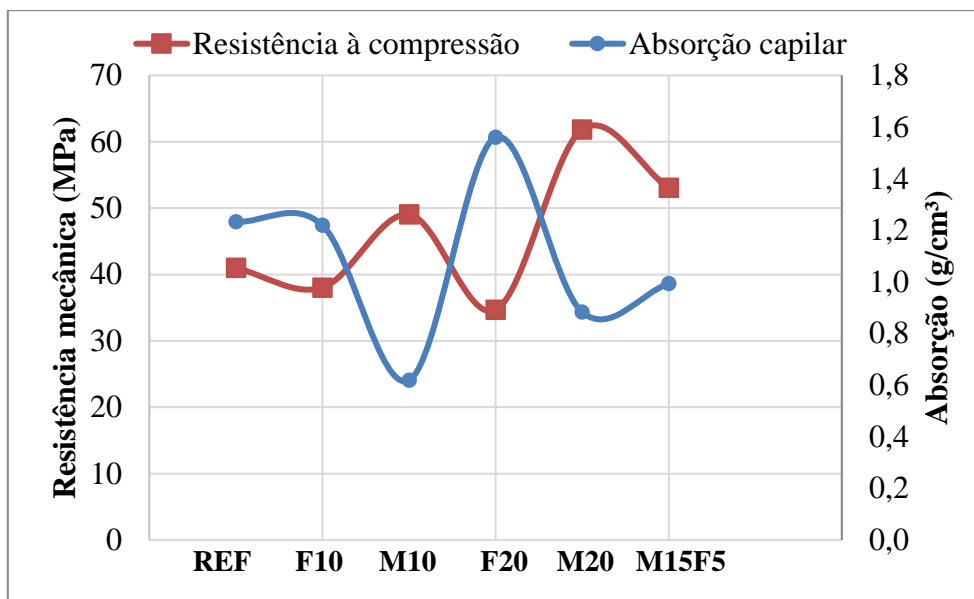


Figura 32 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias

Percebe-se que os valores são inversamente proporcionais. O F20 foi o traço que apresentou o maior valor de absorção capilar (1,56 g/cm³) e também o menor valor de resistência à compressão (34,7 MPa). A mesma tendência ocorre nos demais traços, porém o maior valor de resistência mecânica foi obtido pelo M20 (61,8 MPa) enquanto que a menor absorção observada foi a do M10 (0,62 g/cm³). Assim, mesmo com uma resistência 20,7% menor que a do M20, o M10 apresentou uma absorção 30% menor, o que condiz com seu coeficiente de sorvidade que, como mencionado, foi o menor de todos os concretos analisados.

4.4 CARBONATAÇÃO ACELERADA DO CAA

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado de acordo com as recomendações da ISO 1920-12:2015. Para efeito de comparação dos resultados com a norma vigente e os anteriores a sua publicação, foram utilizados corpos de prova prismáticos e cilíndricos. Os prismáticos foram selados com parafina e os cilíndricos não passaram por nenhum tipo de preparação, para se verificar como a diferença no tipo e dimensões dos corpos de prova e o direcionamento do fluxo de difusão do CO₂ interferem no avanço da frente de carbonatação acelerada.

No gráfico da Figura 33 estão os valores médios de profundidade de carbonatação medidos nos corpos de prova prismáticos. Todos os valores obtidos são a média de pelo menos 6 leituras, realizadas ao longo das superfícies dos corpos de prova que estavam expostas ao fluxo de difusão de CO₂.

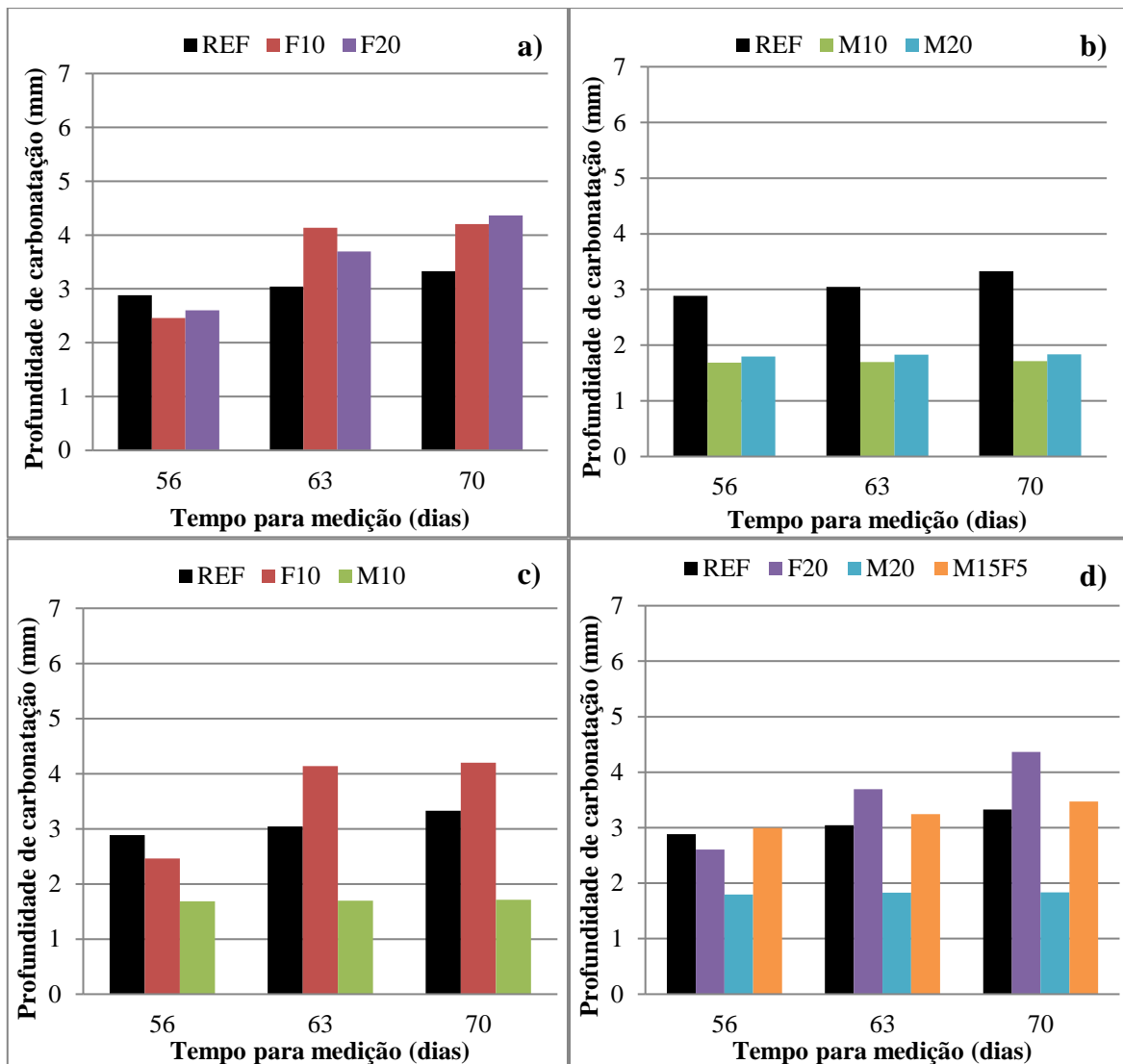


Figura 33 - Profundidade de carbonatação dos corpos de prova prismáticos em relação ao REF. (a) Traços com fíler calcário; (b) Traços com metacaulim; (c) Traços com 10% de substituição de cimento Portland; (d) Traços com 20% de substituição de cimento Portland

Houve um aumento do valor medido com o avanço do tempo de exposição dos concretos ao ambiente acelerado de carbonatação, mais acentuado nos traços com fíler calcário. Ainda assim, os valores obtidos são pequenos para CAA.

Na Figura 33 (a), percebe-se que aos 56 dias ambos os traços com fíler calcário apresentaram valores de carbonatação inferiores ao REF, porém com o avanço do tempo de exposição os valores passaram a ser maiores. Ao fim do ensaio a profundidade de carbonatação do F10 e o do F20 foi próxima, mesmo com o dobro de substituição de fíler por cimento no F20, porém nota-se uma tendência de estabilização desse avanço no F10 dos 63 para os 70 dias, enquanto o F20 apresentou um claro crescimento.

Os traços com metacaulim, Figura 33 (b), apresentaram profundidade de carbonatação menor que o REF em todos os tempos de medição. Não foi notado avanço significativo na frente de carbonatação de nenhum dos dois traços ao decorrer do ensaio, indicando que a estrutura porosa permeável de ambos não favorece a difusão do CO₂. O valor final do M20 foi 7% superior ao do M10, diferença muito pequena considerando a possibilidade de um traço com 20% menos cimento Portland.

A diferença entre a utilização de fíler calcário ou metacaulim como substituto parcial do cimento Portland é bem clara ao se observar a Figura 33 (c), sendo o traço M10 muito mais eficiente na redução do ingresso do agente deletério, com uma diminuição de 94,02% em relação ao REF e de 145% em relação ao F10.

Nos traços com 20% de redução de cimento Portland, apenas o M20 promoveu uma redução da profundidade de carbonatação, como apresentado na Figura 33 (d). O F20 foi o traço com a maior profundidade medida, com um valor 23,78% superior ao do REF. Já o aumento provocado pelo M15F5 foi de apenas 4,15% e também não houve variação significativa dos resultados ao longo das medições realizadas.

Na Figura 34 podem ser vistos os resultados da profundidade da frente de carbonatação de ambos os tipos de corpos de prova utilizados, para uma melhor análise comparativa.

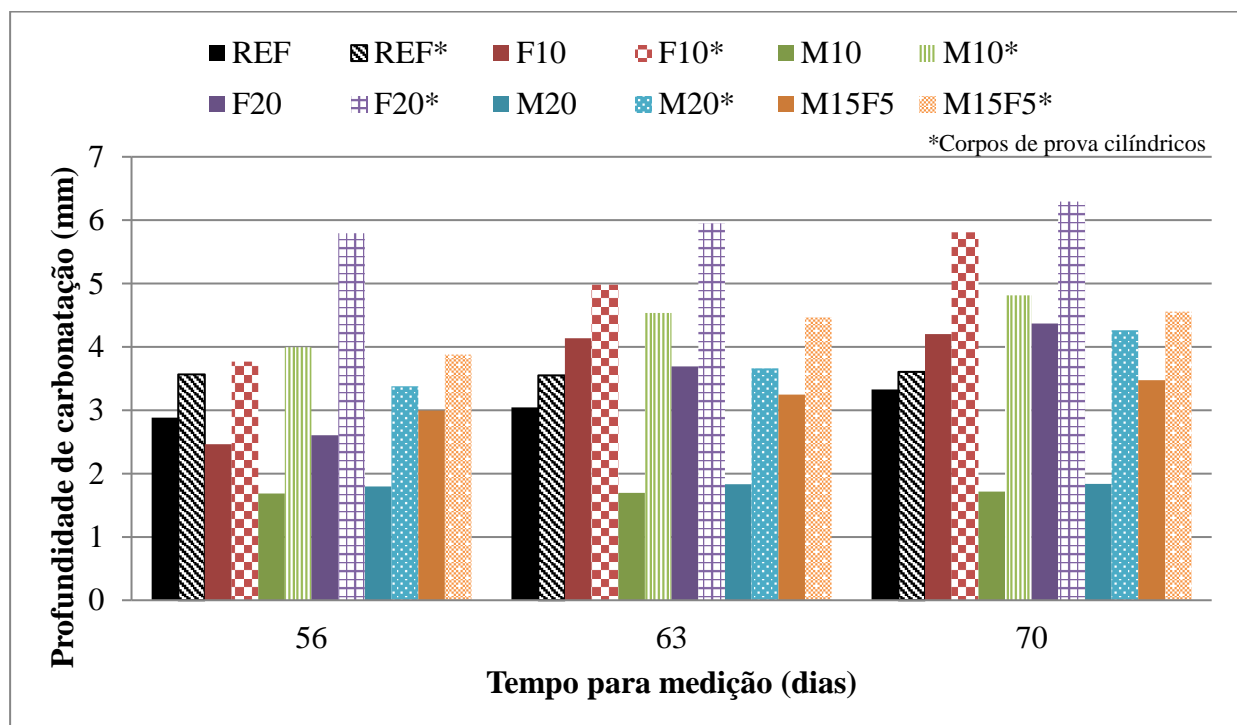


Figura 34 - Profundidade da frente de carbonatação acelerada dos dois tipos de corpos de prova (prismático e cilíndrico) utilizados

Percebe-se que nos corpos de prova cilíndricos os valores encontrados são maiores que os obtidos nos corpos de prova prismáticos, para os mesmos traços e tempos de medição. Entretanto a principal diferença da utilização de um corpo de prova cilíndrico e sem o direcionamento do fluxo de difusão do CO₂ foi o fato dos concretos com adição mineral apresentarem maiores profundidades de carbonatação que o concreto de referência, mesmo comportamento observado por Zhao et al. (2015) que produziram concretos com substituição de cimento Portland por cinza volante e escória granulada de alto-forno. Os maiores valores foram observados nos traços com fíler calcário, semelhante ao ocorridos nos corpos de prova prismáticos.

Nota-se que o traço F10 teve um crescimento no avanço da frente de carbonatação com o decorrer do tempo de ensaio, enquanto o F20 apresentou valores mais próximos em todas as medidas, ao contrário do que aconteceu nos corpos de prova prismáticos. O aumento da profundidade da frente de carbonatação em relação ao REF foi de 61,16% para o F10 e 74,61% para o F20, que novamente teve o maior valor entre os traços.

Os concretos com metacaulim também se comportaram de forma oposta ao ocorrido nos corpos de prova prismáticos. A frente de carbonatação do M20 foi menor que a do M10 e em ambas existe um aumento com o decorrer do tempo de exposição ao CO₂. Em relação ao REF, houve uma carbonatação 33,51% maior no M10 e 18,25% no M20.

Ao analisar apenas o teor de 10% de substituição, mais uma vez o traço com metacaulim apresentou melhor desempenho que o com fíler calcário, de modo que o M10 teve uma profundidade de carbonatação 20% menor que o F10.

Nos corpos de prova cilíndricos a utilização de 20% fíler calcário causou uma diferença bem mais evidente em relação as outras composições, sendo a frente carbonatada do F20 47,66% maior que a do M20 e 38,21% superior à do M15F5. Diferente do ocorrido nos corpos de prova prismáticos, as medições finais dos traços M20 e M15F5 foram próximas, sendo o M15F5 apenas 6% maior.

Considerando os valores de profundidade de carbonatação medidos ao final do ensaio (70 dias), para os dois tipos de corpos de prova utilizados, fica clara a necessidade de uma padronização no procedimento de ensaio de carbonatação acelerada, uma vez que existe uma grande diferença nos valores encontrados, principalmente quando o traço tem a substituição de cimento Portland por uma adição mineral. Como já mencionado, os corpos de prova cilíndricos apresentaram

uma maior frente de carbonatação. O REF foi o traço em que essa diferença foi menor, de 8,31%. A segunda menor diferença foi do M15F5, cujo valor percentual foi de 31,16%. Nos traços com substituição apenas de fíler calcário os aumentos foram próximos, sendo de 38,28% para o F10 e 44,15% para o F20. Porém, a maior disparidade foi observada nos traços com metacaulim, onde a profundidade de carbonatação medida foi 132,16% maior nos corpos de prova cilíndricos do M20 e 180,59% nos do M10, maior diferença verificada entre os concretos.

Na Figura 35 podem ser vistas as seções transversais dos corpos de prova prismáticos relativos a cada um dos traços, após os 70 dias dentro da câmara de carbonatação acelerada.

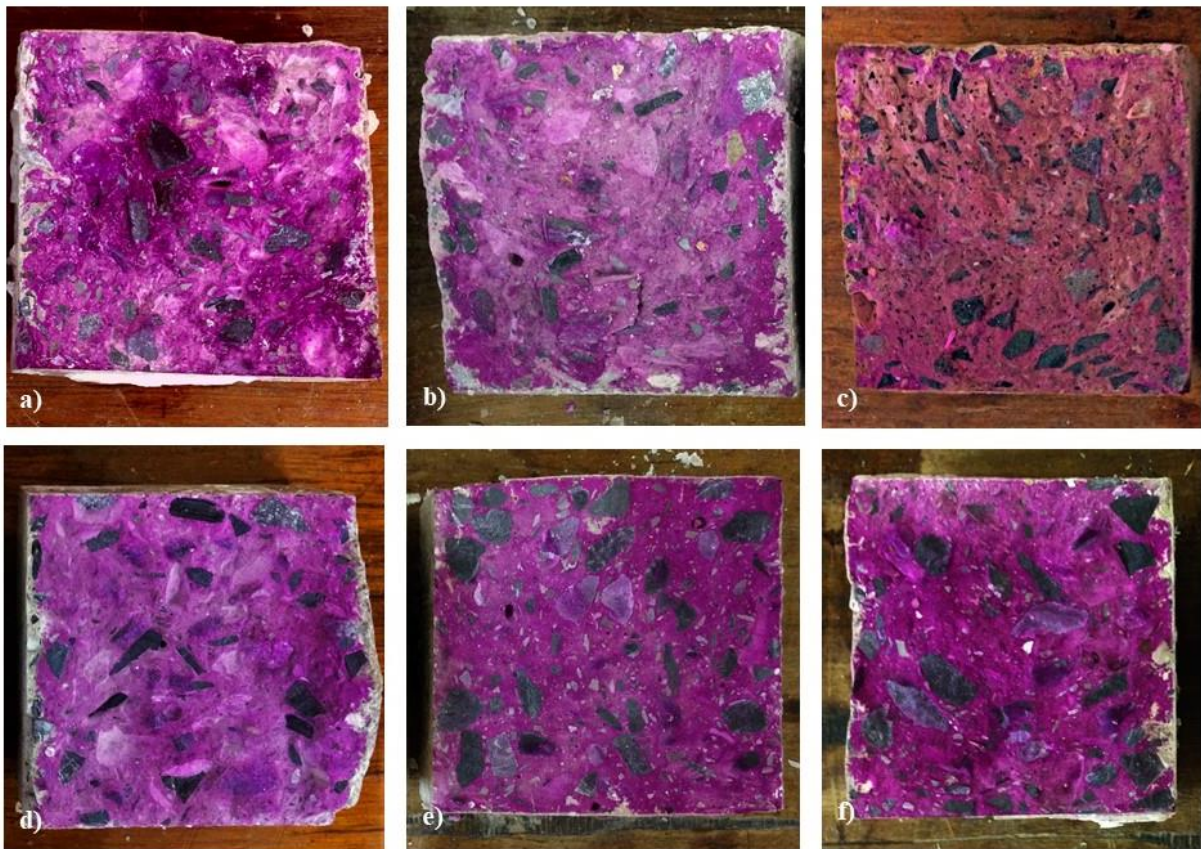


Figura 35 - Frente de carbonatação acelerada dos corpos de prova prismáticos. (a) REF; (b) F10; (c) M10; (d) F20; (e) M20; (f) M15F5

Percebe-se que nos traços com fíler calcário, o avanço da frente de carbonatação ocorreu de maneira mais uniforme, havendo a identificação de uma frente de carbonatação linear. Nos traços que continham metacaulim, quando observada, a carbonatação foi pontual. No caso específico do M15F5 foram encontrados pontos com profundidades de carbonatação elevadas e outros em que praticamente não havia avanço, de modo que a média gerou um resultado ligeiramente superior ao REF, ainda que visualmente sua superfície carbonatada seja menor.

Isso sugere que a utilização combinada das adições pode provocar um fortalecimento na matriz e, conseqüentemente, uma difusão de CO₂ mais expressiva pela zona de transição.

Na Figura 36 são apresentadas as seções transversais dos corpos de prova cilíndricos, que foram rompidos diametralmente após 70 dias de ensaio.

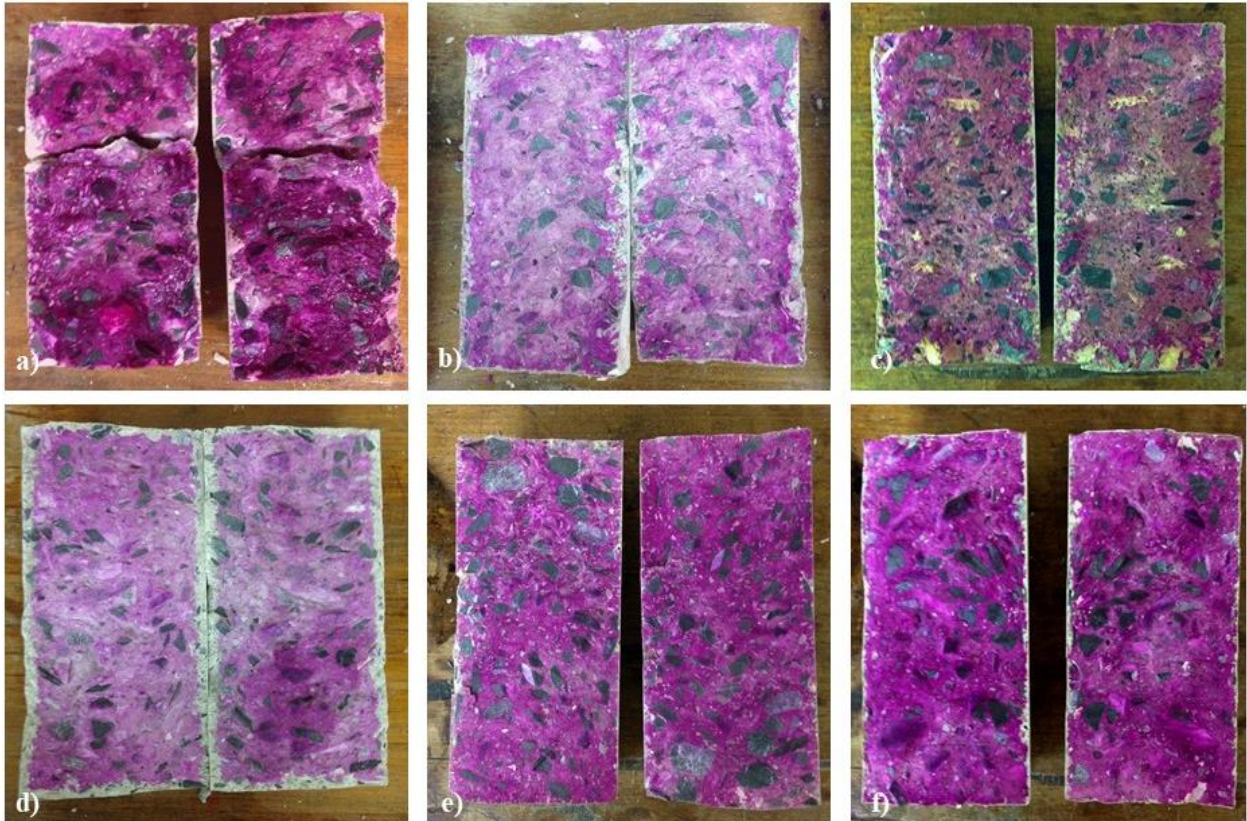


Figura 36 - - Frente de carbonatação dos corpos de prova cilíndricos. (a) REF; (b) F10; (c) M10; (d) F20; (e) M20; (f) M15F5

Semelhante aos corpos de prova prismáticos percebe-se mais uniformidade no avanço da frente de carbonatação dos traços com filler calcário, bem evidente no F20. Nos traços que contém metacaulim, sozinho ou combinado, não se identifica uma frente de carbonatação bem definida, sendo os valores obtidos em frentes pontuais.

Utilizando a equação que propõe que a profundidade de carbonatação é proporcional a raiz quadrada do tempo de exposição (Equação 7), foram determinados os coeficientes de carbonatação (K) de cada traço, utilizando as leituras de profundidade dos corpos de prova, após 70 dias de exposição. Os resultados estão apresentados na Figura 37. Com esse coeficiente é possível determinar o tempo necessário para atingir qualquer valor desejado de profundidade de carbonatação, para a concentração de CO₂ utilizada no ensaio acelerado ($3,0 \pm 0,5\%$).

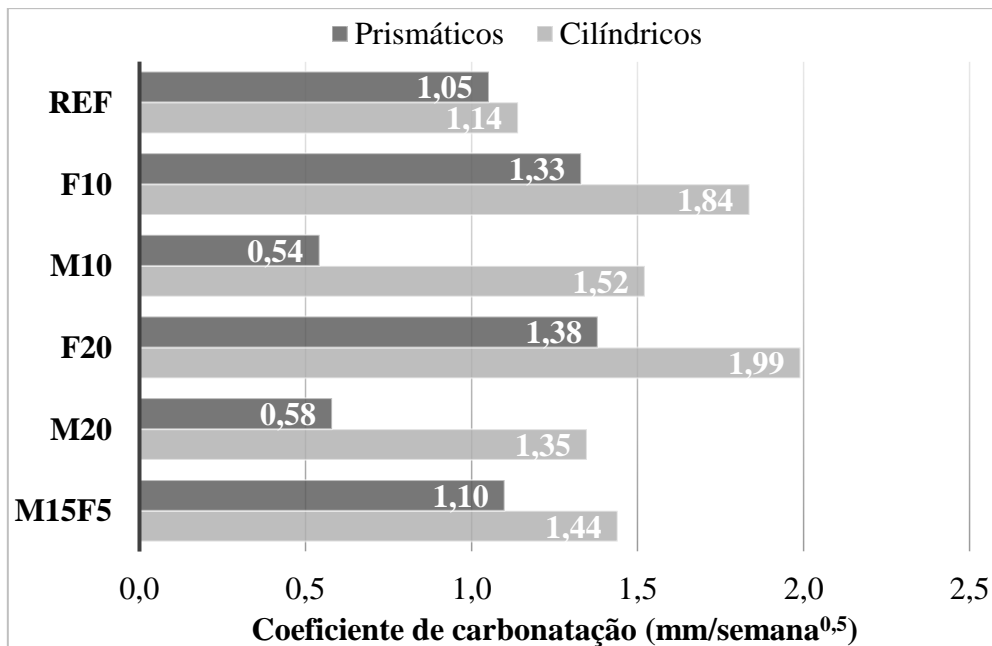


Figura 37 - Coeficiente de carbonatação de todos os traços, de acordo com a geometria do corpo de prova utilizado

Sabe-se que a carbonatação é prejudicial às estruturas de concreto armado quando a frente carbonatada atinge as armaduras, pois ocorre a despassivação e, quando acontece na presença de umidade, pode desencadear o processo corrosivo. O cobrimento nominal recomendado pela NBR 6118:2017, para concretos expostos a classe de agressividade ambiental III, é 40 mm. Assim, foram realizadas extrapolações para determinar quanto tempo seria necessário para frente de carbonatação, de cada um dos concretos desse estudo, atingir esse valor.

Nos traços REF, F10, M10, F20, M20 e M15F5 seriam necessários aproximadamente 27,83, 17,35, 105,23, 16,11, 91,22, 25,36 anos, respectivamente, para uma profundidade de carbonatação de 40 mm. Sabe-se, porém, que a concentração de CO₂ do meio ambiente é em torno de 0,04%, valor 75 vezes menor que a utilizada na determinação dos coeficientes de carbonatação. Desse modo, sem considerar outras interações das estruturas com o ambiente e as deteriorações a que essas podem ser submetidas em situações de uso, a carbonatação demoraria muito tempo para atingir as armaduras de estruturas confeccionadas com os traços de CAA estudados. Verifica-se que o CAA é uma boa alternativa para a extensão da vida útil das estruturas de concreto, especialmente se a carbonatação for considerada como o principal fator agressivo, mesmo para os traços com 20% menos cimento Portland em sua composição.

Da mesma forma que nos corpos de prova prismáticos, o coeficiente de carbonatação foi calculado para os corpos de prova cilíndricos e a extrapolação dos resultados para a previsão da frente de carbonatação atingir o cobrimento nominal de 40 mm do concreto foi realizada. Os

coeficientes de carbonatação dos corpos de prova cilíndricos são maiores que os dos corpos de prova prismáticos, mas ainda assim nenhum dos traços apresentou risco de corrosão das armaduras induzida por carbonatação, uma vez que a quantidade de anos necessários para que a frente de carbonatação chegasse as barras seria aproximadamente 23,61, 9,06, 13,28, 7,75, 16,84, 14,80 para o REF, F10, M10, F20, M20 e M15F5, respectivamente.

Como já mencionado, existe um grande problema de comparação entre os resultados das pesquisas sobre carbonatação acelerada em CAA. Mesmo com a identificação de diversos artigos sobre o tema, não foi possível encontrar autores cujos parâmetros utilizados fossem semelhantes, já que cada pesquisador escolhe diferentes tipos e dimensões dos corpos de prova, intervalos de medição e condições da câmara de carbonatação (umidade, temperatura e concentração de CO₂); tornando difícil relacioná-los adequadamente com os resultados desse trabalho.

4.6 ENSAIOS MICROESTRUTURAIS

4.6.1 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosidade de um material pode ser descrita como a razão entre seu volume de vazios e o volume total e é possível definir dois tipos: a porosidade fechada (poros sem comunicação entre si) e a porosidade aberta (poros interconectados). A porosidade aberta contribui para suscetibilidade do material à ação deletéria de agentes agressivos, afetando, assim, as propriedades de transporte e a durabilidade do concreto. Poros maiores que 0,05 μm , são considerados os mais prejudiciais ao transporte de massa, enquanto que os poros menores que 0,05 μm , interferem mais na retração por secagem e na fluência. De modo geral, o CAA tem uma estrutura de poros mais fina que os concretos convencionais, devido ao uso de um maior teor de finos, menor proporção de agregados e aditivos superplastificantes capazes de melhorar a dispersão das partículas (MEHTA; MONTEIRO, 2014; VALCUENDE et al., 2012; SALOMÃO 2016).

No gráfico da Figura 38 pode ser vista a distribuição incremental de volume de poros dos traços estudados. Existem três picos significativos nos diâmetros de 0,01, 0,05 e 100 μm . Segundo Rato (2006), o pico do gráfico é o valor que representa a maioria dos poros ou o diâmetro dos pequenos poros que dão acesso a poros maiores. A distribuição acumulada do volume de poros dos traços está apresentada no gráfico da Figura 39.

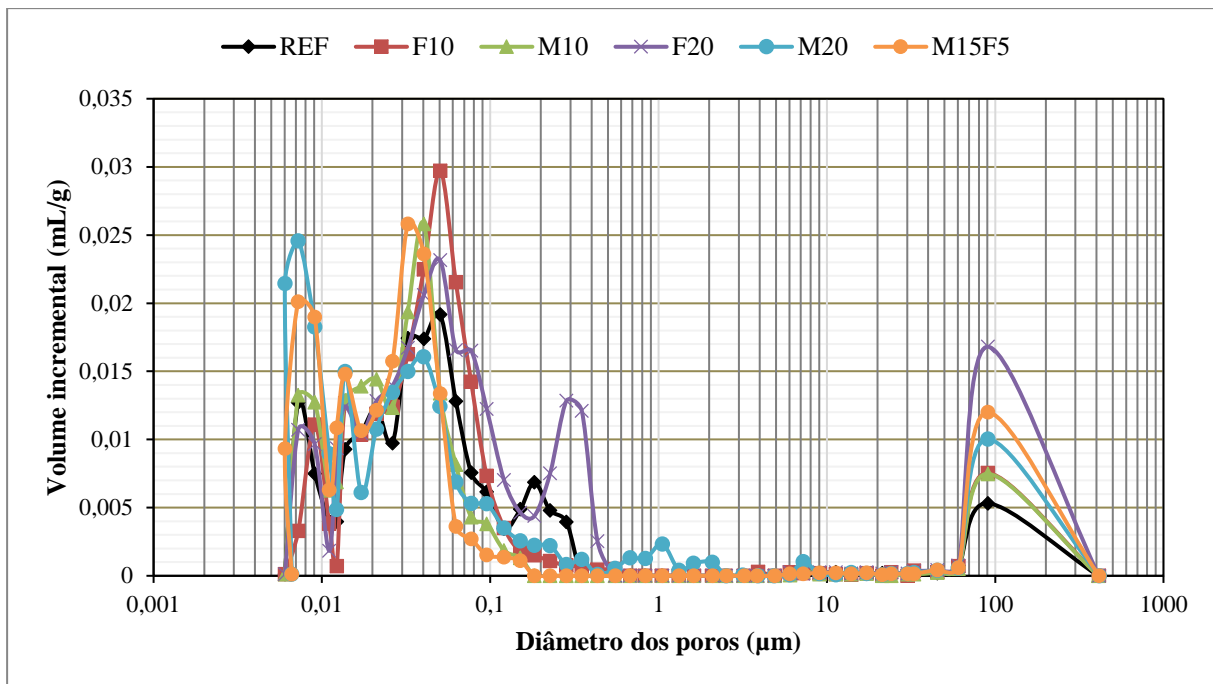


Figura 38 - Relação do incremento de volume com o diâmetro dos poros

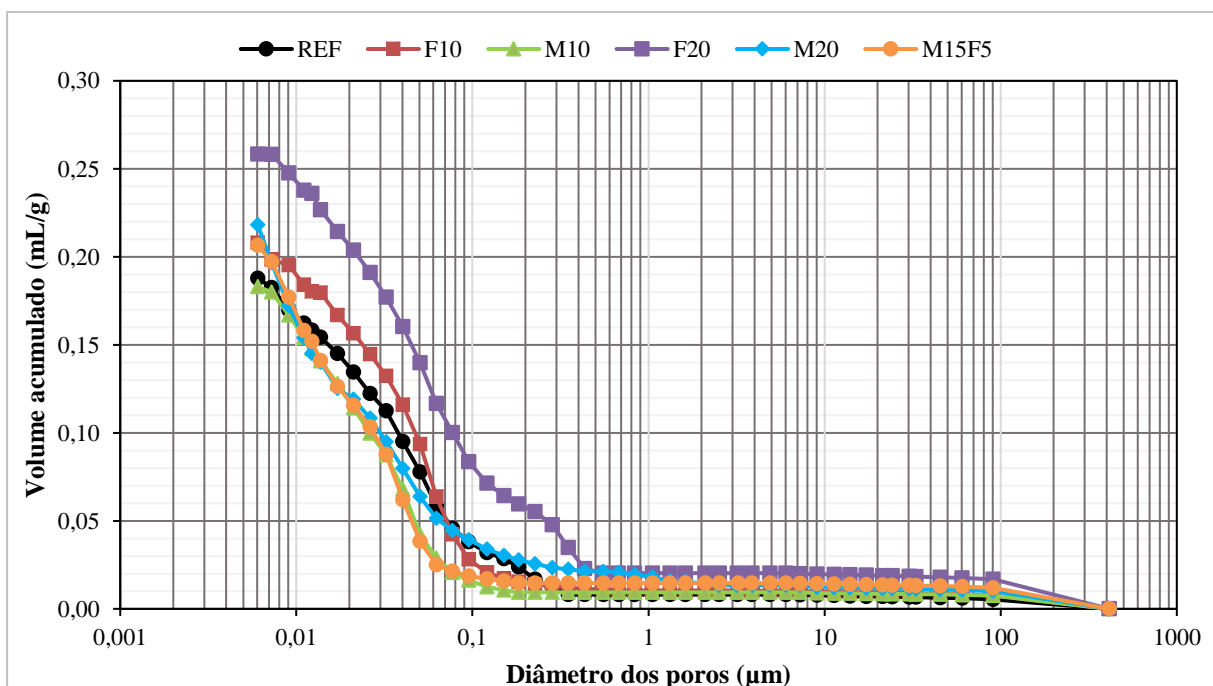
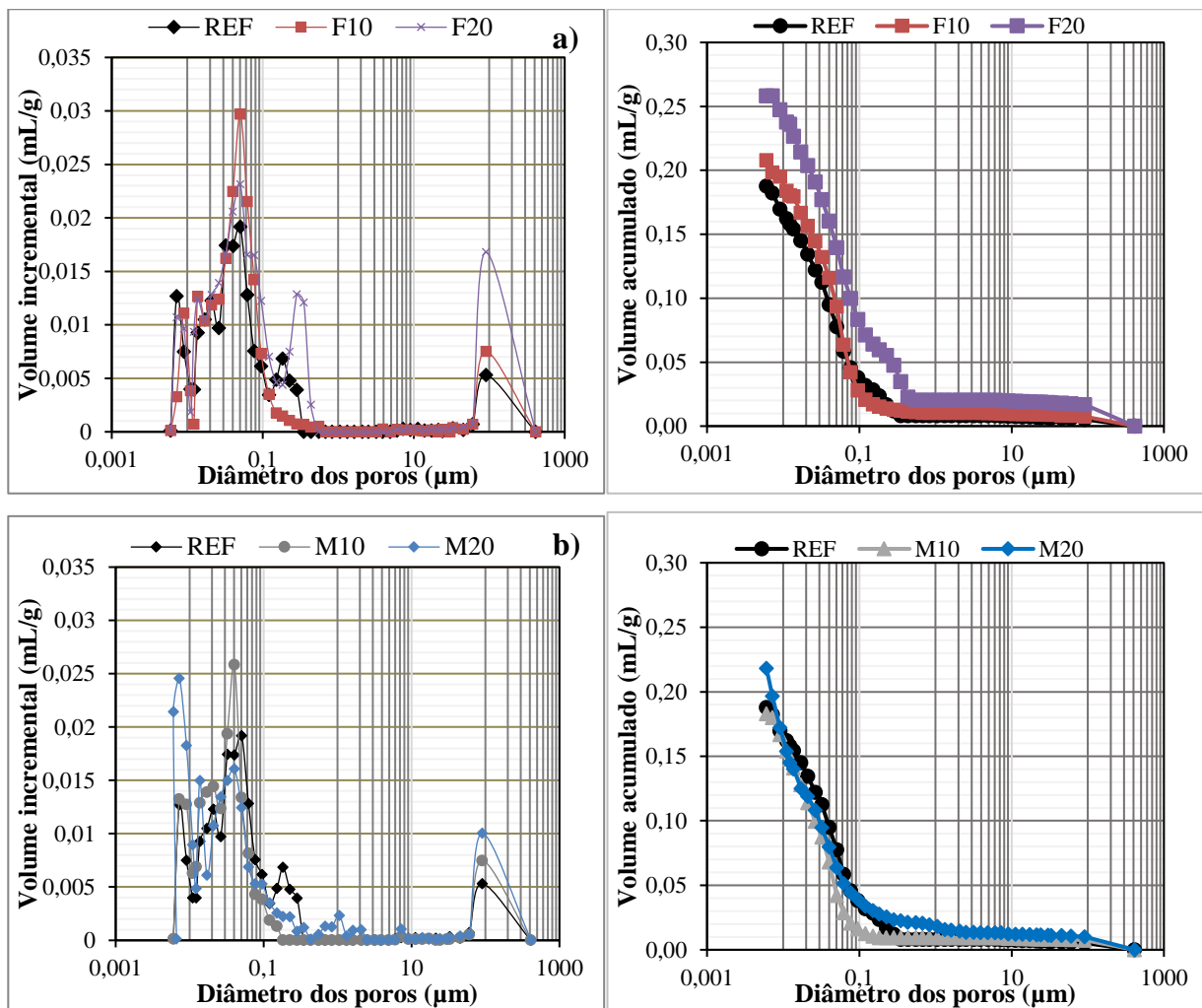


Figura 39 - Relação entre o volume acumulado e o diâmetro dos poros

Nota-se que o valor máximo de volume intrudido nos poros ocorreu na faixa correspondente aos mesoporos (0,002 a 0,05 μm), indicando uma estrutura porosa refinada nos concretos. Também é possível observar nos traços a existência de poros com dimensões acima de 50 μm que, segundo Mehta e Monteiro (2014), apresentam formato esférico e correspondem aos

vazios de ar incorporado. O REF é o traço com menor quantidade desses macroporos enquanto o F20 tem a maior quantidade.

Na Figura 40 é apresentada a relação do diâmetro dos poros com o incremento de volume e com o volume acumulado, considerando o tipo de adição e o teor de substituição de cimento Portland.



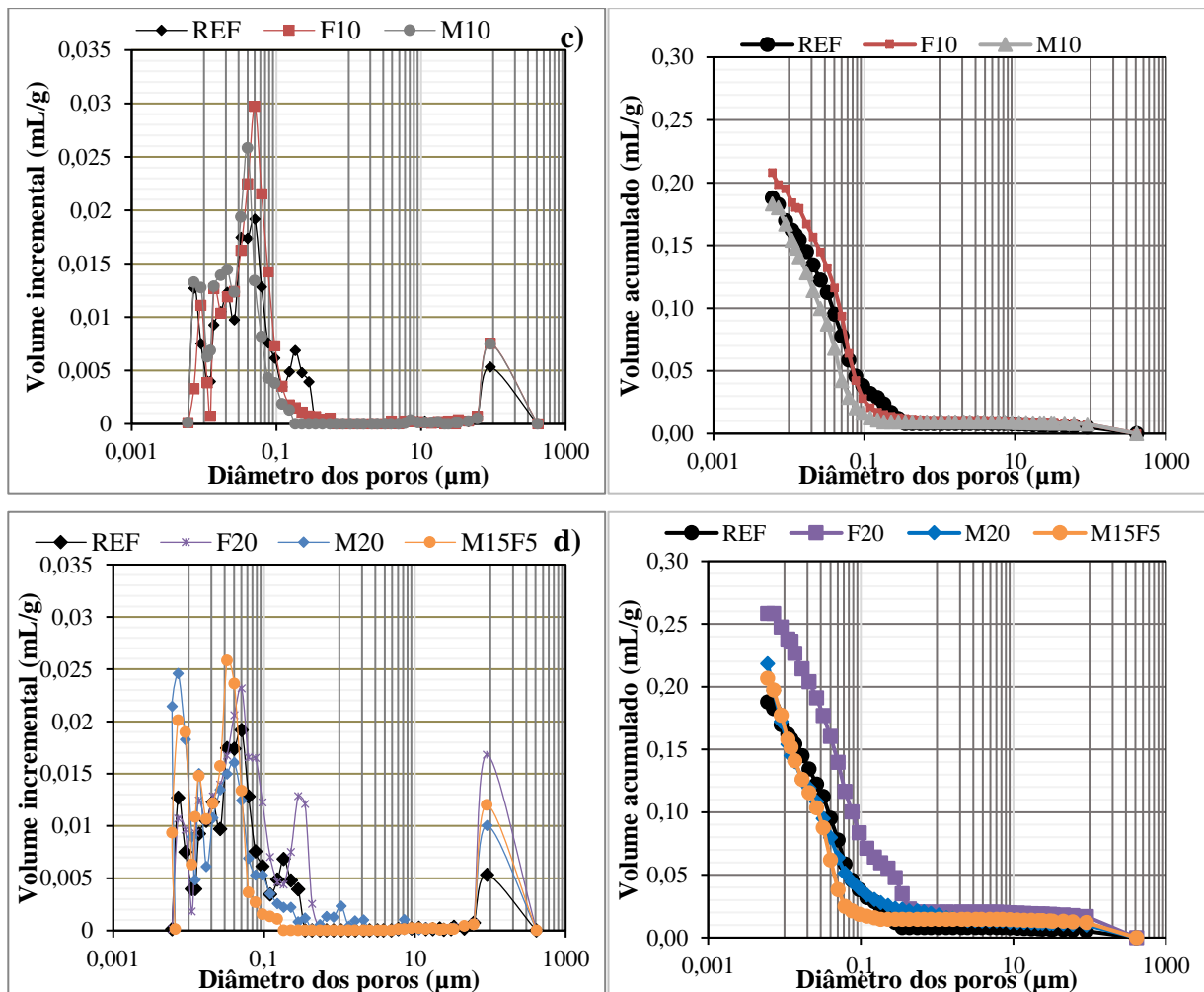


Figura 40 - Relação do incremento de volume e do volume acumulado com o diâmetro dos poros, em relação ao REF (a) Traços com fíler calcário; (b) Traços com metacaulim; (c) Traços com 10% de substituição de cimento Portland; (d) Traços com 20% de substituição de cimento Portland.

Não houve grande variação na quantidade de poros de diâmetro 0,01 μm nos traços com fíler calcário. Já na região próxima ao diâmetro de 0,05 μm, percebe-se que a utilização da adição mineral provocou um aumento no volume de poros, sendo a quantidade do F10 maior que a do F20, ou seja, houve um refinamento caracterizado pelo aumento no volume de poros de menor dimensão. Nota-se também que o traço F20 apresentou um pico significativo na faixa dos poros capilares, além da maior quantidade de mesoporos e maior quantidade de volume acumulado, o que indica a maior suscetibilidade desse traço ao ingresso de agentes deletérios.

O M20 foi o traço que apresentou o maior volume de poros de pequeno diâmetro. A quantidade desses poros aumenta com a formação dos hidratos, o que mostra a ação pozolânica. O M10 também apresenta uma distribuição de volume de poros em uma faixa de menor dimensão que a do REF.

O comportamento dos traços que tem 10% de substituição é muito semelhante entre si. Percebe-se que no traço M10 o pico de maior volume de poros tem um valor um pouco menor que o do F10, indicando que para esse percentual de substituição o metacaulim promoveu um melhor refinamento na mistura do que o fíler calcário.

Nos traços que contém metacaulim no teor de 20% de substituição também é observada uma estrutura porosa composta de um maior volume de mesoporos, sendo a ação da adição isolada (M20) mais pronunciada que em combinação com o fíler calcário (M15F5).

Percebe-se que os traços que contém fíler calcário apresentam uma distribuição de poros mais elevada que o concreto de referência, sendo a diferença do F20 mais pronunciada. Os traços apresentam uma grande parcela de poros conectados com diâmetro da ordem de 0,1 μm , pois observa-se um crescimento acentuado e contínuo na inclinação da curva de intrusão. Os maiores valores de volume intrudido acumulados encontrados foram 0,19 mL/g para o REF, 0,21 mL/g para o F10, 0,18 mL/g para o M10, 0,26 mL/g para o F20, 0,22 mL/g para o M20 e 0,21 mL/g para o M15F5.

Na Tabela 23 têm-se um resumo de outros parâmetros obtidos pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Tabela 23 - Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio dos concretos

	REF	F10	M10	F20	M20	M15F5
Volume total intrudido (mL/g)	0,188	0,208	0,183	0,258	0,218	0,207
Área total de poros (m²/g)	29,671	30,675	34,276	30,444	50,711	45,139
Diâmetro médio de poros "4V/A" (μm)	0,026	0,027	0,021	0,034	0,017	0,018
Densidade aparente a 0,0030 MPa (g/mL)	1,571	1,516	1,545	1,415	1,463	1,488
Porosidade (%)	29,51	31,53	28,28	36,56	31,93	30,74
Comprimento característico (μm)	33,898	46,478	35,214	35,183	36,878	21,552
Permeabilidade (mdarcy)	90,117	131,626	114,511	160,277	117,718	54,977
Tortuosidade	4,3706	4,1700	4,4457	5,3564	4,9443	7,9360

Os traços M20 e M15F5 apresentaram os maiores valores de área total de poros, provavelmente devido à formação de maior quantidade de C-S-H pela ação pozolânica. O traço F20 teve o maior volume de mercúrio intrudido, enquanto o M10 teve o menor. Os valores de porosidade total foram bem próximos, apenas com o F20 apresentando uma diferença maior. Em relação a permeabilidade, o valor obtido para o M15F5 foi bem inferior ao dos demais e o F20 mais uma vez teve o maior valor observado. Em relação a tortuosidade, o M15F5 teve o maior valor dentre os traços, que de um modo geral apresentaram valores próximos.

4.6.2 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

O ensaio de TG/DTG auxilia na análise quantitativa do teor dos compostos hidratados formados e dos teores de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio remanescentes na pasta de cimento hidratada. As curvas obtidas pela análise térmica (TG) estão apresentadas na Figura 41.

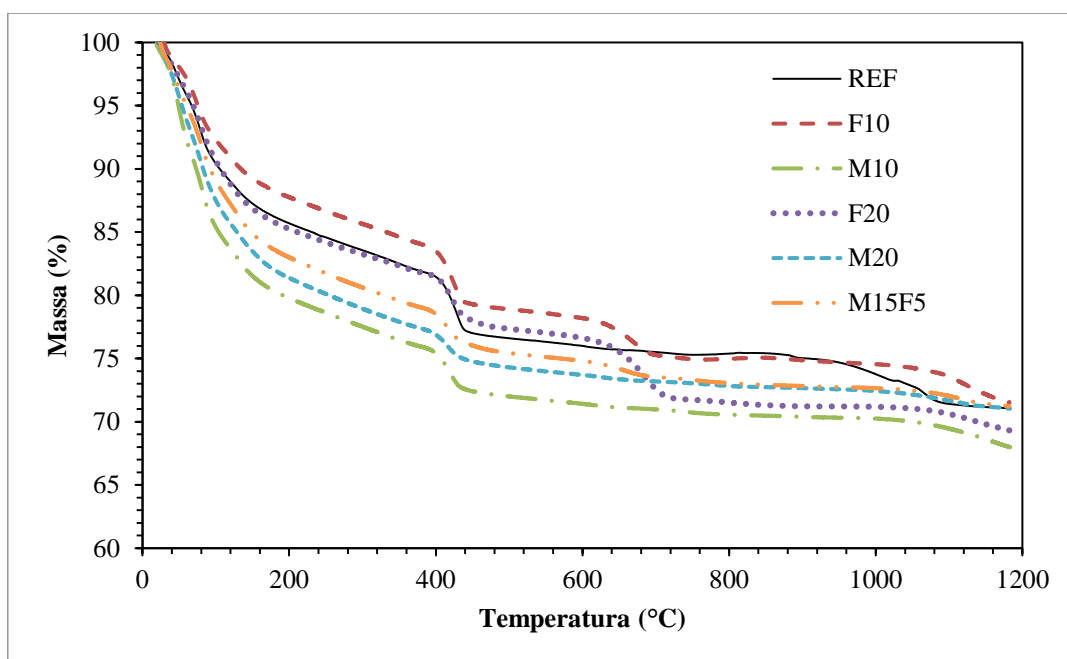


Figura 41 - Análise térmica (TG) dos concretos

Pode-se notar que o REF, F10, M20 e M15F5 tiveram um comportamento de perda de massa diferente ao longo da rampa de temperatura aplicada, mas ao final do ensaio atingiram quase o mesmo valor, sendo essas perdas de 28,9, 28,5, 29 e 28,8%, respectivamente. Já o F20 teve 30,7% de perda e o M10 32%, maior valor dentre os traços.

Pelo gráfico apresentado na Figura 42, nota-se a diferença entre os picos apresentados pelas amostras dos diferentes concretos, considerando as faixas de temperaturas características da decomposição de cada produto de hidratação do cimento. Considerando que a intensidade do pico corresponde a quantidade de produto no traço, o primeiro pico, cuja faixa de temperatura é de cerca 35 a 385 °C, mostra que o traço M10 tem a maior quantidade de C-S-H, seguido do M20 e do M15F5. Essa informação é coerente já que os três traços possuem adição de metacaulim e a reação pozolânica é responsável pela formação de C-S-H secundário, ou seja, esses traços têm mais desse hidrato em relação ao REF. Outra observação é que os traços com fíler calcário (F10 e F20) possuem picos menos intensos que o REF, o que também está de acordo com a composição de ambos, já que houve a adição do fíler calcário em substituição ao cimento Portland.

A segunda faixa de temperatura, que vai de uma média 385 a 485 °C, corresponde a desidroxilação da amostra, ou seja, é possível avaliar a influência das adições minerais na quantidade de água não evaporável relacionada ao hidróxido de cálcio. Ao se observar o segundo pico das curvas de DTG da Figura 42, nota-se que ele é mais intenso no REF, seguido do F10 e F20. Esse resultado é esperado uma vez que com menos cimento Portland disponível conseqüentemente serão formados menos produtos de hidratação, nesse caso o CH. Em relação aos traços que contêm metacaulim, o maior pico é observado no M10, seguido do M15F5 e por último o M20. Essa informação também está coerente com a quantidade de metacaulim adicionado às misturas (10, 15 e 20%, respectivamente) e ao fato da reação pozolânica desse material consumir o hidróxido de cálcio disponível.

Finalmente, a terceira faixa de temperatura, de uma média de 485 a 1000 °C, corresponde a descarbonatação da amostra e está relacionada ao teor de carbonato de cálcio da pasta. Os traços REF, M10 e M20 apresentam comportamento semelhante, uma vez que nos três não há adição de carbonato de cálcio além do que foi previamente adicionado ao cimento no processo de fabricação, uma vez que o mesmo é composto com fíler. Os traços que têm adição de fíler calcário, por sua vez, apresentam picos pronunciados de acordo com o teor que foi adicionado, sendo o F20, que contém 20% de fíler, o maior, seguido do F10 (10% de fíler) e do M15F5 (5% de fíler).

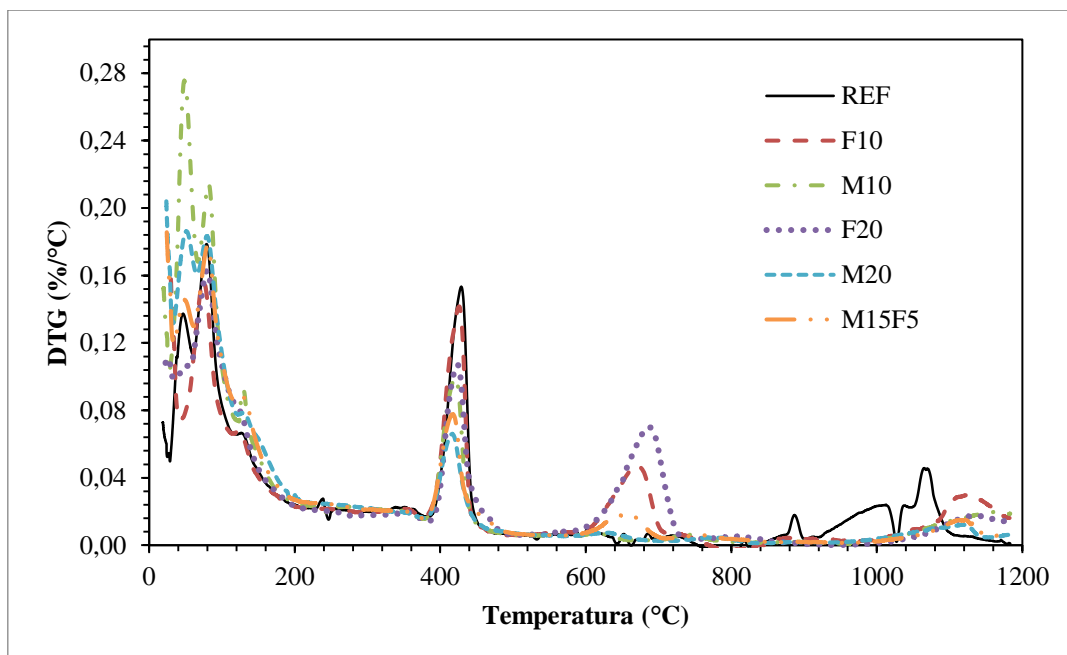


Figura 42 - Análise térmica diferencial (DTG) dos concretos

Utilizado a metodologia proposta por Hoppe Filho et al. (2017), foi possível calcular o percentual de cada produto de hidratação formado, de acordo com a perda de massa observada na faixa de temperatura característica de decomposição dos hidratos. Com isso, houve uma confirmação das informações deduzidas nos gráficos do TG/DTG (Figura 42).

Na Tabela 24 estão os valores percentuais dos principais compostos hidratados do cimento, para cada concreto estudado. Como existe uma diferença das massas residuais das amostras após o ensaio, não é possível realizar uma comparação direta dos resultados. Para isso, torna-se necessário uma correção dessas perdas de massa para a mesma base de não voláteis, de forma a tornar os resultados comparáveis. Foi realizada uma normalização para 100%, o que promove um aumento nas perdas de massa relativas a cada faixa de temperatura considerada. Na Tabela 25 podem ser visualizados os resultados corrigidos de todas as amostras, bem como seus respectivos fatores de normalização.

Tabela 24 - Porcentagem dos principais produtos de hidratação formados em cada traço, de acordo com Hoppe Filho et al. (2017)

Produto de hidratação	Faixa de temperatura (°C)	Percentual por traço (%)					
		REF	F10	M10	F20	M20	M15F5
C-S-H	35 a 385	17,3	15,4	22,6	17,2	21,3	19,8
Ca(OH) ₂	385 a 485	25,7	24,4	20,3	21,6	15,3	17,7
CaCO ₃	485 a 1000	8,7	12,7	5,8	18,4	6,0	8,7

Tabela 25 - Porcentagem dos principais produtos de hidratação formados em cada traço, corrigidos para a mesma base de não voláteis, de acordo com Hoppe Filho et al. (2017)

	REF	F10	M10	F20	M20	M15F5
Massa residual da amostra (%)	71,1	71,5	68	69,3	71	71,2
Fator de normalização*	1,407	1,398	1,471	1,443	1,408	1,404
C-S-H	24,3	21,5	33,3	24,8	29,9	27,8
Ca(OH)₂	36,2	34,1	29,9	31,1	21,5	24,9
CaCO₃	12,2	17,8	8,6	26,5	8,5	12,2

*Fator de normalização = 100/massa residual da amostra (%)

Os traços que contém metacaulim possuem um maior percentual de C-S-H em relação ao REF, o que era esperado devido à reação pozolânica. O F10 tem menos C-S-H que o concreto de referência, uma vez que possui menos cimento na mistura. Já o F20 tem um percentual praticamente igual ao REF, mesmo com 20% a menos de cimento.

Quando comparados com os resultados de resistência à compressão, existem algumas divergências nesses valores. O M10 possui 37% a mais de C-S-H que o REF, sendo o traço com maior teor desse produto, seguido do M20 (que tem 23,2% de C-S-H a mais) e do M15F5 (com 14,2% mais C-S-H). Segundo Li e Ding (2003), o desempenho ótimo do concreto é obtido com a utilização de um teor de 10% de substituição de metacaulim por cimento Portland, o que justificaria o valor encontrado através do ensaio de TG. Porém, a resistência a compressão encontrada experimentalmente para ambos os traços M20 e M15F5 é superior à do M10. Em relação aos traços que contém fíler calcário, o F10 apresenta 11,6% a menos de C-S-H que o REF e tem uma resistência mecânica 7,2% menor. Já o F20, que foi o traço de pior desempenho mecânico, com uma perda de 15,4% nessa propriedade, apresenta um teor de silicato de cálcio hidratado ligeiramente maior que o REF, de 2,2%.

Em relação ao teor remanescente de hidróxido de cálcio nas amostras, os valores calculados estão em concordância com o esperado. O REF é o traço com maior teor, já que possui 100% de cimento Portland em sua composição, ou seja, produz o máximo desse hidrato. A medida que o cimento é retirado e substituído por fíler calcário, há menos clínquer disponível na mistura para as reações de hidratação, então o teor de CH diminui nos teores de 5,8% para o F10 e 14% para o F20. Nos traços que contém metacaulim é esperada uma diminuição ainda maior, já que a reação pozolânica consome o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento para formação do gel de C-S-H. O M10 apresentou 17,3% menos CH em relação ao REF, no M15F5 essa diminuição foi de 31,3% e no M20 de 40,5%. Assim, nota-se que quanto maior o teor de pozolana na composição cimentícia, menor o percentual de Ca(OH)₂ restante.

Considerando a quantidade de carbonato de cálcio da amostra, pelo gráfico da Figura 42, os traços REF, M10 e M20 apresentam picos praticamente iguais, o que leva a consideração que a quantidade de CaCO_3 é a mesma para os três. Porém, com os valores calculados, percebe-se que o M10 tem 29,7% a menos de carbonato de cálcio que o REF e o M20 30,5%, o que é coerente visto que esses concretos possuem menos cimento Portland, que é a fonte calcária dessas misturas. Quando se observa os traços onde houve a adição de fíler calcário, percebe-se que o F10 teve um aumento de 45,9% na quantidade de CaCO_3 e o F20 de 116,9%. O M15F5 por sua vez, apresentou o mesmo teor que o REF, o que mostra que os 5% de fíler calcário que foram adicionados compensaram a retirada de 20% de cimento Portland.

Como descrito no item 2.3.2, a metodologia proposta por Alonso-Domínguez et al. (2017) permite estimar a quantidade teórica do C-S-H primário e secundário. Na Tabela 26 estão os valores calculados, considerando o percentual dos produtos de hidratação formados em cada traço corrigidos para a mesma base de não voláteis

Tabela 26 - Valores percentuais de C-S-H primário e secundário, de acordo com Alonso-Domínguez (2017)

	REF	F10	M10	F20	M20	M15F5
CHcarbonatado (%)	2,2	3,2	1,6	4,8	1,5	2,2
CHequivalente (%)	11,0	11,5	8,8	12,4	6,8	8,3
C-S-H primário (%)	24,3	25,4	19,5	27,3	15,0	18,2
C-S-H secundário (%)	0,0	-3,9	13,8	-2,5	15,0	9,5

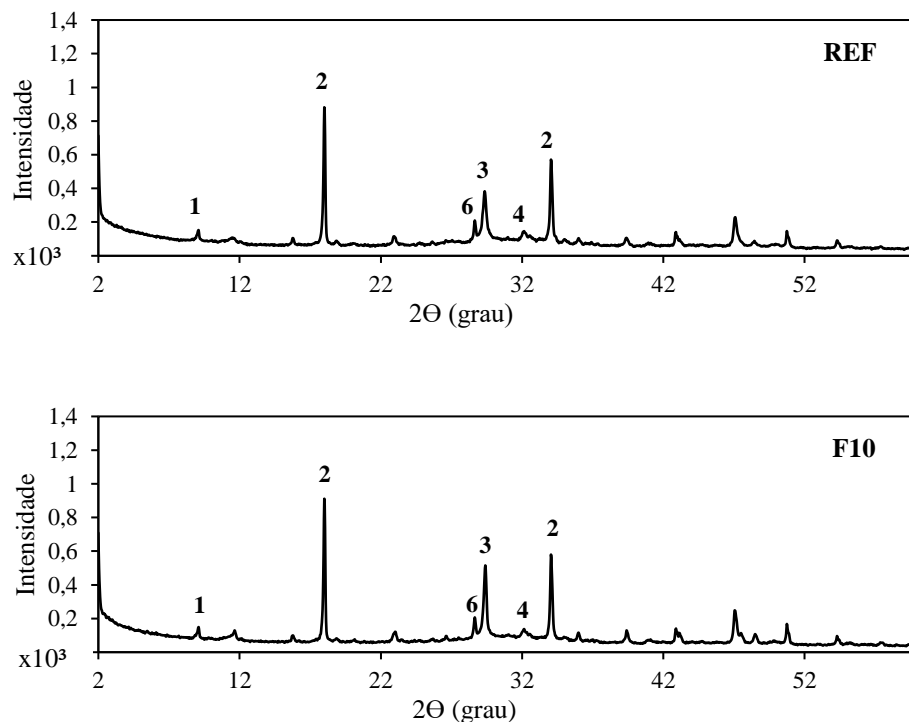
O REF, que não possui incorporação de nenhuma adição mineral, apresentou valores apenas para o C-S-H primário. Como já mencionado, o M10 foi o traço com maior percentual (33,3%) de C-S-H formado, sendo 19,5% correspondente ao C-S-H primário e 13,8% ao secundário. O M20 tem menor percentual (29,9%) de C-S-H total, porém mais C-S-H secundário (15%). Como ele tem menos cimento Portland em sua composição, existe uma indicação que a reação pozolânica foi mais eficiente nesse traço, já que foi formado mais C-S-H secundário e a quantidade de C-S-H total foi apenas 10,2% menor. Já o M15F5 formou mais C-S-H primário que o M20, mesmo os dois traços tendo 20% a menos de cimento. Provavelmente a quantidade de fíler calcário adicionada nesse traço serviu como ponto de nucleação, potencializando a reação de hidratação do clínquer Portland.

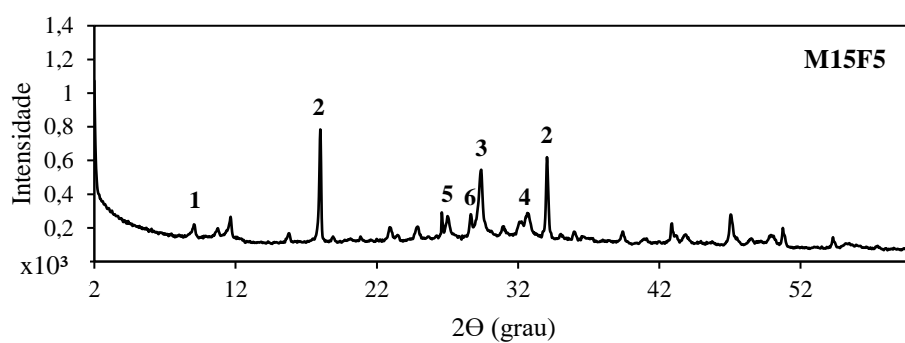
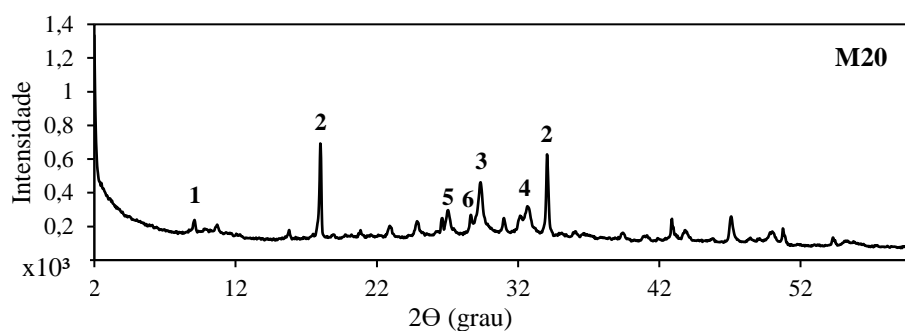
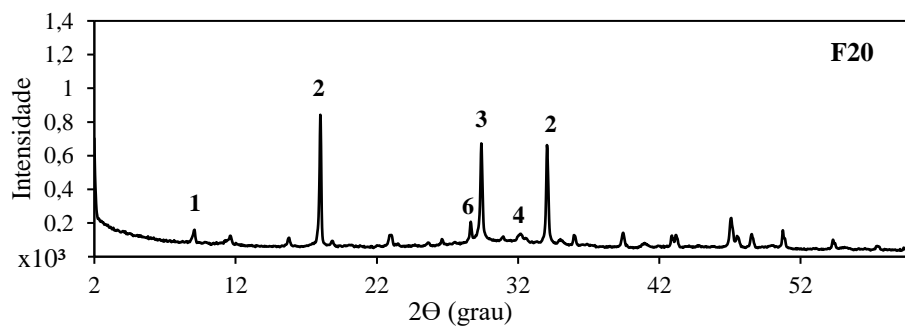
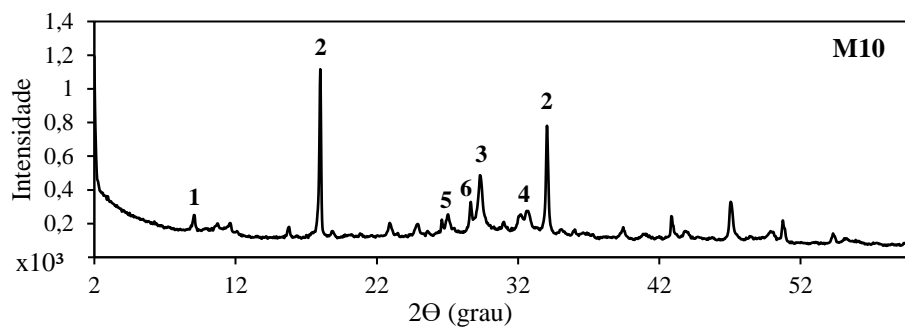
Nos traços com fíler calcário os valores obtidos para o C-S-H secundário foram negativos. Como os valores de Ldh, Ldx e Ldc foram calculados pela metodologia de Hoppe Filho et al. (2017), provavelmente houve um erro ao aplica-los na formulação proposta por Alonso-

Domínguez et al. (2017). A utilização de métodos de cálculo distintos pode gerar valores de hidratação total ou conteúdo dos hidratos diferentes para uma mesma mistura (GONÇALVES et al., 2006). Como se trata de uma adição mineral inerte, não é esperado que aja formação de C-S-H secundário. Tanto o F10 quanto o F20 apresentaram um teor maior de C-S-H primário em relação ao REF, esses de 4,5 e 12,3% de aumento, respectivamente. O efeito fíler, provocado pela finura das partículas, pode incrementar a reatividade do ligante, aumentando a superfície específica disponível para as reações de hidratação, o que formaria mais C-S-H.

4.6.3 Difração de raios-X

O ensaio de difração de raios-X foi realizado nas pastas representativas dos concretos estudados, na idade de 28 dias, afim de se analisar qualitativamente as fases cristalinas das misturas. Na Figura 43 são apresentados os difratogramas obtidos, com a identificação dos picos correspondentes as principais fases encontradas: Etringita, portlandita, calcita, alita, belita, quartzo e gipsita.





1. Etringita	3. Calcita	5. Quartzo
2. Portlandita	4. Alita e Belita	6. Gipsita

Figura 43 - Difratoigramas de raios-X das pastas correspondentes aos concretos estudados

As fases identificadas correspondem as fases cristalinas já presentes nas adições minerais, além dos compostos hidratados formados após a hidratação do cimento Portland. Observa-se pelos gráficos da Figura 43 que em nenhum dos traços houve muita variação no pico 1, correspondente a etringita.

Em relação à quantidade de portlandita, representada pelo pico 2, o traço M20 apresenta o pico de menor intensidade, o que é esperado devido ao consumo desse composto pela reação pozolânica. O menor teor de CH do M20 também foi observado nos cálculos realizados com base nos resultados do ensaio de TG/DTG. O M15F5, também em concordância com o ensaio de TG/DTG, apresentou o segundo menor pico em relação ao REF. Já o M10, mesmo contendo um teor de 10% de metacaulim, apresentou o maior pico dentre os concretos. No REF e em ambos os traços com fíler calcário a intensidade do pico de portlandita foi bastante semelhante. Vale salientar que a identificação de portlandita nos difratogramas indica a viabilidade de uma continuidade da reação pozolânica em idades mais avançadas, uma vez que essa reação foi interrompida nas pastas, já que a hidratação foi paralisada aos 28 dias.

A substituição de cimento Portland por fíler calcário manteve as pastas com praticamente o mesmo padrão difratométrico, exceto pelo pico 3, característico da calcita. Assim como observado na análise termogravimétrica, os traços que continham apenas metacaulim (M10 e M20) apresentaram picos de menor intensidade de CaCO_3 , já que foi retirado cimento Portland e esse era a única fonte de calcário da mistura. O F20, como esperado, foi o traço com pico de maior intensidade, seguido do F10 e M15F5, mesmo comportamento observado no TG/DTG. Os traços com adição de fíler, mesmo com menor quantidade de cimento em sua composição, tiveram o acréscimo de calcário proveniente da adição mineral. O REF, por sua vez, apresentou pico de intensidade baixa, semelhante ao observado nos traços com metacaulim.

Os picos de alita e belita só foram observados nas pastas que continham metacaulim na composição, em intensidades similares. Isso pode indicar que a utilização de uma adição mineral pozolânica influencia na velocidade de reação dos silicatos, em especial da belita que reage em idades mais avançadas. Também demonstra que nas pastas com fíler calcário o efeito fíler promoveu pontos de nucleação que aceleraram as reações de hidratação dos silicatos, não sendo mais possível identifica-los nas pastas aos 28 dias de idade.

Nos traços em que o metacaulim foi utilizado, pode-se observar picos de quartzo, proveniente da composição mineralógica da adição mineral. Já o pico 6, correspondente a quantidade de

gipsita nas misturas, aparece em todos os traços, indicando que não houve um consumo total de cal para formação de compostos hidratados e carbonatação da amostra.

4.7 RELAÇÃO ENTRE A CARBONATAÇÃO E OS DEMAIS ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios realizados nos traços de concreto autoadensável produzidos no presente trabalho tiveram o intuito de auxiliar uma melhor compreensão do comportamento do avanço da frente de carbonatação no CAA, sendo essas correlações avaliadas nos estados fresco e endurecido e na esfera microestrutural. Na Tabela 27 está apresentado um resumo dos principais resultados obtidos para uma melhor visualização do comportamento global dos concretos, que será relacionado com a carbonatação acelerada nos itens seguintes.

Tabela 27 - Síntese dos resultados obtidos nos ensaios do CAA nos estados fresco e endurecido

	REF	F10	M10	F20	M20	M15F5
Consumo de cimento (kg/m³)	475	428	428	380	380	380
Massa específica (kg/m³)	2350	2260	2310	2310	2320	2300
Teor de superplastificante (%)	0,35	0,35	0,70	0,45	1,10	0,85
t₅₀₀ (s)	1,47	1,05	2,38	1,25	2,15	1,86
Espalhamento (mm)	683	660	665	685	675	690
Funil V (s)	2,95	3,29	2,76	2,69	3,16	2,26
Caixa L	0,82	0,87	0,85	0,90	0,90	0,87
Tensão de escoamento teórica (Pa)	238,6	273,3	270,1	232,3	252,3	221,9
Viscosidade plástica teórica (Pa.s)	50,8	33,6	78,6	42,7	72,6	63,8
Resistência à compressão simples (MPa)	41,0	38,0	49,0	34,7	61,8	53,0
Resistência à tração (MPa)	4,1	3,8	4,1	3,3	4,7	3,9
Módulo de elasticidade (GPa)	31,9	29,1	31,6	29,7	36,5	33,7
Absorção capilar (g/cm³)	1,23	1,22	0,62	1,56	0,88	0,99
Sorvidade (g/cm².minuto^{0,5})	0,018	0,019	0,008	0,024	0,013	0,015
Profundidade de carbonatação (mm) - 70 dias - Prismáticos	3,33	4,20	1,72	4,37	1,84	3,47
Profundidade de carbonatação (mm) - 70 dias - Cilíndricos	3,60	5,81	4,81	6,29	4,26	4,55
Coefficiente de carbonatação (mm/semana^{0,5}) - 70 dias - Prismáticos	1,05	1,33	0,54	1,38	0,58	1,10
Coefficiente de carbonatação (mm/semana^{0,5}) - 70 dias - Cilíndricos	1,14	1,84	1,52	1,99	1,35	1,44
Porosidade (%)	29,51	31,53	28,28	36,56	31,93	30,74

Volume total de mercúrio intrudido (mL/g)	0,188	0,208	0,183	0,258	0,218	0,207
Quantidade total de C-S-H calculada	24,3	21,5	33,3	24,8	29,9	27,8
Quantidade total de Ca(OH)₂ calculada	36,2	34,1	29,9	31,1	21,5	24,9

4.7.1 Relação entre carbonatação e as propriedades mecânicas

Nas Figuras 44, 45 e 46 pode ser vista a relação entre o coeficiente de carbonatação e a resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, respectivamente. Em geral observa-se um comportamento inversamente proporcional, ou seja, quanto melhor o desempenho mecânico dos concretos, menor o coeficiente de carbonatação.

O traço M20 apresentou o melhor desempenho mecânico em todas as propriedades avaliadas e um desempenho frente a ação da carbonatação muito semelhante ao M10, que foi o traço com a menor superfície carbonatada, considerando os corpos de prova prismáticos. Já o F20 foi o traço com pior desempenho mecânico e menor durabilidade frente à carbonatação. O efeito fíler não foi capaz de compensar a retirada de cimento Portland das misturas, provavelmente devido à alta relação a/c adotada. Já a reação pozolânica do metacaulim formou uma quantidade extra de C-S-H, produto de hidratação que mais contribui com a resistência do material, além de promover o refinamento dos poros, o que melhorou o desempenho mecânico dos traços que continham essa adição.

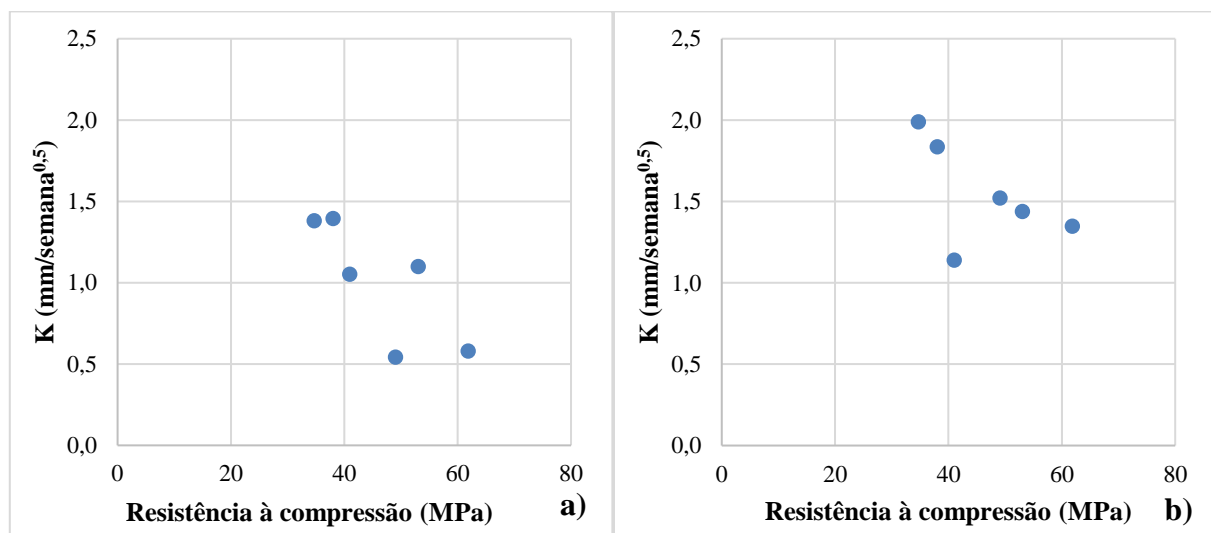


Figura 44 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a resistência à compressão. a) Corpos de prova prismáticos; b) Corpos de prova cilíndricos

Analisando os pontos dos gráficos da Figura 44, nota-se que a relação entre a resistência à compressão e o avanço da profundidade de carbonatação apresenta uma melhor tendência de

comportamento em função da distribuição dos pontos com a utilização dos corpos de prova prismáticos, em comparação aos corpos de prova cilíndricos.

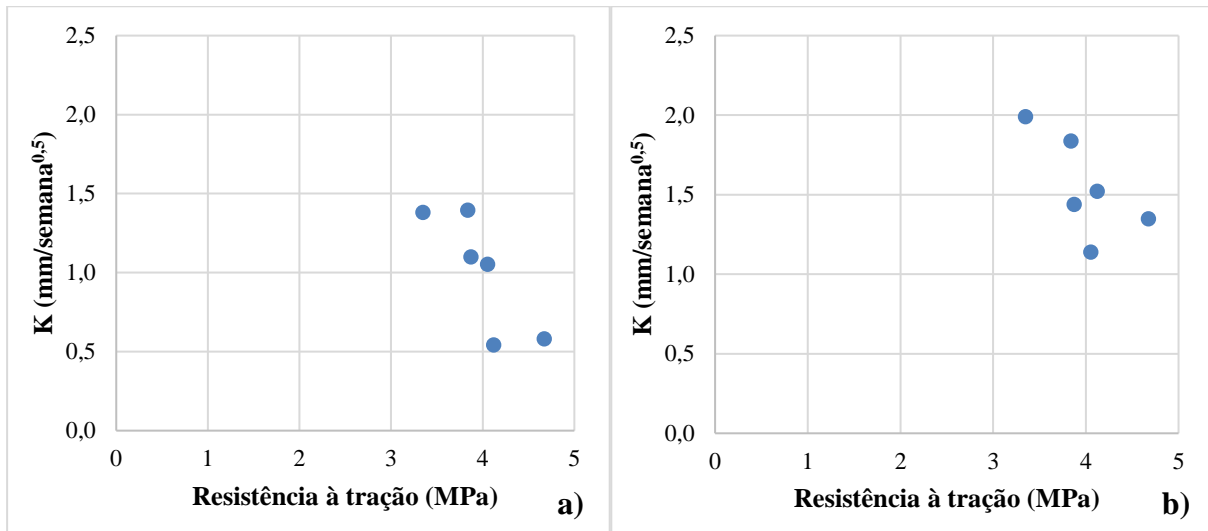


Figura 45 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a resistência à tração. a) Corpos de prova prismáticos; b) Corpos de prova cilíndricos

Uma melhor tendência de dispersão dos pontos com a utilização dos corpos de prova prismáticos também ocorreu com os valores de resistência à tração, Figura 45, porém com uma menor diferença.

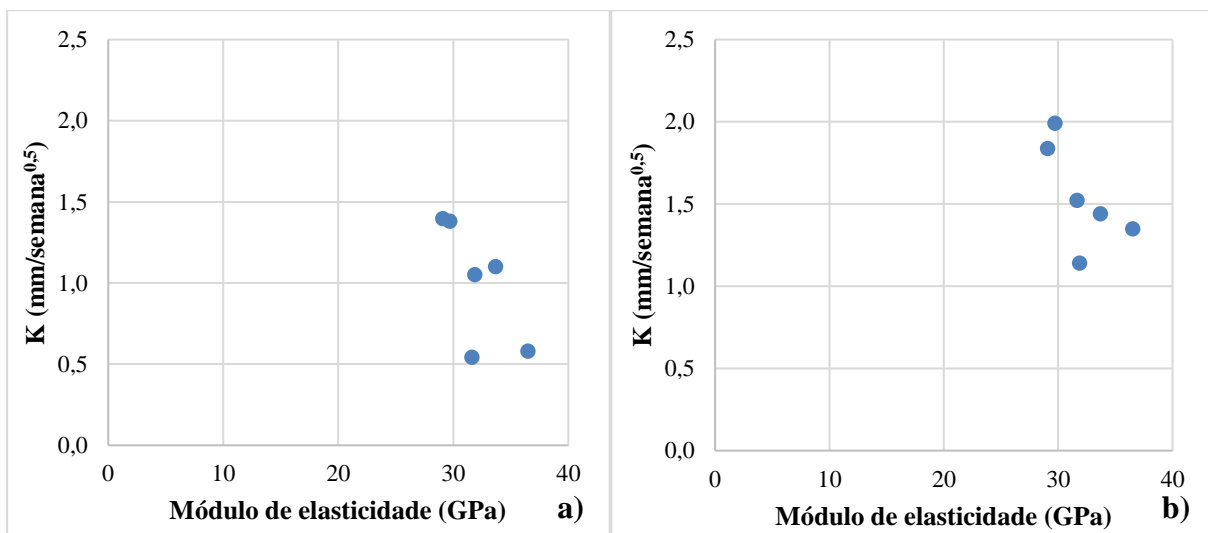


Figura 46 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e o módulo de elasticidade. a) Corpos de prova prismáticos; b) Corpos de prova cilíndricos

O módulo de elasticidade foi a propriedade em que os resultados de ambos os tipos de corpos de prova ficaram mais próximos, como apresentado na Figura 46.

Vale salientar que foram utilizados poucos pontos para o ajuste, mas que a tendência de uma maior durabilidade das estruturas com melhores propriedades mecânicas é um consenso no meio científico.

O desempenho mecânico dos concretos está diretamente ligado as propriedades que regem os mecanismos de transporte e à microestrutura. Uma matriz mais densa possui maiores resistências na zona de transição e uma estrutura da rede porosa mais tortuosa e menos interconectada, resultando em benefícios significativos na durabilidade e no comportamento mecânico (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

4.7.3 Relação entre carbonatação e a absorção de água por capilaridade

A relação entre o coeficiente de carbonatação dos concretos e a absorção capilar, através do coeficiente de sorvidade, é apresentada na Figura 47 (a) para os corpos de prova prismáticos e na Figura 47 (b) para os corpos de prova cilíndricos.

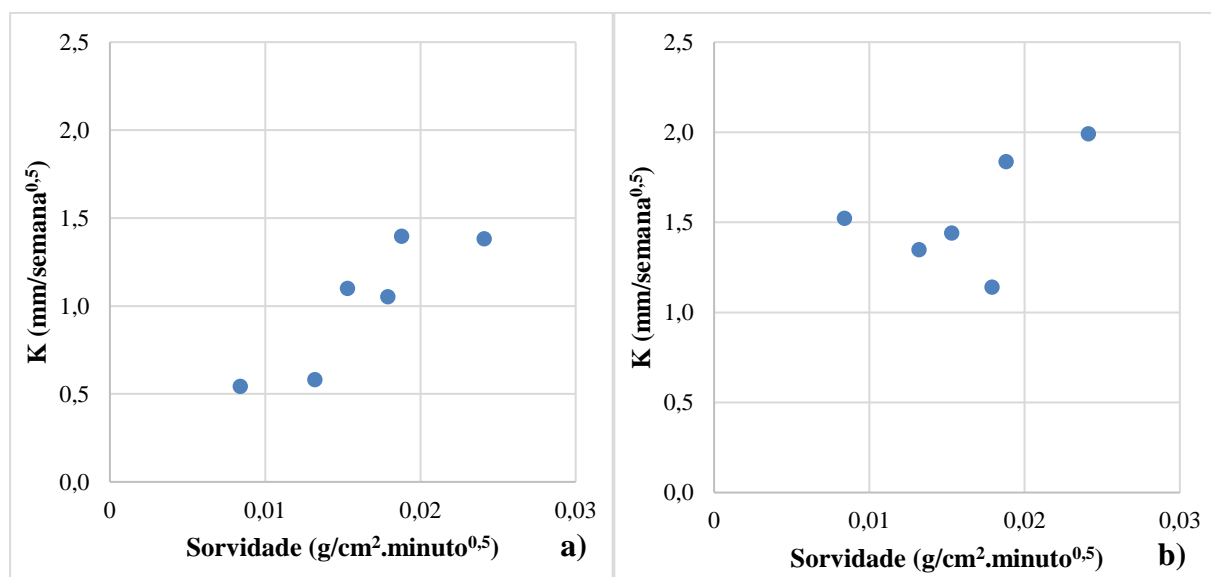


Figura 47 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a sorvidade. a) Corpos de prova prismáticos; b) Corpos de prova cilíndricos

Novamente a tendência de dispersão dos pontos foi mais eficiente com os dados obtidos no ensaio dos corpos de prova prismáticos, porém em ambos os gráficos se nota a tendência de um menor coeficiente de carbonatação à medida que a sorvidade dos concretos também diminui.

O menor coeficiente de sorvidade foi o do M10, enquanto o maior foi o do F20, mesmo comportamento observado no ensaio de carbonatação acelerada dos corpos de prova prismáticos. Nos cilíndricos o F20 também teve pior desempenho de carbonatação e o REF foi o melhor traço, embora tenha apresentado a segunda maior absorção de água por capilaridade

entre os concretos. É necessário ressaltar a importância da utilização da ISO 1920-12:2015, já que fica clara a disparidade dos resultados sem uma metodologia de ensaio padronizada.

4.7.4 Relação entre a carbonatação e a porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosidade e os mecanismos de ingresso de agentes agressivos estão diretamente ligados as propriedades de durabilidade dos concretos, influenciando na capacidade do material de suportar o efeito destrutivo desses agentes. É necessário, assim, observar não só a porosidade total, mas a distribuição da rede de poros, sua tortuosidade e também a permeabilidade do meio, que ajudam a indicar o grau de facilidade do transporte dentro do concreto.

Mesmo com as diferenças de comportamento dos traços em relação a carbonatação, dificilmente haveria risco da frente carbonatada atingir as armaduras de estruturas confeccionadas com algum dos traços estudados, segundo as extrapolações realizadas com base no cobrimento nominal de 40 mm recomendado pela NBR 6118:2014. Ao se analisar os resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio nota-se que o valor máximo de volume intrudido nos poros ocorreu na faixa correspondente aos mesoporos (0,002 a 0,05 μm), indicando uma estrutura porosa refinada que corrobora a dificuldade de difusão do CO_2 .

Como o CAA é dosado com uma maior quantidade de finos para garantir suas propriedades de autoadensabilidade, além de eliminar o processo descontínuo de vibração, resulta em um material de permeabilidade consistentemente baixa e uniforme, oferecendo menos pontos fracos para ações deletérias do ambiente e, portanto, melhores indicadores de durabilidade (EFNARC, 2005).

4.7.5 Relação entre carbonatação e a termogravimetria (TG/DTG)

O ensaio de termogravimetria foi utilizado para calcular o percentual dos principais produtos de hidratação do cimento, através das perdas de massa nas temperaturas características de decomposição desses hidratos. O principal problema causado pela carbonatação é a diminuição da alcalinidade do concreto, através do consumo de hidróxido de cálcio na formação do carbonato de cálcio. Esse consumo também ocorre devido a reação pozolânica. Assim, teoricamente, os traços com menos quantidade de cimento Portland teriam um pior desempenho frente à carbonatação pela diminuição da quantidade de CH formado e nos traços com metacaulim esse prejuízo se daria pela atividade pozolânica desse material.

Ao analisar os resultados de carbonatação obtidos nos corpos de prova recomendados pela ISO 1920-12:2015, percebe-se que os traços com fíler calcário realmente apresentaram um pior desempenho em relação ao concreto de referência e uma menor quantidade de CH formado. Já o M15F5, mesmo com cerca de 31% menos CH que o REF, atingiu um resultado de carbonatação muito semelhante.

Nos traços com metacaulim também houve uma redução na quantidade de hidróxido de cálcio, porém tanto o M10 como o M20 apresentaram uma melhor resistência ao avanço da frente de carbonatação em relação ao REF. Ao mesmo tempo que a reação pozolânica consome o hidróxido de cálcio, e assim diminui a quantidade do produto de hidratação responsável por garantir a alcalinidade da matriz cimentícia, a formação de C-S-H secundário promove uma diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada. Dessa forma, mesmo com a menor quantidade de CH, a quantidade total de C-S-H calculada para ambos os traços foi maior que a do REF, o que mostra que o refinamento dos poros foi efetivo em impedir a difusão do CO₂, mesmo em um ambiente menos alcalino.

4.8 RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

Com a análise dos resultados obtidos após o desenvolvimento do programa experimental dessa pesquisa, é apresentada uma síntese das principais considerações:

- Através da análise dos resultados dos ensaios dos concretos no estado fresco pode-se afirmar que os concretos são autoadensáveis, uma vez que se enquadram em alguma das classes definidas pela NBR 15823-1:2017, cumprindo, assim, com os requisitos de fluidez, habilidade passante e coesão;
- Em relação as propriedades mecânicas, os traços com metacaulim apresentaram um desempenho superior ao concreto de referência, provavelmente devido a reação pozolânica que forma uma quantidade extra de hidratos que contribui na resistência e no tamponamento dos poros. Já ambos os traços com fíler calcário foram inferiores ao REF., provavelmente devido à alta relação água/aglomerante adotada que não foi compensada pelo efeito fíler ao se retirar cimento da mistura;
- Mesmo com o pior desempenho mecânico em relação ao REF, o traço F20 tem uma redução do consumo de cimento de $C = 475 \text{ kg/m}^3$ para $C = 380 \text{ kg/m}^3$. Por estar acima da classe C30 ele ainda poderia ser utilizado em componentes e elementos estruturais

de concreto armado submetidos a classe de agressividade ambiental III da NBR 6118:2014;

- Os traços que contém metacaulim apresentaram uma absorção de água por capilaridade menor que as misturas com fíler calcário, provavelmente devido a reação pozolânica, que diminui a porosidade e interconexão entre poros;
- O traço F10 apresentou um comportamento próximo ao do concreto de referência em relação as propriedades mecânicas, a absorção de água por capilaridade e a sorvidade, mesmo com 10% menos de cimento Portland em sua composição, o que indica que o empacotamento das partículas e o efeito da superfície do material, através de pontos de nucleação, serviram para equilibrar a retirada de cimento;
- O traço M15F5, que assim como o M20 e o F20 tinha uma composição com 20% menos de cimento Portland, de modo geral apresentou um desempenho superior ao traço com fíler calcário e inferior ao traço com metacaulim, em todas as propriedades analisadas;
- Observa-se, pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, que o metacaulim promoveu um melhor refinamento da estrutura porosa do que o fíler calcário. Porém, em todos os traços o valor máximo de volume intrudido nos poros ocorreu na faixa correspondente aos mesoporos (0,002 a 0,05 μm), confirmando a tendência do CAA de uma estrutura de poros mais fina, devido ao uso de um maior teor de finos, menor proporção de agregados e aditivos superplastificantes;
- Utilizando a metodologia proposta por Hoppe Filho et al. (2017) foi possível calcular o percentual dos principais produtos de hidratação formados, de acordo com a perda de massa observada na faixa de temperatura característica de decomposição dos hidratos, com base nos resultados do ensaio de TG/DTG. Em geral, a quantidade de cada hidrato nos traços foi condizente com o percentual de substituição empregado e o tipo de adição mineral utilizada;
- No ensaio de carbonatação acelerada realizado nos corpos de prova recomendados pela ISO 1920-12:2015, a diferença entre a utilização de fíler calcário ou metacaulim como substituto parcial do cimento Portland é clara, sendo os traços com metacaulim bem mais eficientes na redução do ingresso do agente deletério;
- Percebe-se que nos traços com fíler calcário o avanço da profundidade da frente de carbonatação ocorreu de maneira mais uniforme, havendo a identificação de uma frente carbonatada linear. Nos traços que continham metacaulim, quando observada, a carbonatação era pontual. Isso ocorreu principalmente no traço M15F5, indicando que

a utilização combinada das adições pode provocar um fortalecimento na matriz e, conseqüentemente, uma difusão de CO₂ mais expressiva pela zona de transição.

- Os valores de profundidade de carbonatação obtidos com a utilização de um corpo de prova cilíndrico e sem direcionamento do fluxo de difusão do CO₂ foram superiores aos encontrados nos corpos de prova prismáticos, para os mesmos traços e tempos de medição. A principal diferença foi o fato de, nos corpos de prova cilíndricos, todos os concretos com adição mineral apresentarem maior carbonatação que o concreto de referência;
- Segundo as extrapolações realizadas baseadas no cobrimento nominal de 40 mm recomendado pela NBR 6118:2014, dificilmente haveria risco da frente carbonatada atingir as armaduras de estruturas confeccionadas com algum dos traços estudados. Portanto, sem considerar outras interações das estruturas com o ambiente e as deteriorações a que essas podem ser submetidas com o uso, os traços de CAA executados são uma boa alternativa para a extensão da vida útil das estruturas de concreto, especialmente se a carbonatação for considerada como o principal fator agressivo;
- Ainda que os traços com metacaulim tenham apresentado um desempenho superior ao concreto de referência nas propriedades avaliadas, vale salientar que existe um teor ótimo de substituição de cimento Portland pela adição mineral para promover ganho de desempenho e esse precisa ser avaliado;
- De um modo geral, o desempenho de todos os traços foi satisfatório, indicando que a utilização de cada um deles é cabível, a depender dos elementos de sua destinação final. Ficou evidente que o emprego do CAA permitiu a substituição de cimento Portland por adições minerais, e a conseqüente diminuição do consumo de cimento, sem perder eficiência de trabalhabilidade, de propriedades mecânicas e de durabilidade frente à carbonatação.

5. CONCLUSÕES

O foco do desenvolvimento desse trabalho foi avaliar o comportamento do avanço da frente de carbonatação em concretos autoadensáveis com adições minerais, utilizando a padronização proposta pela ISO 1920-12:2015, para o ensaio de carbonatação acelerada. Foi realizado um programa experimental com seis traços de CAA, com 10 e 20% de substituição de cimento Portland por fíler calcário e metacaulim, em combinações binárias e ternária, além de um concreto de referência sem adição mineral. Além da carbonatação, foram avaliados os critérios de autoadensabilidade, os parâmetros reológicos teóricos, as propriedades mecânicas, a absorção de água por capilaridade e a microestrutura dos concretos.

O comportamento do avanço da frente de carbonatação ocorreu de forma diferente, a depender do tipo de corpo de prova utilizado. Com o tipo prismático, recomendado pela ISO 1920-12, os traços com metacaulim apresentaram desempenho superior ao concreto de referência, com o M10 sendo o traço mais eficiente em prevenir o ingresso do CO₂. Já com a utilização de corpos de prova cilíndricos o comportamento dos concretos seguiu o que é mais difundido na literatura, ou seja, os traços com adição mineral apresentaram maior profundidade de carbonatação que o REF, o que é associado ao consumo do hidróxido de cálcio, produto de hidratação que garante a alcalinidade do concreto e que é consumido pela reação pozolânica.

Em relação as propriedades do estado fresco, todos os concretos cumpriram com os requisitos de autoadensabilidade, avaliados utilizando os critérios de aceitação da NBR 15823-1:2017. Ademais, foram determinados os parâmetros reológicos teóricos, com as equações propostas por Sedran e De Larrard (1999) e os resultados obtidos também ficaram dentro da faixa encontrada pelos autores. Quando os resultados foram comparados aos de outros autores, que utilizaram um tipo diferente de reômetro para a determinação das faixas de autoadensabilidade, os valores de tensão de escoamento encontrados pelas formulações teóricas não foram condizentes com o esperado. Já os valores de viscosidade plástica também estavam de acordo com o encontrado na literatura.

O M20 foi o traço que apresentou o melhor desempenho em todas as propriedades mecânicas avaliadas, mesmo numa composição com 20% menos de cimento Portland. Esse fato contribui para economia e sustentabilidade da construção, já que se tem menos emissões de CO₂ com a diminuição do consumo de cimento, além da incorporação de adições minerais. Além disso,

estruturas com um melhor desempenho mecânico tendem a ter uma melhor durabilidade e menor necessidade de reparos ou substituições.

A absorção de água por capilaridade e a sorvidade foram menores nos traços que continham metacaulim, provavelmente devido a reação pozolânica, que diminui a porosidade e interconexão entre os poros. Os traços com fíler calcário provocaram aumento em relação ao REF. Percebeu-se, ainda, que os valores de absorção de água por capilaridade e resistência à compressão simples são inversamente proporcionais. O F20 foi o traço que apresentou o maior valor de absorção capilar e também o menor valor de resistência à compressão. A mesma tendência ocorreu nos demais traços.

Em geral, os ensaios microestruturais confirmaram o comportamento dos traços, de acordo com a quantidade de cada hidrato, com o percentual de substituição empregado e o tipo de adição mineral utilizada. Ficou clara a ação pozolânica do metacaulim, o que mostra que o refinamento dos poros foi efetivo em impedir a difusão do CO₂, mesmo em um ambiente menos alcalino.

Após todas as análises, fica clara a necessidade de padronização no procedimento de ensaio de carbonatação acelerada, uma vez que existe uma grande diferença nos valores encontrados para os dois tipos de corpos de prova utilizados. As relações entre a carbonatação acelerada e as demais propriedades do estado endurecido avaliadas tiveram uma melhor tendência de comportamento com o uso dos corpos de prova prismáticos. Desse modo, ressalta-se a importância de se cumprir as recomendações da ISO 1920-12:2015.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar outros tipos de adições minerais, inclusive focando na incorporação de resíduos afim de contribuir para a sustentabilidade da construção civil;
- Propor traços com maiores teores de substituição de cimento Portland por adições minerais e diferentes combinações entre as adições;
- Determinar os parâmetros reológicos com a utilização de reômetros para comparação com os resultados dos testes empíricos e propor equações que se adequem aos materiais brasileiros;
- Avaliar outros parâmetros de durabilidade, como por exemplo a ação dos íons cloreto;

- Avaliar outros tipos de concretos, classes de resistência e classes de agressividade ambiental;
- Realizar o ensaio de carbonatação acelerada com outros materiais utilizando as diretrizes da ISO 1920-12:2015, afim de comparar os resultados de forma fidedigna e criar um banco de dados de durabilidade frente à carbonatação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: **Cimento Portland Composto - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. NBR 15823-1: **Concreto auto-adensável**: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. NBR 15823-2: **Concreto auto-adensável**: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. NBR 15823-4: **Concreto auto-adensável**: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. NBR 15823-5: **Concreto auto-adensável**: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. NBR NM 248: **Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. NBR NM 45: **Agregados: Determinação da massa unitária e volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. NBR NM 52: **Agregado miúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR NM 53: **Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR 11768: **Aditivos para concreto de cimento Portland**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. NBR 16372: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. NBR 5739: **Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. NBR 6118: **Projetos de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

_____. NBR 7222: **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. NBR 8522: **Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. NBR 11578: **Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. NBR 15575-1: **Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR NM 23: **Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. NBR NM 65: **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ALONSO-DOMÍNGUEZ, D.; ÁLVAREZ-SERRANO, I.; REYES, E.; MORAGUES, A. New mortars fabricated by electrostatic dry deposition of nano and microsilica additions: Enhanced properties. **Construction and Building Materials**, v. 135, p.186-193, 2017.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 237R-07: **Self-Consolidating Concrete**. 2007

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 157; **Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete**. Pennsylvania. 2014.

BARBOSA, M.P. **Desenvolvimento normativo do concreto autoadensável – a NBR 15823 revisada**. III seminário sobre pesquisas e obras em concreto autoadensável. IBRACON 2016, Belo Horizonte, outubro de 2016. Disponível em <<http://ibracon.org.br/eventos/58cbc/Palestras/04MonicaBarbosa.pdf>>. Acesso em 18 de abr 2017.

BHATTY, J. I. Hydration versus strength in a Portland cement developed from domestic mineral wastes – A comparative study. **Thermochimica Acta**, v. 106, p.93-103, 1986.

CALADO, C. et al. Durability Indicators Comparison for SCC and CC in Tropical Coastal Environments. **Materials**, [s.l.], v. 8, n. 4, p.1459-1481, 2015.

CALVO, J. L. G.; ALONSO, M. C.; LUCO, L. F.; VELASCO, M. R. Durability performance of sustainable self-compacting concretes in precast products due to heat curing. **Construction and Building Materials**, v. 111, p.379-385, 2016.

CARSANA, M.; GASTALDI, M.; LOLLINI, F.; REDAELLI, E.; BERTOLINI, L. Improving durability of reinforced concrete structures by recycling wet-ground MSWI bottom ash. **Materials and Corrosion**, v. 67, p.573-582, 2016.

DADSETAN, S.; BAI, J. Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast furnace slag and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 146, p.658-667, 2017.

DEMIRCI, E. E.; SAHIN, R. Comparison of carbonation resistance and uniformity of SCC and CC core samples. **Magazine of Concrete Research**, v. 66, p.531-539, 2014.

DERABLA R, BENMALEK M L. Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixture at early age and in the long term. **Construction and Building Materials**, v. 66, p.787-794, 2014.

DOGAN, U. A.; OZKUL, M. H. The effect of cement type on long-term transport properties of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 96, p.641-647, 2015.

ELGALHUD, Abdurrahman A.; DHIR, Ravindra K.; GHATAORA, Gurmel. Limestone addition effects on concrete porosity. **Cement and Concrete Composites**. n. 76, p. 222-234, 2016

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICAL AND CONCRETE SYSTEMS - EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. Londres: EFNARC, fev. 2002. 32p.

_____. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use**. Londres: EFNARC, mai. 2005. 63p.

FRAZÃO, C.; CAMÕES, A.; BARROS, J.; GONÇALVES, D. Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 80, p.155-166, 2015.

FU, C. et al. A reaction-diffusion modeling of carbonation process in self-compacting concrete. **Computers And Concrete**, China, v. 15, n. 5, p.847-864, 2015.

GALLIAS, J. L.; KARA-ALI, R.; BIGAS, J. P. The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 10, p. 1543-1549, Oct. 2000.

GOMES et al., **Projeto Desentulho para a cidade de Maceió**. 2005.

GUNEYISI, E.; GESOGLU, M.; MERMERDAS, K. Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin. **Materials and Structures**, v. 41, p. 937-949, 2008.

GUNEYISI, E.; GESOGLU, M.; OZBAY, E. Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi system blended mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1878-1887, 2010.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 231p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V. A.; MEDEIROS, M. H. F. de. Atividade pozzolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozzolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Revista Matéria**, v. 22, n.3, 2017.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 1920-12:2015** – Testing of concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method. Geneva, Switzerland.

JIAO, D.; SHI, C.; YUAN, Q.; AN, X.; LIU, Y.; LI, H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p.146-159, 2017.

KIM, Y. J.; KIM, Y. J.; CHOI, Y. W. An Experimental Research on Self-consolidating Concrete using Tungsten Mine Tailings. **KSCE Journal Of Civil Engineering**, v. 20, p.1404-1410, 2015.

KRISTIAWAN, S. A.; ADITYA, M. T. M. Effect of high volume fly ash on shrinkage of self-compacting concrete. **Procedia Engineering**, v. 125, p. 705-712, 2015.

LASKAR, A. I.; TALUKDAR, S. Rheological behavior of high performance concrete with mineral admixtures and their blending. **Construction and Building Materials**, v. 22, p.2345-2354, 2008.

LENKA, S.; PANDA, K. C. Effect of metakaolin on the properties of conventional and self compacting concrete. **Advances in Concrete Construction**, v. 5, no. 1, p. 31-48, 2017.

LI, Z.; DING, Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 579-584, 2003.

LYE, C.; DHIR, R. K.; GHATAORA, G. S. Carbonation resistance of fly ash concrete. **Magazine Of Concrete Research**, v. 67, p.1150-1178, 2015.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria; Fundamentos de metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003, 311 páginas.

MATOS, A. M.; RAMOS, T.; NUNES, S.; SOUSA-COUTINHO, J. Durability Enhancement of SCC With Waste Glass Powder. **Materials Research**, v. 19, p.67-74, 2015.

MASSANA, J; REYES, E.; BERNAL, J.; LEÓN, N.; SÁNCHEZ-ESPINOSA, E. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 165, p.93-103, 2018.

MAZZA, Roger. **Carbonatação Acelerada de Concretos com Cinza de Casca de Arroz Sem Moagem**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MEDEIROS, M. H. F. de; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 125-139, out./dez. 2017.

MEHTA. P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. São Paulo: Ed. IBRACON, 2014.

MELO, K. A. DE. **Contribuição à Dosagem de Concreto Auto-Adensável com Adição de Filer Calcário**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MELO, K., A.; CARNEIRO, A. M. P. Effect os metakaolin's and contente in self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p.1529-1535, 2010.

MELO, Karoline Alves de Melo. **Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável**. 2010. 210 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2010.

MENDES, M. V. A. S. **Estudo dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia de argamassas e de concretos autoadensáveis**. 2016. 232 p. Tese (Doutorado) em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MOHAMMED, M. K.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. Carbonation of filler typed self-compacting concrete and its impact on the microstructure by utilization of 100% CO₂ accelerating techniques. **Construction and Building Materials**, v. 50, p.508-516, 2013.

MOKAREM, D. W.; WEYERS, R. E.; LANE, D. S. Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p.918-925, 2004.

MONTEAGUDO, S. M.; MORAGUES, A.; GÁLVEZ, J. C.; CASATI M. J., REYES, E. The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases. **Thermochimica Acta**, v. 592, p.37-51, 2014.

MUTTASHAR, H. L.; ARIFFIN, M. A. M.; HUSSEIN, M. N.; HUSSIN, M. W.; ISHAQ, S. B. Self-compacting geopolymers concrete with spend garnet as sand replacement. **Journal of Building Engineering**, v. 15, p.85-94, 2018.

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.

NÍELSSON, I.; WALLEVIK, O. H. **Rheological evaluation of some empirical test methods – Preliminary results**. In: **INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SCC**, 3rd., 2003, Reykjavik. France: RILEM Publications, 2003. p. 59-68.

NUNES, Douglas Garcez. **Carbonatação Acelerada em Concretos Compostos Com Cinza de Casca de Arroz de Diferentes Teores de Carbono Grafítico**. 2014. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete. Development, present use and future**. In: **INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SCC**, 1st 1999, Stockholm. France: RILEM Publications, 1999, p.3-14.

OWSIAK, Z.; GRZMIL, W. The Evaluation of the Influence of Mineral Additives on the Durability of Self-Compacting Concretes. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 19, p.1-7, 2014.

PAES, I. N. L. **Avaliação do Transporte de Água em Revestimentos de Argamassa nos Momentos Iniciais Pós-Aplicação**. Brasília, 2004. 242p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- PANE, I.; HANSEN, W. Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1155–1164, 2004.
- PAPADAKIS, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v. 30, no. 2, p. 291-299, 2000.
- 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.
- RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou da substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. 2015. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR 2015.
- RATO, V. N. P. M. **Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas**. Lisboa, 2006. 294p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C. DE; et al. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria Controle e Métodos de Análise**. 1ª ed. Elsevier, 2014.
- RICHARDSON, M. G. (1998). **Carbonation of reinforced concrete: Its causes and management**. New York: CITIS Ltd, Publishers.
- RILEM. TC 116-PCD Permeability of Concrete as a Criterion of Its Durability Final Report: concrete durability - an approach towards performance testing. **Materials and Structures**, v. 21, n. 126, p. 453-455, 1999.
- RÍO, O.; NGUYEN, V. D.; NGUYEN, K. Exploring the Potencial of the Functionally Graded SCC for Developing Sustainable Concrete Solutions. **Journal Of Advanced Concrete Technology**, v. 13, p.193-204, 2015.
- SALOMÃO, Maria Cláudia Freitas. **Estudo da estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água**. 2016. 248 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF,2016.
- SAMIMI, K.; KAMALI-BERNARD, S.; MAGHSOUDI, A. A. Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 247-263, 2018.
- SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R. LOTHENBACH. B. (ED) **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. 1ª ed. CRC Press, 2016.
- SEDRAN, T., DE LARRARD, F., **Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model**. In: **INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SCC**, 1st 1999, Stockholm. France: RILEM Publications, 1999, p.321-332.
- SFIKAS, I. P.; BADOGIANNIS, E. G.; TREZOS, K. G. Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 64, p.121-129, 2014.

- SHARMA, R.; KHAN R. A. Durability assessment of self compacting concrete incorporating copper slag as fine aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 617-629, 2017.
- SHARMA, R.; KHAN R. A. Influence of copper slag and metakaolin on the durability of self compacting concrete. **Cleaner Production**, v. 17, p. 1171-1186, 2018.
- SHEINN, D.; HO, D. W. S.; TAM, C. T. **Effect of particle shape on paste rheology of SCC**. In: **INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SCC**, 3rd., 2003, Reykjavik. France: RILEM Publications, 2003. p. 232-239.
- SIDERIS, K. K.; ANAGNOSTOPOULOS, N. S. Durability of normal strength self-compacting concretes and their impact on service life of reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 41, p.491-497, 2013.
- SILVA, Eugênia Fonseca. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. 2007. 332 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2007
- SILVA, P. R.; DE BRITO, J. Durability performance of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. **Materials and Structures**, v. 49, p.2749-2766, 2015.
- SILVA, Valdirene Maria. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. 2007. 281 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- SINGH, N.; SINGH, S.P. Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 121, p.400-409, 2016.
- SINGH, N.; SINGH, S.P. Carbonation resistance and microstructural analysis of Low and High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete containing Recycled Concrete Aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 127, p.828-842, 2016.
- TAYLOR, H. F. W. (1997). **Cement Chemistry**. 2 ed. Londres. Thomas Telford
- THOMSON, M. L.; LINDQVIST, J.-E.; ELSEN, J.; GROOT, C. J. W. P. **Porosity of historical mortars**. 13th International Brick and Block masonry Conference. 2004.
- TURK, K.; KARATAS, M.; GONEN, T. Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive Strength, Sorptivity and Carbonation of SCC. **Ksce Journal of Civil Engineering**, v. 17, p.202-209, 2012.
- TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-Adensável**. 1. ed. São Paulo: Editora PINI, 2014.
- VALCUENDE, M.; PARRA, C.; MARCO, E.; GARRIDO, A.; MARTÍNEZ, E.; CÁNOVES, J. Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 122-128, 2012.

VIEIRA, S. P. **Propriedades do concreto autoadensável com diferentes tipos de adições**. 2017. 126 p. Dissertação (Mestrado) em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

WALLEVIK, O. H. **Rheology – A scientific approach to develop self-compacting concrete**. In: **INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SCC**, 3rd., 2003, Reykjavik. France: RILEM Publications, 2003. p. 23-32.

WALLEVIK, O. H.; WALLEVIK, J. E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1279–1288, 2011

ZERBINO, R., BARRAGAN, B., GARCIA, T., AGULLO, L., GETTU, R., Workability tests and rheological parameters in self-compacting concrete, **Materials and Structures**, v. 42, p. 947–960, 2009.

ZHAO, H.; SUN, W.; WU, X.; GAO, B. The effect of sand ration on the properties of self-compacting concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 65, p.275-282, 2013.

ZHAO, H.; SUN, W.; WU, X.; GAO, B. The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p.66-74, 2015.

ZHU, W.; BATROS, P. J. M. Permeation properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, no. 3, p. 921-926, 2003.