

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BÁRBARA CICUTO GONÇALVES PEREIRA

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE CAA COM MATERIAIS CIMENTÍCIOS
SUPLEMENTARES DOSADO POR EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS COM
REPOSIÇÃO ALCALINA PELA CAL

CURITIBA

2022

BÁRBARA CICUTO GONÇALVES PEREIRA

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE CAA COM MATERIAIS CIMENTÍCIOS
SUPLEMENTARES DOSADO POR EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS COM
REPOSIÇÃO ALCALINA PELA CAL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Nayara Soares Klein
Coorientador: Prof.Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Pereira, Bárbara Cicuto Gonçalves

Contribuição ao estudo de CAA com materiais cimentícios suplementares dosado por empacotamento de partículas com reposição alcalina pela cal / Bárbara Cicuto Gonçalves Pereira. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Nayara Soares Klein

Coorientador: Ronaldo Alves de Medeiros Junior

1. Concreto. 2. Concreto – Mistura. 3. Cimento. 4. Cal. 5. Carbonatação. 4. Partículas – Empacotamento de. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Klein, Nayara Soares. IV. Medeiros Junior, Ronaldo Alves de. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **BÁRBARA CICUTO GONÇALVES PEREIRA** intitulada: **Contribuição ao estudo de CAA com materiais cimentícios suplementares dosado por empacotamento de partículas com reposição alcalina pela cal**, sob orientação da Profa. Dra. NAYARA SOARES KLEIN, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 11 de Novembro de 2022.

Assinatura Eletrônica

18/11/2022 11:13:55.0

NAYARA SOARES KLEIN

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

16/11/2022 15:30:32.0

JUAREZ HOPPE FILHO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA)

Assinatura Eletrônica

16/11/2022 16:34:05.0

RICARDO PIERALISI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

RESUMO

No cenário atual da construção civil são encontrados cada vez mais desafios técnicos. Para algumas dessas situações o CAA é uma solução adequada. Apesar disso, o CAA apresenta desvantagem econômica e ambiental devido ao seu elevado consumo de clínquer. Uma alternativa para garantir maior aplicabilidade do CAA é a redução do consumo de clínquer garantindo ainda suas propriedades e durabilidade. O objetivo dessa dissertação é propor misturas de CAA com baixo teor de clínquer pela dosagem por empacotamento de partículas e reposição alcalina pela cal. Foram produzidos seis traços de concreto com consumo de cimento variando de 173 a 283 kg/m³ e adição de cinza volante, filer calcário, sílica ativa e cal, pelo Modelo de Alfred e aplicação do Método de Monte Carlo a partir de um código em Python. Os traços foram divididos quanto a sua composição em Grupo 1 (C1, C1_F e C1_A, sem sílica ativa) e Grupo 2 (C2, C2_F e C2_A, com sílica ativa), sendo que os traços com nomenclatura terminada em “F” e “A” possuem cal em sua composição em substituição aos finos (cimento, filer calcário, cinza volante e sílica ativa) e em substituição à areia, respectivamente. Os concretos foram avaliados no estado fresco pelos ensaios de Slump Flow, Funil V, Anel J e T500. No estado endurecido, em relação à resistência à compressão, absorção por capilaridade e imersão. A avaliação da durabilidade se deu pela carbonatação acelerada com avaliação da frente de carbonatação nas idades de 24, 60 e 100 dias. No estado fresco os traços C1_F e C2_F apresentaram comportamento condizente com concreto convencional vibrado e os outros traços comportamento similar ao CAA. No estado endurecido, todos os traços apresentaram resistência à compressão estrutural, entre 25 e 46 MPa, absorção por imersão entre 1,8 e 4,2% e absorção por capilaridade entre 0,076 e 0,302 g/cm³. Em relação à durabilidade, apenas na idade de 100 dias foi constatada frente de carbonatação para os concretos C1_A, C2 e C2_A, que apresentaram avanço de frente variando entre 3,73 e 4,75 mm. Ressalta-se que o concreto produzido com menor teor de cimento, 173 kg/m³, não apresentou frente de carbonatação. A utilização do Modelo de Alfred permitiu produzir concretos estruturais com baixo teor de clínquer. Todos os concretos produzidos apresentam aplicabilidade no estado endurecido.

Palavras-chave: concreto auto adensável; CAA); baixo consumo de cimento; empacotamento de partículas; Modelo de Alfred, reposição alcalina com cal, carbonatação.

ABSTRACT

In today's context of civil construction, newer technical challenges are continuously found. For some of those situations, self compacting concrete (SCC) is a suitable solution. However, SCC presents economical and environmental disadvantages, due to its high level of clinker consumption. An alternative to allow higher applicability of SCC is to reduce clinker consumption, while still ensuring its properties and durability. The objective of this thesis is to propose SCC mixtures with low clinker consumption, by use of particle packing and alkaline replenishment by hydrated lime. Six concrete mixtures were produced, with cement consumption ranging from 173 to 283 kg/m³ and with fly ash, filler (lime), and hydrated lime using Alfred's Model and applying Monte Carlo method with Python code. Those mixtures were grouped by their composition in Group 1 (C1, C1_F and C1_A, without silica fume) and Group 2 (C2, C2_F and C2_A, with silica fume). Mixtures with the F or A suffix have hydrated lime added in their composition in substitution to the fine part (cement, with fly ash, filler (lime), and hydrated) and in substitution to sand, respectively. Concretes had their fresh state properties evaluated by Slump Flow, V-Funnel, J-Ring and T500 tests. Hardened state properties were assessed by compression resistance and capillary absorption and immersion tests. Assessment of durability was done by accelerated carbonation, and evaluation of carbonation depth at ages of 24, 60 and 100 days. In their fresh state, mixtures C1_F and C2_F presented similar behaviour to conventional vibrated concrete. Other mixtures presented similar behaviour to SCC. In their hardened state, all mixtures presented compression strength ranging from 25 to 46 MPa, immersion absorption between 1,8 e 4,2%, and capillary absorption between 0,076 and 0,302 g/cm³. Regarding durability, only at 100-day age a carbonation depth ranging from 3,73 and 4,75 was found in mixtures C1_A, C2 and C2_A. It should be noted that the lower cement consumption mixture presented no carbonation depth. Usage of Alfred's Model allowed the production of low clinker structural concrete. All produced concrete presented applicability in their hardened state.

Keywords: self compacting concrete (SCC), low cement consumption, particle packing, Alfred's Model, hydrated lime alkaline replenishment, carbonation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores que influenciam na carbonatação de concretos	17
Figura 2 - Consumo de materiais para obras residenciais por região do mundo	19
Figura 3 - Consumo de materiais para obras não residenciais por região do mundo	20
Figura 4 - Evolução do consumo em milhões de toneladas de cimento no Brasil	21
Figura 5 - Índice de ocorrência de corrosão e custo relacionado à deterioração em relação ao PIB.....	22
Figura 6 - Volume total de vazios e distribuição do diâmetro dos poros de pasta com 50% de cimento CP V ARI e 50% de cinza volante, com relação a/c de 0,45	36
Figura 7 - Densidade de empacotamento de diferentes arranjos de partículas esféricas: (a) 0,524; (b) 0,605; (c) 0,740 e (d) 0,749	39
Figura 8 - Mistura de partículas de diferentes dimensões	40
Figura 9 – Curvas granulométricas ideais propostas por Füller eThompson, Andreasen e Andersen e Funk e Dinger	43
Figura 10 Efeito filer e parede	46
Figura 11 Diagrama de Pourbaix.....	51
Figura 12 Representação de uma pilha de corrosão de um mesmo metal	52
Figura 13 Expansão dos produtos da corrosão	53
Figura 14 - Fluxograma das etapas do programa experimental	55
Figura 15 - Análise térmica diferencial da cal.....	58
Figura 16 - Sílica ativa aglomerada	63
Figura 17 – Granulometria do cimento e adições minerais	64
Figura 18 - Agregados: (A) brita 1, (B) brita 0, (C) areia	65
Figura 19 - Granulometria areia com limites estabelecidos pela norma	67
Figura 20 - Material retido por peneira (areia)	68
Figura 21 - Curva granulométrica dos agregados	69
Figura 22 - Material retido por peneira (pedrisco)	69
Figura 23 - Material retido por peneira (brita).....	70
Figura 24 - Efeito do aditivo redutor de água nas adições: (a) cinza volante, (b) cinza volante com aditivo, (c) filer calcário, (d) filer calcário com aditivo, (e) cal; (f) cal com aditivo; (g) sílica e (h) sílica com aditivo	71
Figura 25 - Esquema funcionamento algoritmo de dosagem	75

Figura 26 - Fluxograma procedimento de mistura.....	81
Figura 27 - Posicionamento dos CP's na câmara de carbonatação	84
Figura 28 - Solução saturada de nitrito de sódio	85
Figura 29 - Amostras prontas para ensaio de MEV	86
Figura 30 - Distribuição granulométrica traço código x traço teórico	89
Figura 31 - Distribuição granulométrica e RSS Grupo 1	93
Figura 32 - Distribuição granulométrica parcial Grupo 2	94
Figura 33 - Representação visual traços de concreto	96
Figura 34 - Desempenho estado fresco: (a) C1, (b) C1_F, (c) C2_F, (d) C2, (e) C2_F, (f) C2_A.....	98
Figura 35 - Resistência à compressão 91 dias.....	102
Figura 36 - Evolução da absorção por capilaridade ao longo do tempo.....	105
Figura 37 - Absorção: imersão x capilaridade	106
Figura 38 - Ascensão capilar 72h: (a) C1; (b) C1_F; (c) C1_A; (d) C2; (e) C2_F; (f) C2_A	108
Figura 39 - Frente de carbonatação aos 28 dias de exposição: (a) C1 e (b) C2_A.110	
Figura 40 - Frente de carbonatação 60 dias traços Grupo 1 (sem cal): (a) C1, (b) C1_F, (c) C1_A	111
Figura 41 - Frente de carbonatação 60 dias traços Grupo 2 (com cal): (a) C2, (b) C2_F, (c) C2_A	111
Figura 42 - Frente de carbonatação 100 dias traços Grupo 1 (sem cal): (a) C1, (b) C1_F, (c) C1_A	112
Figura 43 - Frente de carbonatação 100 dias traços Grupo 2 (com cal): (a) C2, (b) C2_F, (c) C2_A	112
Figura 44 - Avanço frente carbonatação para avaliação de 100 dias de exposição113	
Figura 45 - Tanque de cura com sedimentação de cal	115
Figura 46 - Estruturas típicas resultantes da hidratação do cimento – (a) C-S-H (escala de 2µm); (b) brucita (escala de 5µm); (c) portlandita (escala de 5µm); (d) poro com C-S-H, etringita e portlandita (escala de 2µm)..	118
Figura 47 - MEV poro traço C1_A: (a) poro (escala de 20µm) e (b) aproximação (escala de 5µm) poro no local demarcado em (a).....	120
Figura 48 - MEV poro traço C2_F (escala de 20µm).....	120
Figura 49 - MEV zona de transição traço C2: (a) ZT (escala de 20µm) e (b) aproximação área (escala de 5µm) demarcada em (a).....	121

Figura 50 - Repetição granulometria a laser cimento	155
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre o consumo de cimento e adições e resistência à compressão de dosagens encontradas na literatura.....	30
Tabela 2 - Trabalhos de dosagem eco eficiente.....	34
Tabela 3 - Ensaio de caracterização dos materiais finos	56
Tabela 4 - Resultados da caracterização do cimento.....	57
Tabela 5 - Composição cal.....	60
Tabela 6 - Chapeleira cinza volante e sílica ativa.....	62
Tabela 7 - Ensaio caracterização materiais granulares	65
Tabela 8 - Caracterização agregados	66
Tabela 9 - Nomenclatura e composição pasta traços C1 e C2	78
Tabela 10 - Ensaio estado fresco	82
Tabela 11 - Ensaio no estado endurecido	82
Tabela 12 - Consumo de materiais granulares traço C1 (obtido pelo código) e C2 (derivado).....	89
Tabela 13 - Consumo de portlandita e de cal traços com cal substituindo finos	90
Tabela 14 - Detalhamento consumo e parâmetros traços.....	91
Tabela 15 - Caracterização dos concretos no estado fresco.....	97
Tabela 16 - Absorção por capilaridade 72h após tratamento estatístico	105
Tabela 17 - Revisão literatura frente de carbonatação.....	115
Tabela 18 - Palavras-chave e base de dados utilizadas na pesquisa bibliográfica, considerando a separação de três eixos de pesquisa	144
Tabela 19 - Lista artigos revisão sistemática.....	147
Tabela 20 - Granulometria cimento, cal, cinza volante e filler calcário.....	156
Tabela 21 - Granulometria agregados.....	157
Tabela 22 - Dados brutos resistência à compressão	161
Tabela 23 - Dados brutos capilaridade.....	162
Tabela 24 - Dados brutos imersão	165
Tabela 25 - Dados brutos carbonatação	166

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

- CAA - Concreto auto adensável
- CCV – Concreto convencional vibrado
- PF – Fator de empacotamento
- a/c – Relação água cimento
- cm – Centímetro(s)
- m³ - metro cúbico
- cm³ - centímetro cúbico
- kg – quilograma
- CO₂ – Dióxido de carbono
- WDXRF - Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer
- ATG – Análise termogravimétrica
- Fck
- EFNARC - European Federation of National Trade Associations
- GWP - *Global Warming Potential*
- BI - *Binder intensity*
- CI – *CO₂ intensity*
- CPFT -, *cumulative percent finer than D*
- D - diâmetro da partícula
- D_{max} - diâmetro da maior partícula do conjunto
- D_{min} - diâmetro da menor partícula;
- q -coeficiente de distribuição
- PR – Paraná
- $I_{Ca(OH)_2}$ – Índice de atividade pozolânica por Chapelle
- RSS - resíduo

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ – Densidade de empacotamento

V_s – Volume de sólidos

V_t – Volume total

V_e – Volume de vazios

e – Porosidade (V_e/V_t)

V_s – Volume de sólidos

V_t – Volume total

V_e – Volume de vazios

e – Porosidade (V_e/V_t)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMA DE PESQUISA.....	14
1.2	OBJETIVOS	18
1.3	JUSTIFICATIVA	19
1.3.1	Ambiental	19
1.3.2	Técnico econômica	21
1.4	ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA.....	23
2	CONCRETO AUTOADENSÁVEL	24
2.1	CONCRETO AUTO ADENSÁVEL	24
2.1.1	Características e propriedades.....	24
2.1.2	Dosagem	26
2.1.4	Adições.....	35
2.2	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	37
2.3	DURABILIDADE	47
2.3.1	Proteção do aço	47
3	MATERIAL E MÉTODOS	55
3.1	MATERIAIS	56
3.1.1	Cimento e adições.....	56
3.1.2	Agregados	65
3.1.3	Aditivo químico	70
3.2	DOSAGEM TEÓRICA	72
3.2.1	Modelo de Alfred	73
3.2.2	Algoritmo	74
3.2.3	Determinação do consumo dos materiais granulares	77
3.3	PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO CONCRETO	80
3.3.1	Produção	80
3.3.2	Caracterização no estado fresco.....	82
3.3.3	Caracterização no estado endurecido	82
3.4	AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO	83
3.5	MICROESTRUTURA.....	85
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	86
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	88

4.1	DOSAGEM.....	88
4.1.1	Modelo de Alfred e código para dosagem.....	88
4.1.2	Dosagem cal.....	90
4.1.3	Traços de concreto.....	90
4.2	ESTADO FRESCO.....	97
4.3	ESTADO ENDURECIDO.....	101
4.3.1	Resistência à compressão.....	101
4.3.2	Absorção.....	104
4.4	CARBONATAÇÃO.....	109
4.4.1	Avaliação exposição: 28 dias.....	109
4.4.2	Avaliação exposição: 60 dias.....	110
4.4.3	Avaliação exposição: 100 dias.....	111
4.5	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA.....	118
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	122
5.1	CONCLUSÕES.....	122
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	124
	REFERÊNCIAS.....	126
	APÊNDICE 1 – <i>METHODI ORDINATIO</i>.....	143
	APÊNDICE 2 – LISTA ARTIGOS RESULTANTES DO <i>METHODI ORDINATIO</i>... 	147
	APÊNDICE 3 – CARACTERIZAÇÃO CIMENTO E ADIÇÕES.....	155
	APÊNDICE 4 – CARACTERIZAÇÃO AGREGADOS.....	157
	APÊNDICE 5 – CÓDIGO EM PYTHON.....	158
	APÊNDICE 6 – RESULTADOS BRUTOS ESTADO ENDURECIDO.....	161
	APÊNDICE 7 – ANÁLISE ESTATÍSTICA (ANOVA E TUKEY).....	167

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMA DE PESQUISA

As necessidades socioeconômicas impulsionam a criação de soluções na construção civil. No processo de concretagem, por exemplo, falhas como ninhos de concretagem e baixo preenchimento de formas incorrem em prejuízos. Zonas de altas taxa de armadura também representam um desafio para o bom preenchimento, e conseqüentemente para a concretagem. Complexidades como essas, associadas à necessidade de fiscalização constante do processo, bem como de mão de obra qualificada para realização do adensamento criam demandas otimização (NUNES, 2001). Como resposta, em 1988, no Japão, foi desenvolvido o concreto auto adensável (CAA) (OKAMURA; OUCHI, 1999). Sua criação se deu a partir da necessidade de estruturas de concreto mais duráveis em um cenário de escassez de mão de obra qualificada (OKAMURA; OZAWA; OUCHI, 2000).

Por ser capaz de fluir sob ação de seu próprio peso, o CAA é um concreto que não necessita de vibração durante a concretagem (EFNARC, 2005). No estado endurecido, não há diferenciação entre o CAA e o concreto convencional vibrado (CCV). As propriedades no estado fresco que definem um concreto como CAA são a fluidez, a habilidade passante e a resistência à segregação (GOODIER, 2003; GOMES; BARROS, 2009). Tais propriedades conferem ao CAA importante vantagem quando comparado a outros tipos de concreto, como menor tempo de concretagem, maior produtividade, redução de falhas de concretagem além de propiciar um ambiente de trabalho mais seguro (GOMES; BARROS, 2009).

O maior consumo de cimento característico do CAA magnifica os impactos ambientais da produção desse concreto (MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO JR, 2019). Tais impactos, que são majoritariamente relacionados ao desmatamento e emissão de gases do efeito estufa, levantam preocupações a respeito de mudanças climáticas severas, redução da biodiversidade e erosão do solo (KILBERT, 2016).

O problema ambiental associado ao consumo de cimento é referente ao clínquer. Os autores Mehta e Monteiro (2014) explicam que o cimento Portland é o componente do concreto que apresenta o maior consumo energético para ser produzido (4 GJ/tonelada de cimento). Além disso, as emissões de CO₂ associadas

ao cimento tem origem no processo de fabricação do clínquer, que libera em média 1 tonelada de CO₂ a cada tonelada de clínquer fabricada.

Um segundo argumento favorável à redução do consumo de clínquer é relacionada ao custo. Geyer (2005) apud. Costa (2017) realizou um estudo comparativo de custos entre o CAA e o CCV. O autor observou que apesar de uma redução de 70% dos custos com mão de obra e de 90% nos custos relacionados à energia elétrica e equipamentos, o CAA apresentou custo direto 8% superior ao CCV.

A redução do impacto ambiental do CAA depende da redução do consumo de clínquer (consequentemente, de cimento). Para tal, uma possível abordagem é a utilização de adições. A utilização das adições minerais é fundamental para garantir as características do CAA no estado fresco e ainda limitar o consumo de cimento Portland (EFNARC, 2005). A escolha do tipo da adição dependerá não só da finalidade técnica do concreto, mas também de questões práticas que devem ser observadas, como custo e disponibilidade do material na região.

Ainda que a utilizações de adições minerais seja uma solução eficiente para garantir elevado teor de finos (cimento e adições) com redução do consumo de clínquer, tratando-se do impacto ambiental é importante salientar que as adições também são responsáveis por uma parcela das emissões de poluentes do concreto. Ainda assim, o clínquer representa cerca de 90% das emissões do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014; OLIVEIRA, 2014).

A mitigação do prejuízo ambiental relacionado ao CAA deve ser realizada durante o processo de dosagem. Para Jiao *et. al.* (2018) o processo de dosagem não é apenas sobre as proporções entre os materiais que compõem o concreto, mas sim um equilíbrio entre as necessidades de dosagem para atingir cada uma das propriedades requeridas para o concreto. Isto é, uma dosagem excelente deve atender aos requisitos do estado fresco, bem como garantir as propriedades do estado endurecido e a durabilidade do concreto.

Para incorporar em uma mesma dosagem a redução do consumo de cimento e simultaneamente a adição de pozolanas e filers inertes a dosagem por empacotamento de partículas pode ser uma solução. O empacotamento de partículas parte de informações sobre as características físicas dos materiais que constituirão o concreto e de equações que simulam as interações físicas entre estes componentes (KWAN; MORA, 2001; FENNIS, 2011). O resultado da aplicação dos métodos ou modelos é uma proporção de baixa porosidade. À medida que a porosidade do

esqueleto granular, composto de agregados, é reduzida, conseqüentemente diminui também a quantidade de pasta necessária para preencher os poros. Nesta situação, o volume extra de pasta adicionado proverá trabalhabilidade à mistura. Utilizar essa abordagem durante o processo de dosagem resulta em um consumo final de pasta reduzido para uma determinada trabalhabilidade. Reduzir o consumo de pasta, e por conseqüência o de cimento, traz benefícios econômicos e ambientais. Apesar disso, deve-se considerar a durabilidade da estrutura resultante.

A durabilidade de uma estrutura de concreto está relacionada a sua capacidade de resistir a ações físicas e químicas mantendo suas condições de serviço. A duração do período em que tais condições são mantidas é chamada de vida útil da estrutura. O fim da vida útil se dá a partir do momento em que, ao ser exposta às condições de deterioração previstas em projeto, a estrutura apresenta comportamento insatisfatório, tornando sua utilização insegura e antieconômica (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

É importante ressaltar também que estruturas de concreto são projetadas para ser resistentes às situações específicas do meio em que estão inseridas e à função que irão exercer. Essa condição fica clara ao se observar que nenhum material, nem mesmo o concreto, pode ser durável em qualquer circunstância.

A deterioração do concreto é intimamente ligada à presença de água em seu estado endurecido. Devido ao papel assumido pela água em processos de deterioração, a permeabilidade exerce grande influência na durabilidade de estruturas de concreto. Em sua atuação física, a água pode ser responsável por processos de erosão (quando há presença de sólidos suspensos na água) e de cavitação. Além disso, a água pode ter também atuação química ao transportar íons agressivos para o interior do concreto, bem como ao solubilizar compósitos hidratados do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além desse transporte, a água também contribui para a deterioração do concreto por meio da carbonatação.

O processo de carbonatação do concreto é caracterizado pela redução de seu pH, devido ao ingresso de agentes agressivos para o seu interior. Entre os possíveis agentes, encontra-se o gás carbônico (CO_2) (RIBEIRO *et. al.*, 2014). Neste trabalho, será abordada a redução da alcalinidade do concreto a partir do ingresso deste gás.

Quando uma estrutura de concreto é exposta ao meio ambiente, há o ingresso do gás carbônico no concreto, o que leva à sua degradação pelo processo de carbonatação. A velocidade de entrada e o avanço da frente de carbonatação

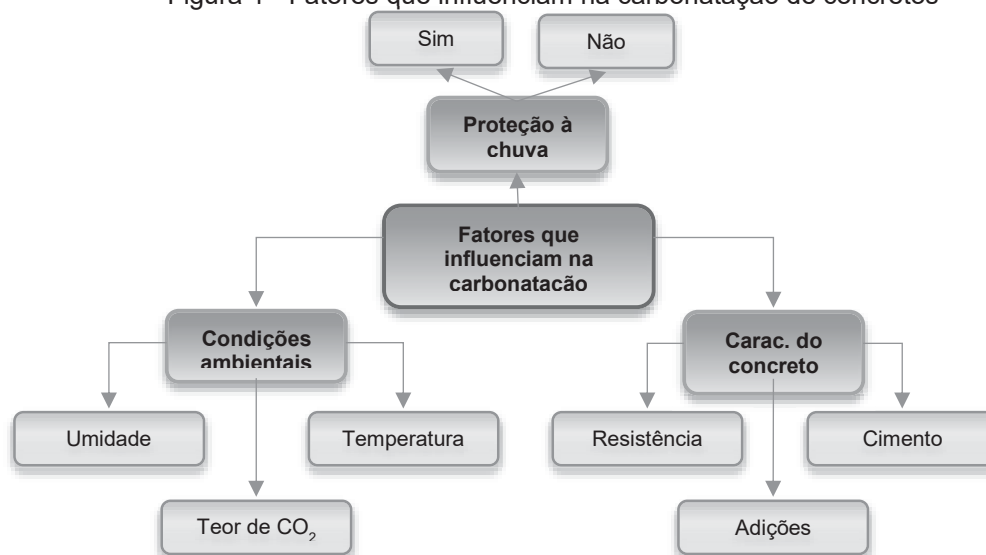
dependem de características físicas e químicas do concreto. Enquanto a permeabilidade e estrutura dos poros (tamanho, forma e tortuosidade) são influências físicas, a composição química da pasta de cimento exerce uma influência química (TAYLOR, 1997; NUNES, 2014; MIRANDA, 2018).

Fisicamente, quanto menos poroso o concreto, menos suscetível ele será à degradação por carbonatação. Quimicamente, o concreto será mais resistente ao processo de carbonatação caso haja reserva alcalina suficiente para garantir a estabilidade do pH em um patamar alcalino durante a exposição e ingresso de gás carbônico no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A resistência química é geralmente provida pelo cimento, mas pode ser influenciada pela presença de adições na matriz cimentícia. Adições pozolânicas podem deixar o concreto mais suscetível à carbonatação por consumirem o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento. Já a adição de cal tem o potencial de prover maior alcalinidade ao concreto devido à sua composição rica em óxido de cálcio (MEDEIROS; RAISDORFER; HOPPE FILHO, 2017).

Além das características do concreto, fatores externos como umidade relativa, teor de gás carbônico no ambiente e temperatura também atuam no processo, conforme exposto na Figura 1.

Figura 1 - Fatores que influenciam na carbonatação de concretos



FONTE: Adaptado de Possan (2010)

Um outro efeito adverso da carbonatação em estruturas de concreto é o aumento da acidez da peça, o que compromete a película protetora do aço presente

no interior do concreto, deixando-o suscetível à deterioração por corrosão (CASCUDO, 1997).

A corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado é um tema amplamente abordado na literatura. Isso se explica devido ao risco estrutural associado a esse processo, ao volume de casos registrados, ao custo associado à reparação das estruturas, bem como à aparição do problema em estruturas cada vez mais novas (MEIRA, 2017).

Esse cenário evidencia a importância do cimento para a durabilidade do concreto, uma vez que ele contribui tanto para a proteção do aço contra a corrosão, quanto para prevenir a carbonatação.

Tendo em vista o elevado consumo de cimento tradicionalmente necessário ao CAA, na faixa de 350 a 450 kg/m³ (EFNARC, 2005), assim como o objetivo de se garantir um concreto pouco poroso, com uma reserva alcalina elevada o suficiente para proteger o aço dos efeitos da carbonatação, bem como o cenário ambiental atual, que impõe uma redução da emissão de gases do efeito estufa, a aplicação de técnicas de empacotamento de partículas é uma alternativa para conciliar esses pré-requisitos.

Apesar dos benefícios econômicos e ambientais associados à redução do consumo de cimento, o comportamento de um concreto com baixo teor de cimento deve ser estudado frente ao processo de carbonatação. Ações para mitigar a evolução da reação deletéria, como a adição de cal, devem ser igualmente investigadas, de forma a garantir aplicabilidade e durabilidade das estruturas.

1.2 OBJETIVOS

Propor misturas de CAA com baixo teor de clínquer e resistentes à carbonatação, dosadas por empacotamento de partículas.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Avaliar a eficiência do coeficiente de distribuição $q=0,25$, usado no modelo de Alfred, na produção de CAA;
- Desenvolver um código computacional em Python para viabilizar a utilização do modelo de Alfred, método de Monte Carlo e método dos mínimos quadrados;
- Avaliar o efeito da cal nas propriedades do CAA;

- Comparar o efeito do uso da cal em substituição aos finos e à areia no CAA.

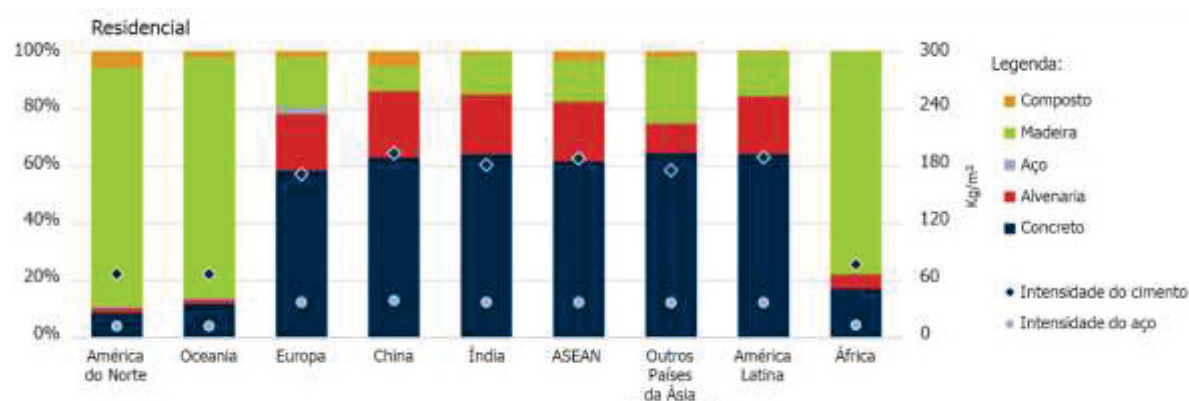
1.3 JUSTIFICATIVA

1.3.1 Ambiental

O concreto é o material construtivo mais utilizado no mundo (PEDROSO, 2009, p.14), sobretudo quando combinado ao aço, formando sistemas de concreto armado ou protendido. Dentre os diversos motivos que o tornam uma alternativa construtiva tão vantajosa e que contribuem para o seu amplo consumo, se destacam suas características de resistência e durabilidade.

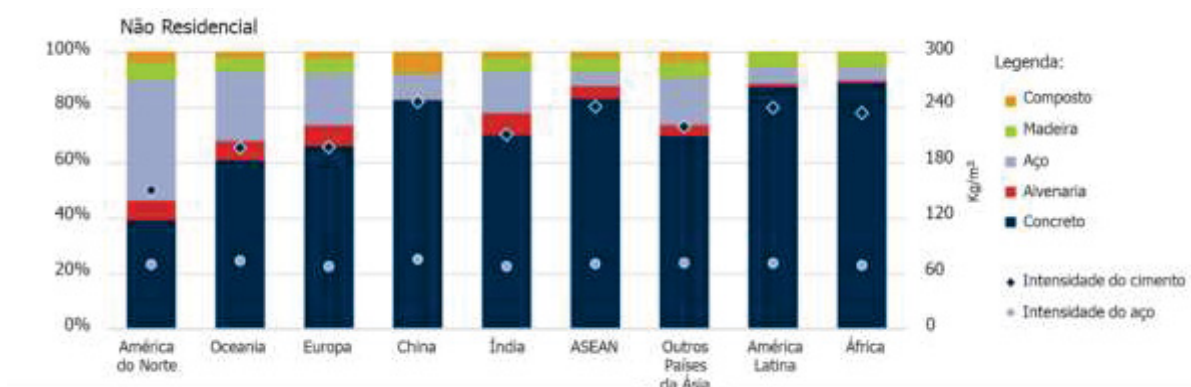
Ao se considerar o consumo de materiais para obras residenciais em diferentes regiões, vê-se que o uso do concreto é expressivo na América Latina, na Ásia e na Europa, conforme visto na Figura 2 a seguir. Já para obras não residenciais, somente a América do Norte destoa como a região onde o concreto não é o material mais utilizado (Figura 3).

Figura 2 - Consumo de materiais para obras residenciais por região do mundo



FONTE: Adaptado de Agência Internacional de Energia (2017)

Figura 3 - Consumo de materiais para obras não residenciais por região do mundo



FONTE: Adaptado de Agência Internacional de Energia (2017)

A problemática socioambiental relacionada ao elevado consumo de concreto pela construção civil é relacionada às emissões de poluentes no processo de fabricação tanto do concreto quanto dos materiais que o compõem.

A emissão de CO₂ proveniente do setor da construção civil tem origem em diversas partes do processo produtivo. Analisar separadamente os componentes presentes em maior volume em dosagens, agregados e cimento, permite uma visão mais detalhada sobre o assunto.

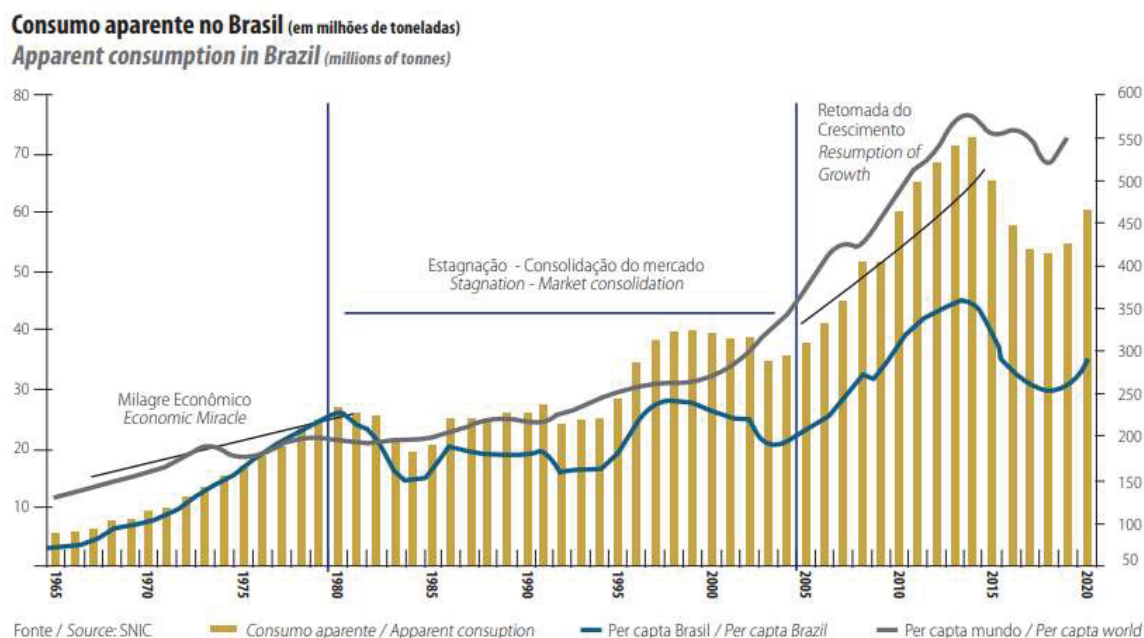
A emissão de poluentes relacionada aos agregados tem origem principalmente nos processos de extração e de transporte. Estes são responsáveis por cerca de 20% das emissões de CO₂ relacionadas à produção de concreto. Já o cimento responde por cerca de 80% das emissões totais, o que se deve principalmente à fase de calcinação em seu processo produtivo (FLOWER; SANJAYAN, 2007; LONG *et. al.*, 2017). Comparadas com os agregados e com o cimento, as emissões de CO₂ advindas dos demais componentes do concreto podem ser consideradas desprezíveis (FLOWER; SANJAYAN, 2007 e LONG *et. al.*, 2017).

Quanto às emissões dos processos de mistura, transporte, lançamento e acabamento do concreto, estas são poucas vezes consideradas na literatura por se tratar de uma variável pouco uniforme, de difícil estimativa (MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO JR, 2019).

Além disso, mesmo levando em conta períodos de estagnação ou revezes econômicos, o consumo de cimento tem sido crescente, como se pode observar a partir de dados do relatório SNIC (2020), ilustrados na Figura 4. Essa tendência,

associada ao grande impacto ambiental da produção do cimento, justifica a busca por meios de se reduzir a proporção de cimento na fabricação de concretos.

Figura 4 - Evolução do consumo em milhões de toneladas de cimento no Brasil



Fonte: Relatório SNIC (2020)

Tendo em vista o impacto ambiental relacionado ao cimento, o elevado custo deste quando comparado aos outros componentes do concreto, e sua durabilidade inferior à de uma rocha natural, uma estratégia para mitigar o impacto ambiental é dosar uma boa estrutura granular, permitindo uma redução do volume de pasta e, conseqüentemente de clínquer, demandado pelo concreto (FENNIS; WALRAVEN, 2012; WONG *et al.*, 2013).

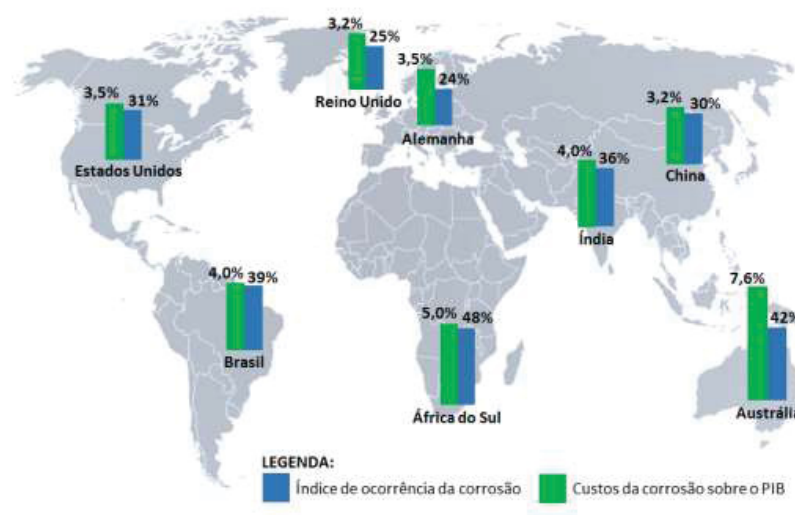
1.3.2 Técnico econômica

As demandas socioeconômicas por infraestrutura criaram novas exigências para a construção civil (JOSA; AGUADO, 2019). Isso fica evidente ao se observar a elevada taxa da população que habita centros urbanos. No Brasil, estima-se que cerca de 84,72% da população more em cidades (IBGE, 2015). Já no mundo, a proporção estimada atual é de 55%, enquanto se prevê que em 2050 esse número seja de aproximadamente 70% (ONU, 2019). Esse quadro evidencia a necessidade de uma infraestrutura urbana capaz de comportar tal expansão.

O concreto é considerado um material extremamente durável, principalmente se houver ações de manutenção sistemática e programada. Segundo Grochoski e Helene (2008), as estruturas de concreto têm potencial para apresentarem vida útil muito superior a 50 anos. Porém, devido ao aumento de processos de deterioração precoces e à necessidade de intervenções corretivas nos primeiros anos de idade da estrutura, os investimentos em reparo e manutenção refletem um cenário inverso à expectativa positiva de durabilidade.

O processo de corrosão, que, quando relacionado à carbonatação, é intimamente ligado ao teor de cimento utilizado, é observado em diversos países. Essa manifestação patológica gera custos de manutenção (*World Corrosion Organization, 2017 apud. FELIX, 2018*) conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Índice de ocorrência de corrosão e custo relacionado à deterioração em relação ao PIB



FONTE: Felix (2018)

O custo do CAA tem a tendência de ser superior ao do CCV. Isso se dá devido à necessidade de maior quantidade de finos em sua composição para garantir a fluidez característica do CAA à mistura, sendo que parte significativa dos finos é composta tradicionalmente pelo cimento. Segundo o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), o custo associado a um metro cúbico de CAA é 14,5% superior ao do CCV de mesma classe de resistência no Paraná (SINAPI, 2020).

Apesar do custo superior, o uso do CAA apresenta menor agressividade para os colaboradores da obra alocados na concretagem quando comparado com o CCV.

Segundo Costa e Cabral (2019), devido à não utilização de vibrador, houve uma redução de cerca de 10% dos ruídos da obra por eles estudada. Os autores ainda explicam que o uso de CAA propiciou uma concretagem 84,5% mais rápida com redução de 60,9% do custo relacionado à mão de obra.

Ainda em relação à redução de ruídos, Nunes (2001) explica que o ruído originado pelo uso de vibradores em um ambiente fechado (interior de uma fábrica) pode ser superior a 100 dB. Devido à dispensa do uso de vibrador para adensamento do CAA Bartos e Söderlind apud. Alencar (2008) apontam que o uso do CAA pode representar uma geração de ruído 90% inferior à de outros tipos de concreto.

Como discutido anteriormente, a redução do consumo de cimento é uma possível abordagem para reduzir custos e impacto ambiental do CAA. Para essa solução ser eficiente, as propriedades que caracterizam o CAA devem ser mantidas, assim como sua durabilidade deve ser observada. Para isto, é necessário aumentar o teor de finos, reativos ou não, de menor custo associado, a partir de processos de dosagem adequados. É necessário também realizar uma avaliação da durabilidade do concreto resultante, frente à carbonatação.

1.4 ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

No capítulo 1, é feita uma apresentação introdutória do tema, ressaltando os principais pontos abordados no trabalho. Na sequência se explica quais foram os objetivos da pesquisa, bem como sua justificativa.

No capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica do CAA, de adições, dos métodos de dosagem de CAA, do empacotamento de partículas, e da durabilidade de concretos frente à deterioração por processo de carbonatação.

No capítulo 3, são apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho e sua caracterização, assim como o método de dosagem utilizado, os ensaios para avaliação das propriedades dos concretos no estado fresco, endurecido e durabilidade.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos, bem como uma análise comparativa destes.

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho, bem como são feitas sugestões para continuidade de trabalhos futuros.

2 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

A formulação da revisão bibliográfica deste capítulo teve como base um método de revisão sistemática da literatura, o *Methodi Ordinatio* de Paganini, Kovaleski e Resende (2015), que é explicado no Apêndice 1.

2.1 CONCRETO AUTO ADENSÁVEL

O CAA, apesar de possuir propriedades bem definidas que o caracterizam e diferenciam de outros tipos de concreto, ele pode ser dosado de diversas formas com uma ampla variedade de componentes. Nesse tópico serão discutidas as principais características desse tipo de concreto, métodos de dosagem e composição.

2.1.1 Características e propriedades

Nos anos 70 e 80, a busca por concretos de alta trabalhabilidade na Europa resultou no desenvolvimento de diversas misturas, conhecidas comercialmente como concreto autocompactável, autonivelante, ou reoplástico (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Como resposta, em 1988, no Japão, foi desenvolvido o concreto auto adensável (CAA) (OKAMURA; OUCH, 1999).

Segundo o Guia Europeu para Concreto Auto Adensável (EFNARC, 2005) o CAA é definido como um concreto que não necessita de vibração no processo de concretagem. Isso se dá pela sua habilidade de fluir pela ação de seu próprio peso. Por contribuir para um adequado preenchimento de formas estruturais, proporcionando a fabricação de estruturas monolíticas, o uso deste tipo de concreto é satisfatório em projetos de design arquitetônico arrojado, onde é frequente encontrar peças esbeltas e elevada densidade de armadura.

No estado endurecido, o CAA é denso, homogêneo e apresenta as mesmas características que um concreto convencional vibrado (CCV). A vantagem associada ao CAA se dá por três propriedades suas no estado fresco: fluidez, habilidade passante e resistência à segregação.

Essas propriedades propiciam maior facilidade ao processo construtivo. No Brasil, a NBR 15823 (ABNT, 2017) relaciona os ensaios que avaliam cada uma dessas características.

A fluidez garante a habilidade de preencher todos os espaços, e é medida pelo ensaio do Anel J. Já a habilidade passante, avaliada pelo ensaio do Funil V, proporciona ao concreto a capacidade de passar entre os obstáculos, como armadura e diversos formatos de forma, sem obstrução de seu fluxo. Por fim, a resistência à segregação, que é avaliada pelo ensaio de espalhamento (slump flow), assegura a homogeneidade e coesão da mistura, isto é, as partículas graúdas são mantidas em suspensão (GOODIER, 2003; GOMES; BARROS, 2009).

Quanto à sua composição, o CAA contém em essência os mesmos materiais utilizados na fabricação de concretos convencionais (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). Um traço de CAA se diferencia de um de CCV por sua maior quantidade de finos - cimentos, adições inertes ou reativas -, e pelo emprego usual de aditivo redutor de água, aqui entendido segundo a definição da NBR 11768 (ABNT 2019) para o que anteriormente se conhecia como “superplastificante”.

As adições tipicamente empregadas incluem cinza volante, sílica ativa, escória de alto forno, e fillers. Associadas ao cimento, elas compõem a parcela de finos que garantem uma maior resistência à segregação do CAA, por regular a viscosidade plástica da mistura. As adições também podem ser usadas para controlar o calor de hidratação e a retração térmica associadas ao cimento (EFNARC, 2005).

Os agregados utilizados na mistura também têm influência nas propriedades do CAA. É conveniente o uso de agregados miúdos pouco angulosos, para aumentar a fluidez a mistura. Para garantir a habilidade passante do concreto deve-se restringir a dimensão máxima característica dos agregados graúdos, que deve ser definida a partir da esbeltes das peças a serem concretadas e espaçamento da armadura. (OKAMURA; OUCHI, 2003; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Enquanto em indústrias de pré-moldados a aplicação do CAA já é consolidada (TUTIKIAN et. al., 2006), em obras verticais seu uso é menos difundido. A menor popularidade deste concreto, em relação ao CCV, pode ser explicada por seu custo superior por metro cúbico (LE et. al., 2015). Costa e Cabral (2019) afirmam que essa comparação considera apenas os custos do concreto, e não os custos globais da obra.

O custo superior do CAA se deve ao alto consumo de finos (cimento e adições) necessário para garantir suas características básicas. Além de elevar os custos de produção, isso traz como desvantagem um elevado potencial de emissão de gases de efeito estufa (MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO JR, 2019). Em 2003, a

indústria cimenteira foi responsável por 5% das emissões de CO₂ do mundo (BERNSTEIN et. al., 2007).

Considerando essas questões, a redução do consumo de cimento na dosagem do CAA é uma alternativa para tornar esse tipo de concreto mais competitivo e eco-eficiente. Neste cenário, o processo de dosagem deve ser cuidadosamente observado, para que não sejam afetadas as propriedades desejáveis do CAA no estado fresco.

2.1.2 Dosagem

O desenvolvimento do CAA se deu ao final da década de 1980 no Japão com o intuito de otimizar o procedimento de lançamento do concreto e melhorar a durabilidade das estruturas (GOODIER, 2003). Apesar de não se tratar de uma tecnologia recente, ainda não há consenso na comunidade científica sobre um método de dosagem que seja o mais adequado para esse tipo de concreto (SEBAIBI et. al., 2013, KANADASAN; RAZAK, 2014 e SHI et. al., 2015).

O procedimento de dosagem do CAA, assim como de outros tipos de concreto, pode ser desenvolvido a partir de diferentes abordagens. Os diversos métodos disponíveis na literatura podem ser agrupados conforme características em comum. É possível categorizar os métodos de dosagem em cinco grupos: métodos empíricos, de resistência à compressão, estatísticos de modelos fatoriais, de características reológicas da pasta e de dosagem por empacotamento de partículas (SHI et. al., 2015 e ASHISH; VERMA, 2018). Os autores Ashish e Verma (2018) defendem ainda que há um sexto grupo, o de métodos de dosagem ecológica. A seguir são descritos os princípios que governam cada um desses grupos.

- Métodos empíricos

O desenvolvimento dos métodos empíricos possui como base dados acerca das características dos materiais e, em alguns casos, as proporções limite previamente determinadas (pelos autores de cada método desse grupo). As informações acerca dos materiais que constituirão o concreto são obtidas de forma empírica. Para essa etapa são estudadas as características físicas como granulometria, porcentagem de material pulverulento, absorção entre outras. Nessa

mesma etapa podem também ser estudadas características químicas como composição do cimento e adições ou ainda a reatividade dos agregados (SHI et. al., 2015).

A partir das características dos materiais componentes, das propriedades requeridas para o concreto e do embasamento teórico são estimadas as proporções para a mistura inicial. Essa primeira mistura é testada e a partir dos resultados obtidos ajustes são realizados na dosagem. Novas misturas são testadas até atingir os requisitos inicialmente estipulados (SHI et. al., 2015). O método apresentado pelos autores Edamatsu, Nishida e Ouchi (1999), Okamura e Ouchi (2003), Tutikian (2004), Domone (2009) e Khaleel e Razak (2014) pertencem à essa classificação. A utilização desse grupo é vantajosa devido à simplicidade de execução. A desvantagem advém do elevado tempo de laboratório necessário, além de que, em caso de mudanças das propriedades dos materiais constituintes, há necessidade de retrabalho (SHI et. al., 2015 e ASHISH; VERMA, 2018).

- Métodos de resistência à compressão

A dosagem por métodos do grupo da resistência à compressão é baseada no requisito de resistência mecânica para definir quantidades e proporções dos materiais constituintes. Além da resistência à compressão, características dos agregados também são dados de entrada. Para esse grupo de métodos o uso de adições pozolânicas é comum. A partir dos dados de entrada determina-se as proporções da dosagem de maneira teórica. Produz-se então o concreto e ajustes nas quantidades dos materiais são feitos para atender a resistência à compressão estipulada inicialmente, assim como os requisitos estipulados para o estado fresco e endurecido (SHI et. al., 2015). Os métodos apresentados pelos autores Wu et. al. (2009), Ghazi e Jadirial (2010) e Dinakar, Sethy e Sahoo (2013) baseiam-se na resistência à compressão.

A vantagem associada à utilização dos métodos do grupo de resistência à compressão é a simplicidade e redução de trabalho de laboratório. Além disso, a metodologia leva em consideração a gradação dos agregados graúdos e miúdos assim como a contribuição de adições pozolânicas. A desvantagem associada a esse grupo é a necessidade de ajuste experimental das quantidades dos materiais

componentes para atingir as propriedades estipuladas (SHI et. al., 2015; ASHISH; VERMA, 2018).

- Princípio estatístico de modelo fatorial

O grupo de dosagem que parte do princípio estatístico de modelo fatorial consiste no uso de ferramentas estatísticas para refinar as proporções a serem testadas empiricamente. Essa abordagem também possibilita a análise da atuação de diferentes variáveis nas propriedades do CAA, levando em consideração a interferência exercida pelos componentes do concreto em suas propriedades finais de interesse (SHI et. al., 2015 e ASHISH; VERMA, 2018). O método apresentado pelos autores Khayat, Ghezal e Hadriche (1999), Ghezal e Khayat (2002), Sonebi, Bahadori-Jahromi e Bartos (2003), Sonebi (2004) e Long et. al. (2015) pertencem a essa categoria.

A principal vantagem associada ao grupo de dosagem pelo princípio estatístico fatorial é a possibilidade de análise da influência de diversos parâmetros nas propriedades do concreto. Essa característica é vantajosa pois pode facilitar o processo de dosagem e controle de qualidade de concretos com propriedades específicas que dependam de diversas variáveis. Para tanto, é necessário estabelecer correlações estatísticas entre os materiais constituintes e as propriedades estudadas. Essa necessidade acaba sendo uma desvantagem por demandar intensa testagem laboratorial (SHI et al., 2015).

- Métodos baseados nas características reológicas da pasta

O grupo de métodos baseados nas características reológicas da pasta parte do princípio de que essas propriedades ditam as características do CAA no estado fresco. Para esse tipo de dosagens uma sequência intensiva de ensaios é realizada na pasta para prever o comportamento do CAA. É verificado o atendimento às propriedades inicialmente estipuladas ao concreto. Esse grupo também considera no processo de dosagem a quantidade e propriedades físicas relacionadas aos agregados como distribuição granulométrica e diâmetro máximo (ASHISH; VERMA, 2018). Os concretos dosados pelos autores Saak, Jennings e Shah (2001), Bui,

Akkaya e Shah (2002), Wu e An (2014) e Jiao et. al. (2018) apresentam em seus trabalhos dosagens pertencentes a esse grupo.

A vantagem associada a esse grupo de métodos é a redução de trabalho laboratorial e consumo de materiais (SHI et al., 2015). A desvantagem desse grupo de métodos é a necessidade de equipamentos laboratoriais diferenciados, como reômetro, para o desenvolvimento da dosagem.

- Métodos de empacotamento de partículas

A dosagem pelo método de empacotamento de partículas consiste em proporcionar os agregados de forma a obter o mínimo de espaços vazios possível (ASHISH; VERMA, 2018). Essa metodologia de dosagem apresenta como característica base o estudo preliminar dos materiais componentes. Para tal, são obtidas informações como distribuição granulométrica, fator de empacotamento e forma entre outros. Após essa primeira fase, o desenvolvimento do método se dá pela aplicação de conceitos e fórmulas que visam reduzir espaços vazios assim como também possibilitam o consumo consciente de materiais na composição do CAA (SHI et al., 2015). Alguns autores que utilizam métodos de dosagem pertencentes a esse grupo são Sedran e De Larrard (1999), Su, Hsu e Chai (2001) e Sebaibi et. al., (2013). Esse método compõe o escopo deste trabalho, portanto, será abordado mais detalhadamente a seguir, no item 2.2, Empacotamento de partículas.

- Métodos de dosagem ecológica

O método de dosagem ecológica tem como um dos objetivos principais a redução de emissão de poluentes na atmosfera. A dosagem por esse método envolve a redução do consumo de cimento e uso de adições minerais. Em algumas dosagens há uma busca por um elevado empacotamento dos agregados de forma a, conseqüentemente, minimizar o efeito negativo da redução do consumo de cimento (ASHISH; VERMA, 2018). Os trabalhos dos autores Fennis (2011) e Matos, Sakata e Prudêncio Jr (2019) fazem parte desse grupo de dosagem. O grupo de dosagem ecológica pertence ao escopo deste trabalho, portanto, será abordada com mais profundidade a seguir, no item 2.3 - Baixo teor de clínquer.

2.1.3 Teor de clínquer

Apesar de haver uma grande diversidade de métodos de dosagem na literatura, o objetivo central de todos os grupos consiste em garantir características básicas para o CAA. Como principais objetivos pode-se citar a resistência à segregação, capacidade de preenchimento e habilidade passante. A fim de garantir essas propriedades, uma elevada quantidade de finos na composição do concreto é necessária. Além do cimento, adições também são grandes aliadas na composição da estrutura fina do CAA.

Além da falta de um método amplamente aceito no meio científico para dosagem há um segundo fator negativo relacionado ao CAA, o elevado consumo de cimento. A seguir, na Tabela 1, são apresentados consumos de cimento e adições de alguns trabalhos de dosagem de CAA. Ressalta-se que os dados foram arredondados.

Tabela 1 - Comparação entre o consumo de cimento e adições e resistência à compressão de dosagens encontradas na literatura

Autor	Consumo cimento (kg/m³)	Adições	Consumo adições (kg/m³)	Resistência à compressão 28 dias (MPa)	Cimento + adição total (kg/m³)
Billberg, Petersson e Osterber (1999)	405 - 415	PC	121 - 180	62 – 69	526 - 595
Humehara <i>et. al.</i> (1999)	341 - 360	E	150 - 266	-	500 - 607
Mizobuchi <i>et. al.</i> (1999)	302 - 533	PC	319 - 333	24 – 32	653 - 872
Shi e Wu (2005)	336 - 420	CV; O*	66 - 165	36 - 39	567 - 585
Felekoğlu, Türkel e Baradan (2007)	377	PC	239 - 272	36 – 56	616 - 649
Yazıcı (2008)	180 - 600	CV; S	0 - 360	28 – 61	540 - 600
Sukumar, Nagamani e Raghavan (2008)	250 - 583	CV	50 - 275	40 – 81	525 - 633
Corinaldesi e Moriconi (2011)	440	CV; PC; O**	100 - 120	29 – 44	540 - 560
Khaleel e Razak (2014)	468 - 520	M	52	70 - 94	520
Nepomuceno <i>et. al.</i> (2016)	279 - 290	PC	362 - 377	53 – 57	641 - 667
Ma <i>et. al.</i> (2017)	350 - 388	CV; E	76 - 90	45 – 58	507 – 562

FONTE: A autora

LEGENDA: CV – Cinza Volante; E – Escória; M – Metacaulim; PP – Pó de Pedra; PC – Pó Calcário; S - Sílica ativa; O – Outras; * – Pó de vidro, ** - Pó de borracha

A partir da Tabela 1 é possível observar que, para os estudos listados, o consumo de cimento em sua maioria foi superior a 300 kg/m^3 . Já o consumo de cimento foi, em sua maioria, também superior a 500 kg/m^3 . A justificativa para esse padrão de consumo é a necessidade elevada quantidade de pasta para envolver os agregados e garantir a trabalhabilidade necessária ao CAA.

Além das propriedades no estado fresco, a resistência à compressão também é influenciada pelo consumo de cimento e adições. No entanto, é possível observar pela tabela que, dentre trabalhos apresentados, a resistência à compressão variou de 24 MPa a 94 MPa, mesmo com a média de consumo de cimento de 560 kg/m^3 .

Tendo em vista o consumo de cimento e a resistência mecânica é possível levantar a hipótese sobre um uso excessivo de materiais reativos em algumas dosagens. Nesse sentido, é possível uma otimização da dosagem. A otimização deve reduzir o consumo de cimento e adições, ainda sim, mantendo as propriedades necessárias ao CAA, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

- Baixo teor de clínquer

Tendo em vista o grande impacto ambiental relacionado ao emprego do cimento, a redução do consumo desse material é muitas vezes o foco dos trabalhos com propostas de eficiência ecológica. A vertente de dosagem que busca a redução do consumo de cimento é a dosagem ecológica (ASHISH E VERMA, 2018). Vale ressaltar que a concepção de um concreto ecológico pode variar desde um concreto que emita menos gases do efeito estufa que um concreto convencional a um concreto que utilize materiais reciclados em sua formulação (FENNIS, 2011). Nesse trabalho, o objeto de estudo são apenas as dosagens com possível redução da emissão de gases do efeito estufa a partir da redução do consumo de cimento.

A caracterização de uma dosagem como ecológica pode ser realizada de diversas maneiras. Em relação ao consumo de cimento Esmailkhanian, Khayat e Wallevik (2017) afirmam que para a dosagem de um traço de CAA ser considerada ecológica o consumo deve ser igual ou inferior a 315 kg/m^3 , para um cimento de massa específica de $3,15 \text{ g/cm}^3$ sem adições.

Além da quantidade de cimento, uma forma comum de avaliação da eco eficiência é emissão de gases do efeito estufa. Os fatores considerados no cálculo

são variáveis, dependendo do objetivo de cada autor. Wallevik *et. al.* (2014) apud Esmailkhanian, Khayat e Wallevik (2017) afirma que, para ser considerado ecológico, um concreto deve emitir até 250 kg de CO₂ considerando todo o processo de produção. Essa quantidade deve englobar as emissões desde a fabricação dos insumos para o concreto até seu lançamento e acabamento.

Uma outra maneira de avaliar a eco eficiência é por meio do potencial de aquecimento global (GWP, do inglês, *Global Warming Potential*). Esse método é utilizado pelos autores Esmailkhanian, Khayat e Wallevik (2017) e Proske *et. al.* (2013) e relaciona a quantidade de CO₂ emitida para produzir 1 m³ de concreto. A determinação do GWP se dá pela soma da emissão de CO₂ da produção de cada material que constitui o concreto. A aplicação do GWP pode levar em consideração uma parcela (os mais significativos em termos de emissão de poluentes) ou todos os componentes do concreto estudado.

Damineli *et. al.* (2010) propõe em seu trabalho uma análise da eco eficiência que leva em consideração os fatores BI e CI. O fator BI (intensidade do aglomerante, do inglês, *Binder intensity*) relaciona a quantidade de cimento necessária para prover um MPa de resistência. Já o fator CI (intensidade de carbono, do inglês, *CO₂ intensity*) relaciona a quantidade de CO₂ emitida (GWP) para fornecer uma unidade de performance (geralmente resistência à compressão). Esse método de avaliação é utilizado pelos autores Pelisser, Vieira, Bernardin (2018), Long *et. al.* (2017), Matos, Sakata e Prudêncio Jr (2019) e Esmailkhanian, Khayat e Wallevik (2017).

Pelisser, Vieira, Bernardin (2018) abordam em seu estudo o consumo de cimento por MPa. Os autores explicam que para concretos de baixa resistência, cerca de 25 MPa, o fator BI é maior quando comparado a concretos de resistência elevada. Os autores obtiveram como resultado um BI de 10,2 kg m⁻³. MPa⁻¹ para um concreto de 28,6 MPa e um BI de 7,8 kg m⁻³. MPa⁻¹ para o concreto de 67,2 MPa.

Matos, Sakata e Prudêncio Jr (2019) realizaram a análise da eco eficiência de duas maneiras, a partir do fator BI (DAMINELI *et. al.*, 2010) e pela determinação da massa de CO₂ emitida. Os autores consideraram para o cálculo apenas as emissões provenientes dos aglomerantes para produção de 1 m³ de concreto devido à maior participação desses componentes.

Ainda que haja esforço da comunidade científica em analisar e reduzir o consumo de materiais com elevado potencial poluente para fabricação do concreto, essa tarefa é especialmente mais complexa quando se trata do CAA. Esse tipo de

concreto requer muitas vezes um elevado consumo de cimento (Long *et. al.*, 2017). Esse cenário é confirmado por prescrições normativas tais como da EFNARC (2005) que recomenda, um consumo de cimento para o CAA de 400 – 600 kg/m³.

Proske *et. al.* (2014) afirma que para as dosagens ecológicas há três princípios básicos. O primeiro é a escolha do cimento que deve ser de uma classe de elevada resistência, podendo ou não conter adições. O segundo passo é a redução da quantidade de água e materiais cimentícios na composição da pasta. O terceiro passo consiste na otimização do consumo de pasta.

Para assegurar as propriedades requeridas ao CAA e ainda atender ao consumo de cimento de uma dosagem ecológica (redução das emissões de CO₂), a utilização de adições (ou materiais cimentícios suplementares) é indispensável (NGUYEN *et. al.* 2018).

Outra estratégia que pode ser utilizada para esse fim é lançar mão às técnicas de empacotamento de partículas para produzir concreto com porosidade reduzida (ESMAEILKHANIAN; KHAYAT; WALLEVIK, 2017). Partindo da teoria de empacotamento, um ponto importante relacionado ao sucesso do concreto ecológico é a densidade de empacotamento. Quanto menor o teor de vazios menor será o volume de pasta necessário (FENNIS, 2011).

A aplicação de técnicas de empacotamento, no sentido de aumentar a densidade de empacotamento dos agregados, para um determinado teor de pasta, promove um aumento da lubrificação da fase granular do concreto. Já para um determinado requisito de trabalhabilidade, a densificação do esqueleto granular permite a redução do consumo de pasta (LI; KWAN, 2013). A partir da aplicação desse conceito, Wang *et. al.* (2014) obtiveram uma redução de até 20% do consumo de clínquer na dosagem do CAA.

Um outro ponto que argumenta a favor da redução do consumo de cimento é que esse material por vezes não é completamente hidratado no interior do concreto. Essa situação ocorre preferencialmente em concretos de ultra elevada performance, sendo que a taxa de hidratação do cimento é em torno de 30% a 40%. Nessas condições o cimento passa a assumir o papel de um agregado fino (KORPA; KOWALD; TRETTIN, 2009; YANG *et. al.*, 2019).

É evidente que para atingir o objetivo de uma dosagem eco eficiente mais de um caminho pode ser tomado. A seguir, na Tabela 2, são listados trabalhos acadêmicos que tratam sobre dosagem ecológica.

Tabela 2 - Trabalhos de dosagem eco eficiente

Autor	Consumo Cimento (kg/m³)	Adições	Cimento + adições Totais (kg/m³)	Dosagem por empacotamento	Redução Emissão de CO₂
Proske <i>et. al.</i> (2013)	240 - 270	CV, PC, S	320 - 580	Sim	35%
Proske <i>et. al.</i> (2014)	125 - 200	CV; PC, E	400 - 440	Sim	65%
Wang <i>et. al.</i> (2014)	311	CV	415	Sim	20%
Esmailkhanian, Khayat e Wallevik (2017)	196 - 271	SA; CV; PC	278 - 312	Sim	30%*
Long <i>et. al.</i> (2017)	152 - 380	CV	320 - 380	Sim	34%
Pelisser, Vieira e Bernardin (2018)	222 - 314	M, CV	270 - 385	Sim	-
Matos, Sakata e Prudêncio Jr (2019)	255 - 365	CV	365	Sim	-

FONTE: A autora

LEGENDA: CV – Cinza Volante; E – Escória; M – Metacaulim; PC – Pó Calcário; S - Sílica ativa; * – Cálculo realizado pelo autor; - : Não apresentado pelo autor

É possível observar na Tabela 2 que os consumos de cimento são, em sua maioria, na faixa de 150 a 300 kg/m³. Já o consumo total de cimento + adições apresenta uma variação mais pronunciada, isso é, de cerca de 300 a 600 kg/m³. Em contrapartida, os dados apresentados na Tabela 2 (item 2.1), que não são concretos ecológicos, apresentam, em sua maioria, consumo de cimento acima de 300 kg/m³ e consumo total de cimento + adições superior a 500 kg/m³. Vale ressaltar que todos os traços listados são referentes a CAA e foram e sua maioria dosados por métodos de empacotamento.

A partir dessa análise observa-se a possibilidade de dosagem de um concreto ecológico. Os autores Nielsen e Glavind (2007) e Proske *et. al.* (2014) ainda afirmam que um concreto com baixo teor de cimento pode apresentar performance tão boa quanto concretos dosados tradicionalmente, sendo que algumas vezes a performance pode ser superior.

2.1.4 Adições

As adições que possuem a habilidade de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio quando em presença de água são chamadas de pozolânicas. O grupo de adições composto pelos filers não apresentam atividade química. Os filers promovem apenas o efeito físico de empacotamento granulométrico (DAL MOLIN, 2011; GOBBI, 2014).

A utilização de adições pozolânicas conferem ao concreto uma maior resistência e impermeabilidade. O refinamento da matriz cimentícia, quando há presença de adições pozolânicas, é decorrente da lenta reação que ocorre entre a pozolana e o hidróxido de cálcio. Essa reação promove (lento) desenvolvimento de resistência a partir do preenchimento dos espaços capilares presentes no concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A utilização de adições pozolânicas na composição do concreto apresenta potencial de proporcionar refinamento dos poros que, normalmente, promove uma maior resistência a diversas reações deletérias (VEDALAKSHMI et al.,2003).

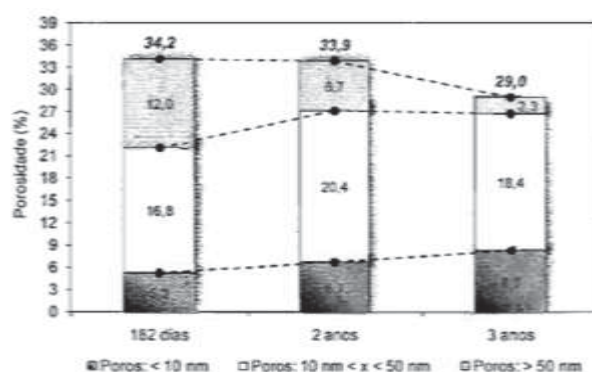
Já a aplicação das adições pertencentes ao grupo dos filers garante um refinamento da matriz cimentícia de forma física. Devido a sua finura característica o filer promove um aumento da densidade da mistura por preencher os vazios deixados pelos outros materiais componentes. A utilização do filer garante também refinamento da estrutura de poros do concreto por restringir os espaços nos quais os produtos de hidratação do cimento podem se desenvolver. A ação física do filer promove também o fortalecimento da zona de transição por interferir na movimentação das moléculas de água (reduzindo a exsudação) assim como por preencher os vazios e interferir no crescimento dos cristais dos produtos de hidratação do cimento (DAL MOLIN, 2011).

O efeito das adições pertencentes ao grupo dos filers podem ser dividido em dois grupos, o de empacotamento e de nucleação. Devido à sua finura o filer é capaz de preencher espaços vazios deixados no esqueleto granular da mistura, isto é, aumentando o empacotamento das partículas (FENNIS, 2012). Já a nucleação se dá pelo alojamento das pequenas partículas de filer nos intrínsecos dos cristais de clínquer promovendo aumento da superfície de contato efetiva acelerando a reação química (devido à sua natureza topoquímica) (CORDEIRO, 2006).

Apesar de positivo, o efeito das adições pozolânicas demandam longo tempo de reação para serem efetivas na redução da porosidade de concretos. Hoppe Filho

e Cincotto (2008) observaram uma queda da porcentagem de poros de diâmetro superior a 50nm de 12% para 2,3% nas idades de 183 dias e três anos, respectivamente. A redução de poros de diâmetro superior a 50nm gera, conseqüentemente, um aumento na porcentagem de poros de diâmetro entre 10 e 50nm de 16,8% para 18,4% assim como para os poros de diâmetro inferior a 10nm, que aumentaram de 5,3% para 8,3% dos poros totais (Figura 6).

Figura 6 - Volume total de vazios e distribuição do diâmetro dos poros de pasta com 50% de cimento CP V ARI e 50% de cinza volante, com relação a/c de 0,45



FONTE: Hoppe Filho e Cincotto (2008)

Conforme apresentado anteriormente as adições apresentam um papel importante na formulação de concretos, principalmente no CAA para garantir suas propriedades no estado fresco.

A cinza volante é constituída de duas frações, uma vítrea, reativa e uma cristalina, inerte. A fração vítrea, que é ligante, é composta por sílico-aluminatos amorfos que quando em presença de meio com pH altamente alcalino, é solubilizada e consome íons. Já a fração inerte, cristalina, é normalmente composta por quartzo, mulita e hematita (FU *et al.*, 2002).

A adição de cinza volante à matriz cimentícia gera efeitos físicos e químicos. Fisicamente a cinza volante disponibiliza pontos extras para precipitação de produtos de hidratação do cimento (CYR; LAWRENCE; RINGOT, 2005; HANEHARA *et al.*, 2001). Quimicamente essa adição consome portlandita para formação de produtos de hidratação secundários (FU *et al.*, 2002).

A sílica ativa é uma adição proveniente das indústrias de ferro e silício. Sua obtenção se dá a partir da oxidação e condensação do silício gasoso (SiO). Surgem então partículas esféricas minúsculas compostas majoritariamente por dióxido de silício (SiO₂). O material é obtido pela filtragem dos gases, normalmente com teor de

SiO₂ superior a 85%. Devido a essa propriedade química, a sílica é considerada uma excelente pozolana que, quando usada no concreto, além de atuar quimicamente também atua de forma física, através do efeito microfíler. Podem ser citados como benefício da utilização da sílica no concreto a redução da porosidade, melhora da zona de transição e aumento da resistência à lixiviação e abrasão devido às suas reações com os produtos de hidratação do cimento (DAL MOLIN; OLIVEIRA, 1996, CAMPOS, 2015).

A cal é um ligante aéreo inorgânico, isso é, é solúvel em água. As cales podem ter sua composição química dividida em três partes: fração reativa, fração potencialmente reativa e a fração inerte. A fração reativa é composta por hidróxidos, tanto de cálcio quanto de magnésio, sendo essa fração responsável pela capacidade ligante da cal. Já a fração potencialmente reativa, os óxidos livres, são assim chamados pois podem hidratar-se durante o manuseio ou armazenamento. Apesar dessa possibilidade, há também o caso de supercalcinação desses óxidos (calcinação à morte) que dificultam seu processo de hidratação ao ponto de esses passarem a pertencer à fração inerte que também é composta por impurezas da rocha e carbonatos (CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2007).

A origem da cal, isso é, a rocha de que se é formada, determina sua composição química. As cales são essencialmente formuladas a partir de rochas calcárias que são compostas por calcita e/ou dolomita em diferentes proporções. A formação dos dolomitos se dá pela substituição do cálcio da calcita (CaCO₃) por magnésio, isso é, a dolomitização do calcário. Essa reação ocorre pela ação da água do mar e é limitada à proporção máxima de 1Ca:1Mg, formando a dolomita [(Ca,Mg)(CO₃)₂], cuja fórmula pode ser escrita também como MgCO₃.CaCO₃, com composição teórica de 45,70% de MgCO₃ e 54,30% de CaCO₃. As proporções de cálcio e magnésio (na forma de óxido ou hidróxido) é mantida nas cales quando essas passam pelo processo de hidratação (de virgem para hidratada) (CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2007).

2.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Os modelos de empacotamento de partículas têm como objetivo estabelecer a correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma a reduzir o volume de vazios do conjunto (OLIVEIRA *et al.*, 2000; FENNIS,

2006). Esse grupo de métodos é amplamente utilizado para redução do consumo de cimento/produção de concreto ecológico, como descrito nos trabalhos de Long *et. al.* (2017), Nanthagopalan e Santhanam (2012), Fennis (2011) e Diederich, Mouret e Ponchon (2013).

Além da redução do consumo de cimento, a abordagem da dosagem pelo empacotamento de partículas pode ser uma solução para viabilização da utilização de agregados reciclados conforme demonstrado por Li *et. al.* (2017) e Pradhan; Kumar; Barai (2017), para utilização de materiais alternativos como proposto por Kanadasan e Razak (2014) ou ainda para otimização da utilização de nano materiais (SBIA *et al.*, 2015), dentre outras aplicações.

O conceito de empacotamento pode ser compreendido como um esqueleto granular seco formado por partículas maiores, os agregados, em que os vazios que são preenchidos pela pasta composta de cimento, fração fina dos agregados, adições, aditivos e água. Dentre os materiais que o compõe, a matriz cimentícia é mais cara e produz um maior impacto ambiental a partir de sua produção (FLOWER; SANJAYAN, 2007 e LONG *et. al.*, 2017). A estratégia para mitigar esses malefícios é a dosagem de um esqueleto granular com a máxima densidade de empacotamento, reduzindo assim, o consumo de pasta (WONG *et al.*, 2013).

Quando aplicado à dosagem de concretos, esse conceito se refere à escolha adequada da quantidade e proporção dos materiais granulares que compõe seu esqueleto granular, levando em consideração o tamanho das partículas que o compõe. Tal escolha visa selecionar materiais e/ou proporção entre determinados materiais que preencham, sucessivamente, os espaços vazios deixados pelas partículas de maior dimensão de forma a aumentar a densidade de empacotamento (φ) (McGEARY, 1961; FENNIS; WALRAVEN, 2012).

A densidade de empacotamento (ou grau de empacotamento) pode ser definida como o volume de sólidos presente em uma unidade de volume, podendo também ser definido como um menos o volume de vazios (e) do volume estudado (STOVALL; DE LARRARD; BUIL, 1986; SBIA *et al.*, 2015), conforme expressado a seguir (Equação 1):

$$\varphi = \frac{V_s}{V_t} = \frac{V_s}{(V_s+V_e)} = 1 - e \quad (\text{Eq.1})$$

Onde,

V_s – Volume de sólidos;

V_t – Volume total;

V_e – Volume de vazios;

e – Porosidade (V_e/V_t).

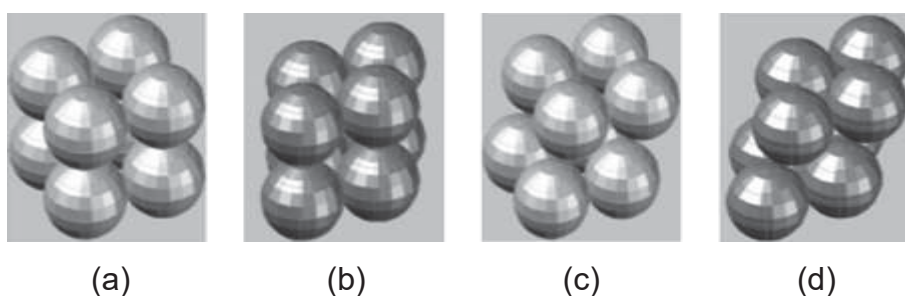
A relevância dessa medida para a dosagem de concretos está relacionada ao consumo de pasta, isso é, a densidade de empacotamento governa a quantidade de pasta necessária para preencher os vazios deixado pelos agregados, lubrificar e prover trabalhabilidade à mistura (MEHDIPOUR; KHAYAT, 2018).

O grau de empacotamento de grãos é influenciado tanto por sua granulometria quanto pela sua morfologia. A proporção de cada material que compõe a mistura, sua granulometria, características morfológicas e consequentes interações entre as partículas definem o grau de empacotamento da mistura. A determinação das características das partículas assim como o procedimento de dosagem a partir de tais informações pode ser abordado a partir de diferentes estratégias encontradas na literatura.

Para Castro e Pandolfelli (2009), de uma forma geral, o empacotamento aleatório de partículas esféricas de mesmo diâmetro resulta em uma mesma densidade de empacotamento que pode variar entre 0,60-0,64, aproximadamente. Porém uma série de fatores pode alterar o empacotamento de um determinado conjunto de partículas.

Em uma situação de empacotamento ordenado de partículas esféricas, é possível obter um grau de empacotamento maior. Para arranjos cúbicos e tetraédricos (Figura 7) é possível obter densidades de empacotamento na faixa de valor de 0,52 a 0,74 (KLEIN, 2012; SBIA *et al.*, 2015).

Figura 7 - Densidade de empacotamento de diferentes arranjos de partículas esféricas: (a) 0,524; (b) 0,605; (c) 0,740 e (d) 0,749

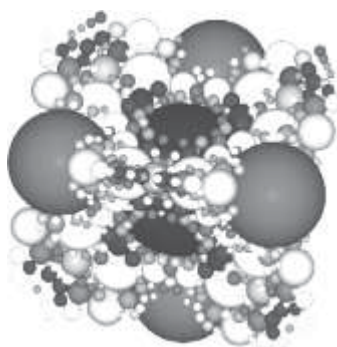


FONTE: Klein (2012)

Considerando o benefício relacionado à redução da porosidade para a durabilidade do concreto, a utilização de partículas de mesmo diâmetro não é a melhor alternativa. Apesar da possibilidade de obtenção de uma densidade de empacotamento de até 0,749 (KLEIN, 2012), esse valor não é aplicável à uma situação real pois é impossível organizar as partículas que compõe o concreto.

Tratando de situações reais, o aumento da densidade de empacotamento pode ser atingido a partir da utilização de partículas de diferentes tamanhos, permitindo atingir densidades de empacotamento superiores (Figura 8) à do empacotamento de uma mistura monodispersa intencionalmente organizada.

Figura 8 - Mistura de partículas de diferentes dimensões



FONTE: Sbia *et al.* (2015)

2.2.1 Dosagens por empacotamento

Os métodos de dosagem de concretos por empacotamento de partículas propostos na literatura são divididos em duas linhas principais: os modelos de otimização de curvas granulométricas (contínuos) e os modelos discretos (FENNIS, 2011). Na sequência são definidos os conceitos que caracterizam cada abordagem e são apresentados alguns modelos propostos na literatura.

2.2.1.1 Modelos contínuos

Os modelos de otimização de curvas proporcionam uma combinação do conjunto de partículas que compões a mistura de forma que a distribuição granulométrica de todos os materiais juntos se aproxime ao máximo possível de uma

curva modelo que representa a distribuição granulométrica ideal para os materiais em questão.

A maioria dos primeiros pesquisadores que desenvolveram estudos de empacotamento de partículas em conjuntos de agregados propuseram modelos para projetar uma curva ideal de distribuição de partículas. Um dos trabalhos pioneiros foi o de Füller e Thompson (1907). Os pesquisadores propuseram a Equação 2 a seguir para a obtenção de uma curva contínua de distribuição de partículas e indicaram o valor de 0,50 para o coeficiente de distribuição (q), que resultaria em um conjunto com mínimo de vazios (FENNIS, 2011).

$$CPFT (\%) = 100 \times \left(\frac{D}{D_{m\acute{a}x}} \right)^q \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$CPFT$ - % volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (do inglês, *cumulative percent finer than D*);

D - diâmetro da partícula;

D_{max} - diâmetro da maior partícula do conjunto;

q -coeficiente de distribuição.

Posteriormente alguns autores propuseram algumas modificações na equação de Füller e Thompson buscando obter melhores resultados de empacotamento dos conjuntos granulares. Andreasen e Andersen (1930) propuseram que o coeficiente (q) deve variar no intervalo de 0,33 a 0,5 e deve ser estabelecido experimentalmente, pois depende das características das partículas (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

De acordo com Kumar e Santhanam (2003), o coeficiente de distribuição (q) é um indicativo da fração mais fina que pode ser acomodada na mistura. Sendo assim, esse expoente irá condicionar a trabalhabilidade da mistura de modo que, quanto maior seu valor, maior é a fração de partículas mais grossas e, opostamente, conforme o valor de (q) diminui, a quantidade de partículas mais finas aumenta.

Além disso, Kumar e Santhanam (2003) complementam que, como a demanda de água e a capacidade de retenção de água da mistura é controlada pelo volume de partículas finas, este expoente pode ser um indicativo razoável para

escolher a quantidade de água e de aditivos (que agem na reologia das misturas) como os redutores de água.

Seguindo esse preceito, Vanderlei (2004) propõe que para aumentar a capacidade de escoamento da mistura, o valor de (q) deve ser menor do que 0,30. Mais especificamente, valores de (q) inferiores à 0,25 resultam em misturas auto adensáveis.

Mais tarde, em 1980, Funk e Dinger defenderam que a equação deveria prever não somente um tamanho máximo do intervalo granulométrico, mas também um tamanho mínimo, simulando verdadeiramente a condição de um material granular real (FUNK; DINGER, 1994). Para tanto, os pesquisadores propuseram a introdução de um limite inferior de dimensão das partículas. A partir dessa modificação, o modelo passou a ser descrito pela Equação 3 e ficou conhecido como modelo de Alfred.

$$CPFT (\%) = 100 \times \left(\frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

CPFT (%) - % volumétrica de partículas menores que o diâmetro *D* (do inglês *cumulative percent finer than D*);

D_{min} - diâmetro da menor partícula;

D - diâmetro da partícula;

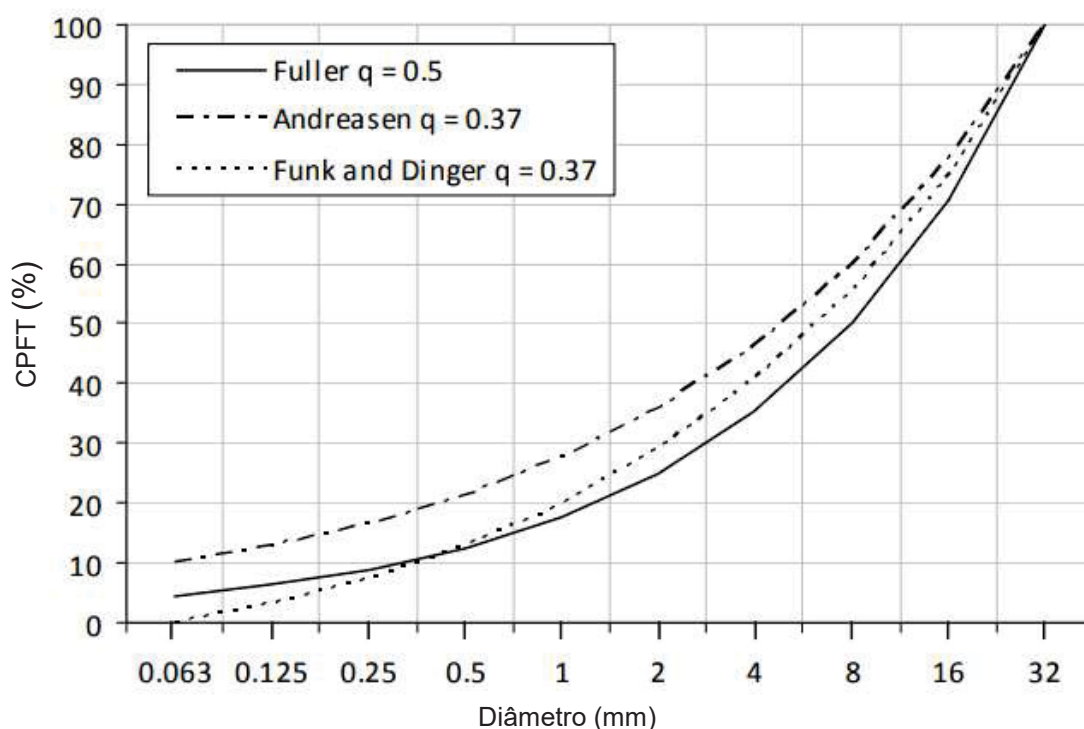
D_{max} - diâmetro da maior partícula do conjunto;

q - coeficiente de distribuição.

Além disso, Funk e Dinger (1980) também propuseram adotar o valor de 0,37 para o coeficiente de distribuição (q), pois, segundo resultados de simulações computacionais, esse valor resultaria na máxima densidade de empacotamento.

Na Figura 9 a seguir são apresentadas as curvas ideais propostas por Füller e Thompson, Andreasen e Andersen e Funk e Dinger admitindo um intervalo granulométrico com diâmetro máximo de 32 mm e diâmetro mínimo de 63µm.

Figura 9 – Curvas granulométricas ideais propostas por Füller eThompson, Andreasen e Andersen e Funk e Dinger



FONTE: Fennis (2011)

Ao comparar os resultados de densidade de empacotamento experimental obtidos a partir dos modelos citados, Oliveira *et al.* (2000) verificaram que a maior densidade de empacotamento foi obtida pelo modelo de Alfred (Funk e Dinger (1980), seguido do modelo de Andreasen e Andersen (1930).

Alguns exemplos de trabalhos mais recentes que adotaram os modelos contínuos propostos na literatura podem ser citados. Wang *et al.* (2014) aplicaram um algoritmo desenvolvido a partir de uma adaptação do modelo de Alfred e obtiveram dosagens de CAA com consumo de clínquer reduzido em até 20%, mantendo desempenho de qualidade.

Londero (2016) realizou uma avaliação analítica de otimização de agregados usando como referência os modelos de Füller eThompson, Andreasen e Andersen e Funk e Dinger (modelo de Alfred).

Lopes (2019) aplicou o modelo de Alfred para otimizar traços de concretos convencionais e de alta resistência mantendo fixo o coeficiente de distribuição (q) a fim de comparar as propriedades dos concretos otimizados com as propriedades das misturas de referência. O autor identificou que no estado endurecido, os concretos

otimizados apresentaram desempenho físico e mecânico superior aos concretos dosados pela metodologia tradicional.

A obtenção de curvas ideais predefinidas é um método popular até os dias atuais, sendo aplicado não somente de maneira direta na otimização de dosagens de concretos, mas também em normas de especificação de agregados destinados à produção de concretos (FENNIS; UIJL; WALRAVEN, 2009).

2.2.1.2 Modelos discretos

Os modelos de empacotamento classificados como discretos usam equações matemáticas que permitem calcular a densidade de empacotamento dos concretos com base na distribuição granulométrica dos materiais que o compõe (FENNIS, 2011). Nesses modelos, as partículas são consideradas individualmente e divididas em classes de diferentes tamanhos (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

O princípio dos modelos discretos é a densidade de empacotamento virtual, definida pela máxima densidade de empacotamento de uma mistura, em que as partículas são dispostas uma a uma no espaço, mantendo o seu formato original (LONDERO, 2011).

Furnas (1929) foi o pesquisador pioneiro dessa abordagem de empacotamento, propondo um modelo para calcular a densidade de empacotamento de misturas binárias sem interação entre as partículas (KUMAR; SANTHANAM, 2003).

Mais tarde, Aïm e Goff (1968) propuseram um modelo geométrico simples buscando explicar o excesso de porosidade observado experimentalmente na primeira camada de grãos esféricos em contato com um plano. A partir desse princípio, os pesquisadores introduziram ao modelo de Furnas a interação entre as partículas, definido como “efeito parede”, que é explicado adiante (KUMAR; SANTHANAM, 2003).

Atualmente, o modelo de empacotamento discreto mais conhecido é o *Compressible Packing Model* (CPM), proposto por De Larrad (1999). O modelo prevê a densidade de empacotamento de conjuntos granulares polidispersos compostos por n classes de tamanhos de grãos (LONDERO *et. al.*, 2017). Nesse modelo, De Larrad introduziu o fator K para calcular a densidade de empacotamento real (ϕ) a partir da densidade de empacotamento virtual (β) (KUMAR; SANTHANAM, 2003).

O CPM tem origem em dois modelos, o modelo linear de densidade de empacotamento (LPDM, do inglês, *linear packing density model*) e no modelo de suspensão de sólidos (SSM, do inglês, *Solid Suspension Model*) (SEDRAN; DE LARRARD, 1999). O objetivo do modelo é a previsão da densidade de empacotamento de misturas polidispersas. As três bases são a densidade de empacotamento de cada classe de partículas com mesmo tamanho (faixa granulométrica), a distribuição granulométrica da mistura e a energia de compactação que será utilizada (DE LARRARD; SEDRAN, 2002).

A inclusão da variável de energia de compactação permite a consideração da densidade de empacotamento real, vantagem do método quando comparado ao LPDM, que considera apenas a densidade de empacotamento virtual (LONG *et. al.*, 2017). A densidade de empacotamento virtual é aquela que considera o posicionamento de cada grão, sem alterar sua forma, dentro do recipiente utilizado, promovendo a maior densidade de empacotamento possível. Levando em consideração que o concreto é um material produzido em larga escala e que seu processo industrial é baseado no posicionamento aleatório dos grãos, a densidade de empacotamento real é inferior à virtual (DE LARRARD; SEDRAN, 2002). A densidade virtual de empacotamento (γ_i) pode ser determinada a partir da equação 2 abaixo (STOVALL; DE LARRARD; BUIL, 1986).

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{\{1 - \sum_{j=1}^{i-1} [1 - \beta_i + b_{ij} \beta_i (1 - 1/\beta_j)] y_j - \sum_{j=i+1}^n (1 - a_{ij} \beta_j) y_j\}} \quad (2)$$

Onde β_i representa a densidade de empacotamento empírica dos grãos da classe i , y_i representa a fração de volume de cada classe de partículas pertencentes à mesma faixa granulométrica, a_{ij} e b_{ij} são respectivamente, os coeficientes dos efeitos filer e parede (*loosening* e *wall effect*) obtidos a partir das equações 3 e 4 abaixo (SEDRAN; DE LARRARD, 1999).

$$a_{ij} = \sqrt{1 - (1 - d_j/d_i)^{1,02}} \quad (3)$$

$$b_{ij} = 1 - (1 - d_i/d_j)^{1,5} \quad (4)$$

O termo a_{ij} descreve o efeito filer exercido pela classe j na classe i , considerando que o diâmetro de i é maior que o de j ($d_i > d_j$). Já b_{ij} descreve o efeito

parede exercido pela classe J na classe i, considerando que o diâmetro de j é maior que o de i ($d_j > d_i$) (SEDRAN; DE LARRARD, 1999). Para determinação da densidade real de empacotamento a equação 5 abaixo é utilizada (DE LARRARD, 1999).

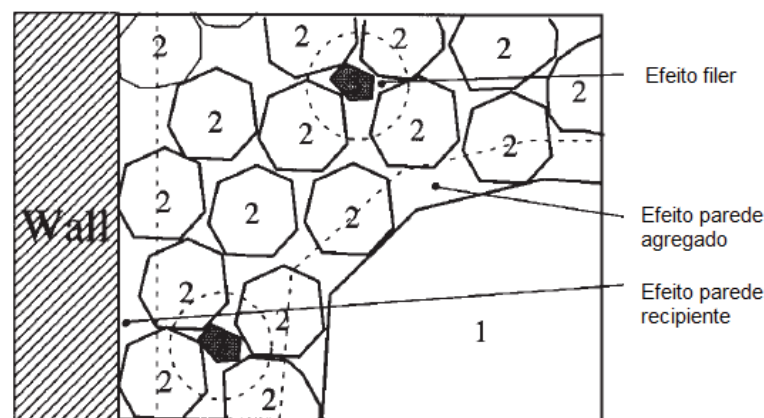
$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{y_i/\beta_i}{1/\alpha_t - 1/\gamma_i} \quad (5)$$

Onde γ_i representa a densidade de empacotamento virtual, y_i representa a fração de volume de cada classe de partículas pertencentes à mesma faixa granulométrica, β_i representa a densidade de empacotamento real da classe i, K é escalar e representa a característica de compactação a ser utilizada. Para o CAA o valor de K é 7 (DE LARRARD, 1999).

Além disso, no CPM são admitidas as interações entre as partículas, que depende da dominância das classes de partículas. O conceito da dominância de classes segue a prerrogativa de que sempre haverá uma classe que exerce domínio em relação às demais classes, isso é, exercerá maior influência no contato com as partículas de outras classes.

De forma prática, a dominância de classes pode se manifestar de duas formas, pelo efeito filer e pelo efeito parede (Figura 10). Ambas situações são relacionadas à redução da densidade de empacotamento da mistura (DE LARRARD, 1999).

Figura 10 Efeito filer e parede



FONTE: Adaptado de De Larrard (1999)

Quando a classe dominante exerce influência em partículas de maior diâmetro que ela, ocorre o efeito filer (*loosening effect*), que é caracterizado pelo afastamento das partículas maiores devido à acomodação de grãos menores nos espaços disponíveis. Esse efeito acontece quando as partículas menores não são pequenas o suficiente para que haja o preenchimento exato dos espaços existentes (FENNIS; WALRAVEN; UIJL, 2009; MEHDIPOUR; KHAYAT, 2018).

Já na situação em que a classe dominante exerce influência em partículas de menor diâmetro que ela, ocorre o efeito parede (*wall effect*), que é caracterizado pelo afastamento dos grãos menores (perturbação do empacotamento característico). O efeito parede também pode ser percebido nos grãos que se aproximam das paredes do recipiente (FENNIS; WALRAVEN; UIJL, 2009; MEHDIPOUR; KHAYAT, 2018).

Apesar de os modelos discretos preverem matematicamente a interação geométrica entre as partículas, pelo princípio de divisão da faixa granulométrica em classes, é admitido que em uma classe todas as partículas são de mesmo tamanho, o que implica em uma distribuição granulométrica uniforme e não contínua

2.3 DURABILIDADE

2.3.1 Proteção do aço

Os mecanismos de degradação de estruturas de concreto armado podem ser divididos em dois grupos, os que afetam o concreto e os que afetam a armadura. No primeiro são enquadradas as reações deletérias como reação álcali agregado e ataque por sulfato. Já o segundo grupo abrange processos de deterioração como a corrosão das armaduras por carbonatação ou ataque por cloretos (FIGUEIREDO; NEPOMUCENO, 2007).

Ao longo da vida útil da estrutura de concreto armado o concreto protege o aço de duas maneiras, física e química. A proteção física se dá pelo impedimento de interação do aço com o meio externo. Já a proteção química é provida pela elevada alcalinidade da solução aquosa presente nos poros do concreto que permite o desenvolvimento de uma película ao redor do aço, a camada de passivação, que previne contra o processo de deterioração do aço por corrosão (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013). A redução da alcalinidade do concreto pode ocorrer a partir do ingresso de gás carbônico (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e gás sulfídrico (H_2S) (RIBEIRO *et.*

al., 2014). Nesse trabalho será abordada a redução da alcalinidade do concreto apenas a partir do ingresso de CO_2 .

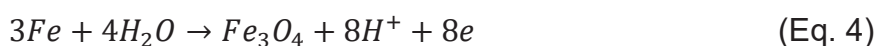
A seguir serão explicados os processos relacionados à carbonatação do concreto e corrosão da armadura. Os fenômenos que compõe esse ciclo são a formação de película de passivação na armadura, a carbonatação do concreto, a destruição da película passiva e a corrosão da armadura. Em seguida são comentadas as consequências do processo de deterioração e formas de mitigação.

O fenômeno de passivação consiste na perda da reatividade de metais e suas ligas quando em condições específicas. Nessa situação os metais se encontram em uma situação inerte, comportando-se como metais nobres como ouro e platina (RIBEIRO *et. al.*, 2014).

Metais empregados na construção civil como armadura passiva possuem tendências reativas devido aos processos metalúrgicos empregados em sua fabricação. O metal proveniente de um processo metalúrgico encontra-se em um nível energético superior ao que lhe deu origem. Há então uma tendência do material de retorno ao seu estado natural, de equilíbrio. Esse processo é inverso ao metalúrgico e consiste na liberação da energia (MEIRA, 2017).

Duas características principais podem ser citadas a respeito da passivação. A primeira delas é que quando um metal se encontra no estado passivo sua velocidade de corrosão é extremamente baixa, na ordem de 10^4 a 10^6 vezes mais lenta. O segundo ponto é que o estado passivo é relativamente instável. Essa instabilidade é ligada a sensibilidade do filme superficial de passivação que está sujeito a danos superficiais e alterações de acordo com o meio corrosivo ao qual é exposto (FONTANA, 1978 *apud* FREIRE, 2005).

A composição da película protetora sofre influência do meio alcalino proporcionado pelo concreto. A integridade da película de passivação é assegurada pelo pH em torno e 12,5, característico do concreto, que é conferido pelos hidróxidos $Ca(OH_2)$, $NaOH$ e KOH , produtos das reações de hidratação do cimento que ficam dissolvidos na fase aquosa do concreto (SANTOS, 2006). A reação de formação de película de passivação, segundo Wolynech (1987), segue a Equação 4.



Não é consenso na literatura a composição química da camada de passivação. A teoria mais aceita atualmente prevê a formação de uma película composta por duas camadas. A camada mais interna sendo composta principalmente por magnetita. Já a camada mais externa sendo composta por óxidos férricos (NAGAYAMA; COHEN *apud* ALONSO *et. al.*, 2010).

2.3.2 Mecanismo de carbonatação

Após o processo de formação da película passivadora, durante a vida útil da edificação, o concreto armado é exposto à atmosfera. Quando há presença suficiente de dióxido de carbono e água em contato com o concreto o processo de carbonatação tem início.

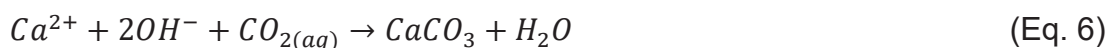
A carbonatação, que é um processo físico-químico, ocorre a partir do ingresso de CO_2 nos poros no sentido externo para o interno do concreto. O processo físico é governado pela porosidade e suas características como tortuosidade, geometria, distribuição e interconectividade. A estrutura de poros controla a difusão CO_2 do exterior para o interior do concreto. O processo químico envolve as reações de neutralização, isso é, redução do pH, da água saturada de hidróxido de cálcio presente nos poros do concreto e dos compostos alcalinos hidratados da matriz do concreto. Quando o concreto é exposto a ciclos de secagem e molhagem há a precipitação do produto das reações citadas, o carbonato de cálcio, nos poros do concreto. A consequência dessas reações é redução do pH da matriz cimentícia (MIRANDA, 2018; TAYLOR, 1997; NUNES, 2014). Por esse motivo, concretos expostos a ciclos de secagem e molhagem são mais suscetíveis à deterioração por carbonatação (RIBEIRO *et. al.*, 2014).

Conforme exposto anteriormente, a degradação do concreto armado por carbonatação é um processo. Tendo isso em mente, a carbonatação de materiais cimentícios pode ser descrita em quatro equações (MONTEMOR *et. al.*, 2002).

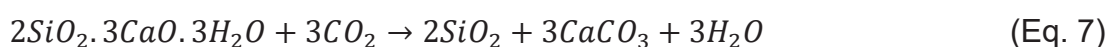
1ª Equação: Ingresso do CO_2 para o interior do concreto (Equação 5).



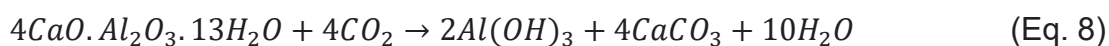
2ª Equação: Reação do hidróxido de cálcio com o CO_2 dissolvido no sistema de poros do concreto (Equação 6).



3ª Equação: Reação dos aluminatos e silicatos com o CO_2 (Equações 7 e 8).



Ou



4ª Equação: Produção de bicarbonato de cálcio (Equação 9)



Em seu trabalho, Montemor *et. al.* (2002) aponta que a carbonatação ocorre de acordo com as três primeiras reações. Já a quarta reação pode vir a ocorrer em uma situação específica de disponibilidade de água e excesso de CO_2 . Essa última reação apresenta como resultado a formação de bicarbonato de cálcio que, devido ao seu pH, pode reduzir o pH do concreto a níveis próximos do neutro. Ao longo do tempo essas reações químicas seguem acontecendo conforme ingresso de mais moléculas de CO_2 no interior do concreto.

A ocorrência das equações que descrevem o processo de carbonatação após determinado período de tempo leva ao início de uma frente de carbonatação. A continuidade do processo permite a chegada da frente de carbonatação à armadura, iniciando o processo de destruição da película passiva e dando início à corrosão.

Ao longo do processo de carbonatação é muitas vezes possível observar a aparição de manchas brancas na superfície do concreto, a eflorescência. A origem dessas manchas é processo de lixiviação do hidróxido de cálcio do concreto devido à presença de água. Esse processo aumenta a porosidade do concreto que fica mais exposto a agentes agressivos. Ainda que no processo de carbonatação haja precipitação de carbonato de cálcio nos poros, esse fenômeno por vezes não compensa a lixiviação (FREIRE, 2005).

Fica evidente nesse contexto o papel da água como contribuinte do processo de deterioração do concreto armado. Esse papel pode ser dividido em dois principais: o auxílio do ingresso de CO_2 para o interior do concreto e a lixiviação dos compostos hidratados da pasta de cimento aumentando a porosidade do concreto.

Além do processo de carbonatação por ingresso de dióxido de carbono descrito anteriormente há ainda outros mecanismos de desenvolvimento dessa reação deletéria. Na situação em que há a presença de CO_2 no interior do concreto

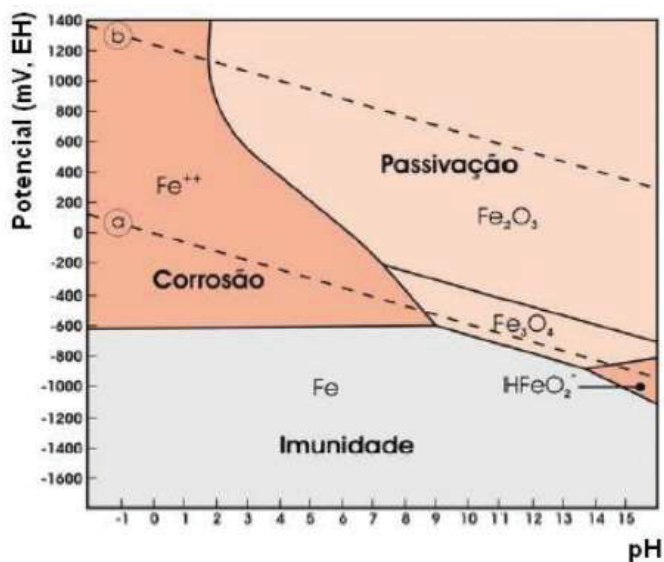
conforme descrito pela equação 6 mas não há hidróxido de cálcio suficiente para início da equações 7 e 8 outros produtos de hidratação do cimento são consumidos.

Metha e Montiro (2014) afirmam que, após a ocorrência da reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono com formação de carbonato de cálcio, pode haver em seguida uma segunda reação, a do carbonato de cálcio com o dióxido de carbono. Para essa reação ocorrer é necessário que haja CO_2 livre dissolvido na água dos poros. Nessa condição ocorre a reação com consequente formação de bicarbonato de cálcio solúvel. Essa formação é chamada de lixiviação.

2.3.3 Corrosão

A película passiva do aço é deteriorada em meio ácido. Uma representação gráfica foi proposta por Pourbaix (1974) *apud* Meira (2017). O autor propôs um diagrama termodinâmico (Figura 11) que considera o pH e potencial. Nesse diagrama é possível observar três zonas distintas: corrosão, passivação e imunidade.

Figura 11 Diagrama de Pourbaix



FONTE: Pourbaix (1974) *apud* Santos (2006)

Helene (1986) explica que quando o aço se encontra na zona de imunidade, independentemente da natureza do meio (ácido, neutro ou alcalino) não ocorre a corrosão. O autor ainda explica que alguns tratamentos como proteção catódica,

ânodos de sacrifício ou corrente impressa, são realizados no aço para conduzi-lo a essa região.

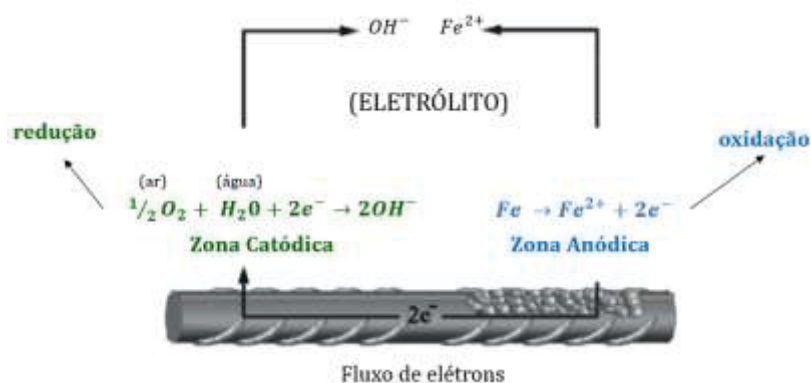
A zona de passivação é caracterizada pela proteção do aço a partir da formação da película de passivação (POURBAIX, 1987 *apud* MEIRA, 2017). O aço no interior do concreto se encontra nessa condição. Essa zona corresponde a um pH em torno de 12,5 a 14 (PETROCKIMO, 1960 *apud* HELENE, 1986).

A zona de corrosão representa as condições termodinâmicas necessárias para o processo de corrosão do aço. As condições termodinâmicas estão também associadas à presença de íons nas soluções dos poros (HELENE, 1986).

O processo de corrosão eletroquímico da barra de aço no interior do concreto é caracterizado por uma reação de oxidação e outra de redução. Essa reação se dá pela movimentação de partículas eletrizadas através de um eletrólito condutor, formando pilhas eletroquímicas também conhecidas como células de corrosão (HELENE, 1993; FIGUEIREDO; MEIRA, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

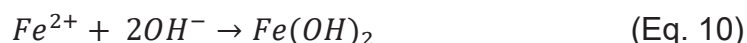
A formação de uma pilha eletroquímica é caracterizada por um ânodo e um cátodo. A zona anódica sofre oxidação, isso é, há perda de elétrons nessa zona com consequente passagem do metal para o estado iônico. Essa região sofre a corrosão. Já na zona catódica ocorre o processo de redução. Os elétrons perdidos pela zona anódica migram para a zona catódica através do eletrólito, onde participam da reação de redução do oxigênio. O resultado desse processo é a produção de íons hidroxila (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013). A seguir na Figura 13 é ilustrado o fenômeno da corrosão eletroquímica.

Figura 12 Representação de uma pilha de corrosão de um mesmo metal



FONTE: adaptado de Meira (2017)

Os íons de ferro (Fe^{2+}) provenientes da região anódica migram pelo eletrólito em direção ao cátodo. Já os íons hidroxila (OH^-), originados pela redução do oxigênio, migram em direção ao ânodo. Em uma região intermediária esses dois íons se encontram e reagem formando hidróxido de ferro, conforme a Equação 10 (GENTIL, 2003)



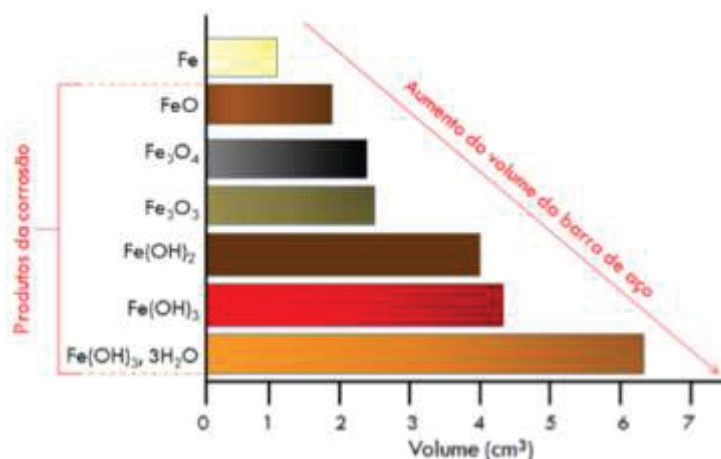
O produto da pilha de corrosão, o hidróxido de ferro, é transformado de acordo com a disponibilidade de oxigênio. Quando se encontra em meio não areado, isso é, sem a presença de ar, o hidróxido de ferro é transformado em magnetita e assume coloração preta (situação anidra) ou esverdeada (situação hidratada). Em meio areado, que é a situação mais frequente, ocorre a oxidação do produto da pilha de corrosão, transformando-o em hidróxido de ferro (III), de cor castanho alaranjada (GENTIL, 2003).

2.3.4 Deterioração pela carbonatação e corrosão

Os danos causados à estrutura de concreto armado devido à carbonatação e consequente corrosão da armadura são consenso na literatura. Uma das consequências é a perda de aderência do aço ao concreto, dificultando a transferência de tensão entre os dois materiais. Essa situação se dá pela degradação das camadas exteriores da barra de aço e do acúmulo de produtos da corrosão na superfície do aço. Uma outra consequência é a perda de seção transversal da barra no ânodo da pilha de corrosão. Esse fenômeno reduz a capacidade portante da estrutura podendo levar ao colapso (HELENE, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2014; RIBEIRO *et. al.*, 2014)

Um terceiro fenômeno é explicado por Mehta e Monteiro (2014), a expansão da barra de aço devido à formação de óxidos (produto da reação de corrosão). Cascudo (1997) afirma ainda que os óxidos formados podem apresentar volume até 600% maior que a barra de aço original (Figura 14). Nessa situação, quando as tensões expansivas são superiores à resistência à tração do concreto, ocorre fissuração e deslocamento do concreto.

Figura 13 Expansão dos produtos da corrosão



FONTE: Cascudo (1997)

Tendo em vista a gravidade das consequências do processo de carbonatação ações de prevenção e mitigação do processo se fazem necessárias. Vale ressaltar que devido à complexidade do processo, a carbonatação é governada por diversos fatores como relação água/aglomerante (cimento + adições pozolânicas), dosagem do cimento e de adições minerais, condições de cura do concreto, concentração de CO_2 no ar, saturação dos poros e temperatura (NUNES, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O programa experimental deste estudo foi dividido em seis etapas, como mostra Figura 14. A primeira etapa consiste na caracterização dos materiais utilizados na pesquisa. A segunda etapa é relativa ao desenvolvimento teórico dos traços dos concretos objetos de estudo desse trabalho. A terceira etapa consiste na realização de testes em pasta e na sequência em concretos a fim de determinar o teor de água e aditivo necessário. A quarta etapa é a da produção dos concretos. A quinta etapa é referente à caracterização, no estado fresco e endurecido, dos concretos produzidos. Na sexta etapa é avaliada a durabilidade dos concretos produzidos por meio do ensaio de carbonatação acelerada.

Figura 14 - Fluxograma das etapas do programa experimental



3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento e adições

A seguir são apresentados o cimento e as adições minerais escolhidos para o desenvolvimento dessa pesquisa. São eles: cimento, cal hidratada, cinza volante, sílica ativa e filer calcário.

Para obtenção de informações necessárias para dosagem optou-se pela realização dos ensaios de massa específica, seguindo as recomendações da NBR 16605 (ABNT, 2017d), índice de atividade pozolânica conforme proposto pela NBR 15895 (ABNT, 2010) com as adaptações a seguir descritas, granulometria a laser e termogravimetria (TG). Na tabela 3 são expostos os ensaios que foram realizados para cada um dos materiais.

Tabela 3 - Ensaio de caracterização dos materiais finos

Ensaio	Cimento e adições				
	CP	CH	SA	CV	FC
Massa específica	X	X	X	X	X
Índice de atividade pozolânica pelo método Chapelle			X	X	
Granulometria a laser	X	X		X	X
Termogravimetria (TG)		X			

FONTE: A autora

LEGENDA: CP – Cimento Portland (CP V – ARI); CH – Cal hidratada (CH I); SA – Sílica ativa; CV – Cinza volante; FC – Filer calcário

Visando melhor organizar as informações optou-se por apresentar separadamente o resultado de caracterização do cimento e cal dos outros materiais. Como último tópico na seção 3.1.1 é apresentada a granulometria de todos os materiais com intuito de facilitar a comparação da curva de distribuição granulométrica de cada um deles. No Apêndice 3 é apresentado o detalhamento dos ensaios de granulometria do cimento e adições dessa pesquisa.

- Cimento

O cimento utilizado foi o CP V ARI, conforme especificações da NBR 16697 (ABNT, 2018) e similar ao cimento *Type I* descrito pela norma americana ASTM C150 (ASTM, 2012) e ao cimento *CEM I* descrito pela norma europeia EM 197-1:2011. O tipo de cimento foi escolhido com o intuito de reduzir a influência de adições presentes em outros tipos de cimento, buscando isolar o efeito das adições escolhidas para esse trabalho, assim como garantir maior resistência à compressão nas primeiras idades.

Em relação à caracterização, para o cimento, foram fornecidos, pelo fabricante, os resultados de ensaios químicos, físicos e mecânicos. Além desses, também foi determinada sua massa específica, seguindo as recomendações da NBR 16605 (ABNT, 2017d) com duas determinações para cada material. Como líquido de dispersão para o ensaio foi utilizado querosene (Tabela 4).

Tabela 4 - Resultados da caracterização do cimento

Ensaio		Limites de norma*	Resultado médio do lote	
Químicos	Perda ao fogo (%) – NBR NM 18 (ABNT, 2012)	≤ 6,5	3,9	
	Teor de MgO (%) – NBR NM 14 (ABNT, 2012)	≤ 6,5	6,4	
	SO ₃ para C ₃ A (%) – NBR NM 16 (ABNT, 2012)	≤ 4,5	3,3	
	Resíduo insolúvel (%) - NBR NM 15 (ABNT, 2012)	≤ 3,5	0,8	
Físicos	Finura #200 (%) - NBR 11579 (ABNT, 2013)	≤ 6,0	0,1	
	** Massa específica (g/cm ³) - NBR 16605 (ABNT, 2017d)	-	3,14	
	Superfície de Blaine (m ² /kg) -NBR 16372 (ABNT, 2015)	-	503,3	
	Tempo de pega (min) - NBR 16607 (ABNT, 2018)	Início	≥ 60	233
		Fim	≤ 600	296
Expan. a quente (mm) - NBR 11582 (ABNT, 2016)	≤ 5,0	0,2		
Mecânicos	Resistência à compressão (MPa) - NBR 7215 (ABNT, 2019)	1 dia	≥ 14,0	23,2
		3 dias	≥ 24,0	33,5
		7 dias	≥ 34,0	38,8
		28 dias	-	47,5

FONTE: Fornecedor cimento

LEGENDA: * - NBR 16697 (ABNT, 2018), ** - Ensaio realizado pela autora

O resultado de massa específica do cimento de 3,14 g/cm³ é similar ao encontrado por Alexandre e Luz (2020) e Gobbi (2014), respectivamente, os autores encontraram valores de 3,12 g/cm³ e 3,13 g/cm³ para um cimento CP V ARI da região

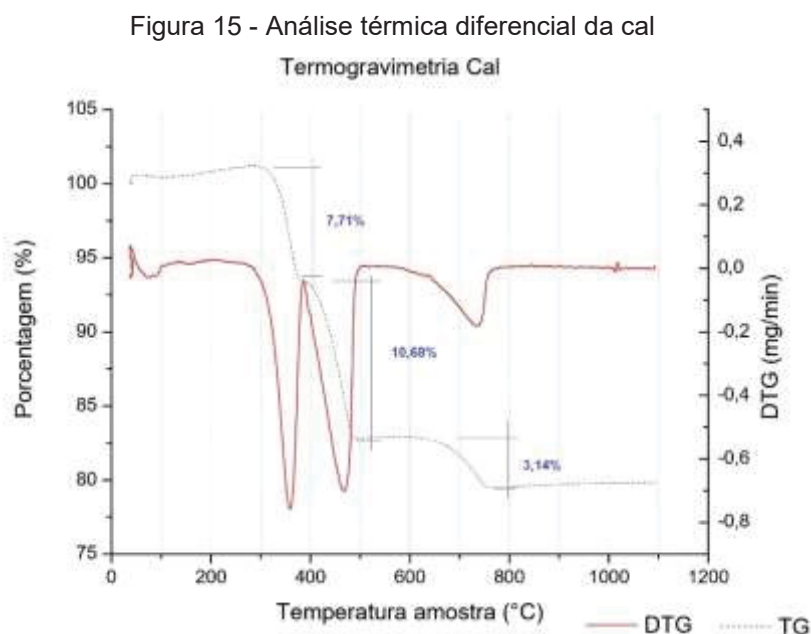
de Curitiba – PR. Todos os valores obtidos para caracterização do cimento estão dentro do recomendado pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

- Cal hidratada

A cal hidratada escolhida para o desenvolvimento dessa dissertação foi a disponível durante o período de pandemia na região de Curitiba, PR. A adição de cal é benéfica ao produzir um maior refinamento dos poros a partir da deposição de carbonato de cálcio nos poros do concreto (OLIVEIRA; PERUZZI, 2019).

Para a cal, o resultado de massa específica encontrado foi de $2,41 \text{ g/cm}^3$. A análise termogravimétrica (ATG) da cal foi realizada no equipamento LABSYS EVO DTA/DSC (Setaram Instrumentation), na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) devido à ausência/indisponibilidade deste equipamento na UFPR. Por esse motivo o ensaio não foi realizado pela autora e, conseqüentemente, as decisões técnicas do ensaio também não foram por ela tomada.

O ensaio foi iniciado em temperatura ambiente e aquecido a uma taxa de $10 \text{ }^\circ\text{C/min}$ até atingir temperatura de $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ sob atmosfera de ar sintético. Para realização do ensaio foi utilizada uma amostra de $40,1\text{g}$. O preparo da amostra ensaiada consistiu em peneirar a cal na peneira com malha de abertura $75 \text{ }\mu\text{m}$. O perfil de perda de massa da amostra pode ser observado na Figura 15.



Fonte: A autora

Na análise termogravimétrica da cal, apresentada na Figura 15, é possível observar três perdas de massa bem definidas. A primeira, de 7,71%, que ocorre no pico endotérmico de 360 °C, é relativa à desidratação da brucita ($Mg(OH)_2$). Já a segunda, no valor de 10,68%, que ocorre na temperatura de 470 °C, é relativa à desidratação da portlandita ($Ca(OH)_2$). A última perda de massa, de 3,14%, no pico endotérmico de 735 °C, é atribuída à perda de CO_2 da calcita ($CaCO_3$). É possível ainda observar que não há a presença de carbonato de magnésio devido à ausência de pico endotérmico. A detecção dessa fase é esperada no intervalo de temperatura de 500 a 600 °C (LOTHENBACH; DURDZIŃSKI; WEERDT, 2016). Para a cal foi também obtido o resultado de perda ao fogo de 21,53%.

A partir das perdas de massa características das cales e das Equações 11 a 13 foram quantificadas as fases presentes na cal estudada (HOPPE FILHO, 2008; MACIOSKI, 2017). Para os cálculos não foram consideradas as fases $MgCO_3$ e $CaMg(CO_3)_2$ por ocorrerem em baixa quantidade em cales comerciais (HOPPE FILHO, 2008).

- Cálculo do teor de portlandita

$$Ca(OH)_2 = \frac{MM_{Ca(OH)_2}}{MM_{H_2O}} * H_2O = 4,11 * H_2O \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

$Ca(OH)_2$ – Teor de portlandita (hidróxido de cálcio, %);

$MM_{Ca(OH)_2}$ – Massa molecular do hidróxido de cálcio (74,09u);

MM_{H_2O} – Massa molecular da água (18,02u);

H_2O – Perda de massa no ensaio DTG referente à decomposição da hidroxila entre as temperaturas de 400 e 600 °C (%).

- Cálculo do teor de calcita

$$CaCO_3 = \frac{MM_{CaCO_3}}{MM_{CO_2}} * CO_2 = 2,27 * CO_2 \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

$CaCO_3$ – Teor de calcita (carbonato de cálcio, %);

MM_{CaCO_3} – Massa molecular do carbonato de cálcio (100,09u);

MM_{CO_2} – Massa molecular do anidrido carbônico (44,01u);

CO_2 – Perda de massa no ensaio de DTG referente à decomposição do anidrido carbônico entre 600 e 1000 °C.

- Cálculo do teor de brucita

$$Mg(OH)_2 = \frac{MM_{Mg(OH)_2}}{MM_{H_2O}} * H_2O = 3,24 * H_2O \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

$Mg(OH)_2$ – Teor de brucita (hidróxido de magnésio, %);

$MM_{Mg(OH)_2}$ – Massa molecular do hidróxido de magnésio (58,32u);

MM_{H_2O} – Massa molecular da água (18,02u);

H_2O – Perda de massa no ensaio de DTG referente à decomposição do hidróxido de magnésio (%) entre 200 e 400 °C.

A partir das Equações 10 a 12 e das porcentagens de perda de massa observadas no ensaio de termogravimetria da cal foi possível inferir a porcentagem de cada uma das fases observadas na composição da cal estudada (Tabela 5).

Tabela 5 - Composição cal

Fase	Teor na composição (%)
Brucita $Mg(OH)_2$	24,99
Portlandita $Ca(OH)_2$	43,90
Calcita $CaCO_3$	7,13
FONTE: A autora	

A utilização da cal analisada se deu pela indisponibilidade de outras cales na região de Curitiba-PR no período de desenvolvimento da pesquisa.

- Adições minerais: cinza volante, sílica ativa e filer calcário

O uso dessas adições pozolânicas tem como objetivo a redução do consumo de cimento, contribuindo ainda para a resistência mecânica devido à reação pozolânica. Conforme explicado anteriormente, para dosagem de um concreto auto adensável, é necessário um teor de finos superior ao consumo do concreto convencional vibrado. Portanto, justifica-se o uso de tais adições para permitir redução do consumo de cimento ainda provendo quantidade suficiente de finos à mistura.

Além da redução do consumo de cimento e densificação da matriz do concreto as adições pozolânicas foram também escolhidas para auxiliar no desempenho mecânico dos concretos dosados (VALCUENDE; PARRA, 2010; PROSKE *et. al.*, 2013, ABNT NBR 12653, 2014b).

Neste trabalho também é utilizado o filer calcário como material fino não reativo. O uso desse material na dosagem do concreto tem como objetivo contribuir para a densificação da matriz cimentícia e a redução do consumo de cimento sem que haja consumo de hidróxido de cálcio por meio de uma reação pozolânica.

A caracterização das adições minerais consistiu no ensaio de massa específica para todas adições seguindo a mesma metodologia descrita para o cimento, índice de atividade pozolânica pelo método Chapelle (com uso de cal) para a sílica ativa e cinza volante e granulometria a laser para a cinza volante e filer calcário.

O índice de atividade pozolânica pelo método Chapelle da cinza volante e da sílica ativa (adições reativas) foi determinada pelo método de Chapelle. A análise da atividade pozolânica por Chapelle ou teor de hidróxido de cálcio fixado foi realizada seguindo a metodologia proposta pela NBR 15895 (ABNT, 2010) com as seguintes adaptações.

Buscando obter um resultado mais representativo da situação real de utilização dos materiais optou-se pelo não peneiramento da amostra a ser ensaiada pois essas não foram peneiradas para a fabricação dos concretos.

Em relação aos equipamentos, duas alterações foram feitas. Substitui-se o banho maria Dubnoff por um agitador magnético com aquecimento e sensor de temperatura na solução capaz a manter constante a temperatura. A segunda alteração, ofertada como opção pela norma, é referente ao agitador rotativo Wagner. Esse foi substituído pela agitação manual por 15 minutos.

Já em relação aos reagentes utilizados no ensaio, também foram feitas duas alterações. Ao invés de padronizar o HCL foi utilizada uma solução padronizada

industrializada. A segunda alteração foi a substituição da sacarose por açúcar refinado comercial, que foi completamente solubilizado.

Após o período de reação entre a amostra pozolânica e o óxido de cálcio, foi determinado, por titulação (alíquota) 50ml de ácido clorídrico e utilização de fenolftaleína como indicador, o teor remanescente de óxido de cálcio (livre) conforme descrito por Macioski (2017). O índice de atividade pozolânica por Chappelle é obtido pela Equação 14. Para cada uma das adições pozolânicas foram realizadas três titulações.

$$I_{Ca(OH)_2} = \frac{28*(V_3 - V_2)*F_c}{2} * \frac{MM Ca(OH)_2}{MM CaO} \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde:

$I_{Ca(OH)_2}$ – Índice de atividade pozolânica por Chappelle, que corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado por grama de material (mg de $Ca(OH)_2$ /g de pozolana);

V_2 – Volume de HCL 0,1 M consumido no ensaio com amostra (ml);

V_3 – Volume de HCL 0,1 M consumido no ensaio em branco com CaO (ml);

F_c – Fator de correção de HCL para uma concentração de 0,1 M após padronização do ácido clorídrico;

$MM Ca(OH)_2$ – Massa molar do hidróxido de cálcio;

$MM CaO$ – Massa molar do óxido de cálcio.

Os resultados de atividade pozolânica pelo método de Chappelle para o cinza volante e sílica ativa, apresentadas na Tabela 6, são uma média das três repetições do ensaio.

Tabela 6 - Chappelle cinza volante e sílica ativa

Adição	Chappelle (mg $Ca(OH)_2$ /g)
Cinza volante	636,12
Sílica	1016,81

FONTE: A autora

- Granulometria a laser

A distribuição granulométrica foi determinada pelo ensaio de granulometria a laser das amostras de cimento, cal, filer calcário e cinza volante pelo aparelho CILAS 920. O aparelho utilizado possui capacidade de análise de partículas de diâmetro entre 0,3 μm a 400 μm .

Não foi possível determinar a curva granulométrica da sílica devido ao tamanho das partículas de maior diâmetro. Segundo o fabricante, para comercialização, a sílica é submetida a um processo denominado densificação. Esse processo garante um menor volume para a sílica a partir de uma aglomeração intencional dos grãos (Figura 16).

Figura 16 - Sílica ativa aglomerada

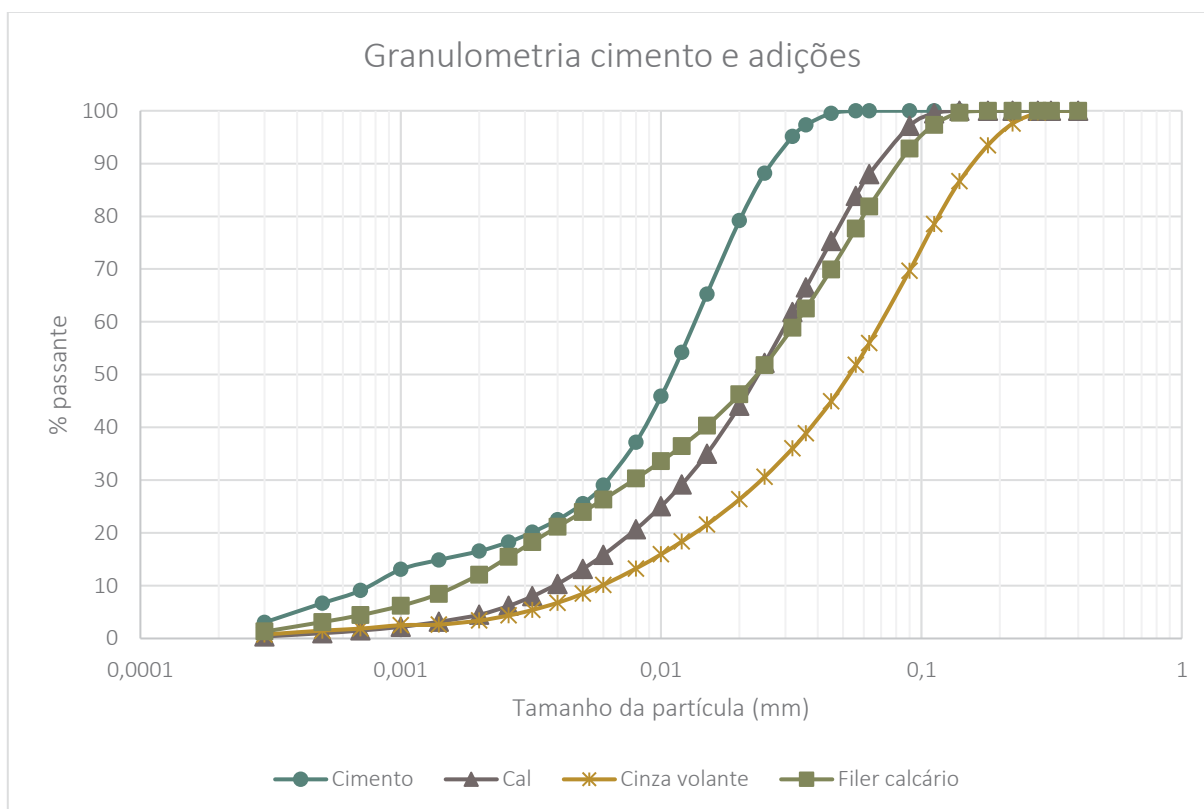


Fonte: A autora

Observou-se grande dificuldade para desaglomerar os grãos sem a presença de água, assim como uma rápida reaglomeração dos grãos peneirados na peneira de malha 75 μm . Considerando que a capacidade de análise do aparelho para o ensaio era inferior ao intervalo granulométrico dos grãos (aglomerados), a dificuldade em desaglomerar a sílica em conjunto com a escolha pela dosagem por substituição do cimento (que não necessita da curva granulométrica da sílica como dado de entrada para o modelo de dosagem escolhido) optou-se pela não realização do ensaio de granulometria a laser para sílica.

Na Figura 17 são apresentadas as curvas granulométricas do cimento, cal, cinza volante e filer calcário. No Apêndice 3 são apresentadas separadamente as curvas granulométricas e valores de porcentagem de massa passante de cada um dos materiais.

Figura 17 – Granulometria do cimento e adições minerais



Fonte: A autora

É possível observar na Figura 17 que o cimento é o material mais fino dentre os apresentados, com D50 de 0,01 mm. Esse resultado é condizente com o tipo de cimento utilizado, CPV-ARI. Apesar de o cimento ser o material mais fino dentre os ensaiados nessa pesquisa, esperava-se uma maior finura devido ao seu tipo. Para confirmar o resultado o ensaio de granulometria a laser do cimento foi realizado duas vezes. Os resultados foram similares. No Apêndice 3 são apresentadas as curvas granulométricas das duas repetições para o ensaio do cimento. A cal e o filer calcário apresentam D50 no valor de 0,022 mm. Já a cinza volante é o material mais graúdo dentre o cimento e adições ensaiados para essa pesquisa, com D50 no valor de 0,05 mm.

O filer e a cinza volante não atendem o requisito da NBR 12653 (2014) de até 20% de material retido na peneira de 45 μm . Apesar disso, decidiu-se por utilizar esses dois materiais ainda que fora do recomendado por norma. Justifica-se a escolha pela indisponibilidade de outras fontes desses materiais na região de Curitiba, PR.

3.1.2 Agregados

Para a composição dos concretos dessa pesquisa foram utilizados três agregados, um miúdo e dois graúdos (Figura 18). Todos os agregados utilizados são naturais e provenientes da região de Curitiba – PR. A seguir eles são apresentados.

Figura 18 - Agregados: (A) brita 1, (B) brita 0, (C) areia



FONTE: A autora

Os ensaios realizados para caracterização dos agregados tiveram como objetivo fornecer informações para alimentar o método de dosagem utilizado nessa dissertação. É importante ressaltar que a brita 1 se encontra no intervalo granulométrico compreendido entre 9,5 e 19 mm e a brita 0 entre 4,8 e 12,5 mm (ABNT NBR 7211, 2022). Na Tabela 7 são listados esses ensaios. Destaca-se que, nas referências normativas, quando listada mais de uma para o mesmo ensaio, a primeira é relativa ao agregado miúdo e a segunda ao graúdo.

Tabela 7 - Ensaio caracterização materiais granulares

Ensaio	Referências
Granulometria	NBR NM 248 (2003b)
Massa unitária	NBR NM 45 (2006)
Massa específica	NBR NM 52 (2009a) / NBR NM 53 (2009b)
Teor de material pulverulento	NBR NM 46 (2003c)
Absorção de água	NBR NM 30 (2001) / NBR NM 53 (2009b)
Fonte: A autora	

Os procedimentos realizados para todos os ensaios e todos os agregados seguiram as recomendações prescritas em norma. Para cada um deles foram realizadas duas repetições que, quando dentro do limite de variação da norma, foram utilizadas para cálculo do valor final a partir de uma média aritmética.

Destaca-se apenas que, para o ensaio de determinação do teor de material pulverulento, optou-se pelo uso de detergente para auxiliar o desprendimento do pulverulento dos grãos, conforme sugerido na NBR NM 46 (ABNT, 2003c).

A escolha de utilização de duas graduações de brita visa atingir dois objetivos relacionados ao desempenho dos concretos. O primeiro objetivo, é relacionado ao desempenho no estado fresco. Tendo em vista a intensão de produzir um concreto auto adensável, considerou-se benéfica a redução da quantidade de brita 1, incorporando também um segundo agregado graúdo, o pedrisco.

O segundo objetivo da utilização de duas graduações de agregado graúdo é relacionado à densidade de empacotamento da mistura. Fundamenta-se na ideia de que uma ampla e contínua distribuição do tamanho das partículas que compõe uma curva granulométrica resulta em uma maior densidade de empacotamento, independentemente da forma das partículas (FENNIS E WALRAVEN, 2012; MCGEARY, 1961).

A seguir são apresentados os resultados de caracterização dos agregados utilizados nessa dissertação. Diferentemente da seção anterior, optou-se por apresentar os resultados de todos os agregados juntos. Na Tabela 8 são apresentados os resultados de massa específica, massa unitária, absorção e teor de pulverulento.

Tabela 8 - Caracterização agregados

Ensaio	Agregados		
	Areia	Brita 0	Brita 1
Massa específica (g/cm ³)	2,51	2,63	2,70
Massa unitária (g/cm ³)	1,59	1,48	1,53
Absorção (%)	1,36	0,79	0,40
Teor de pulverulento (%)	5,14	1,06	0,18

FONTE: A autora

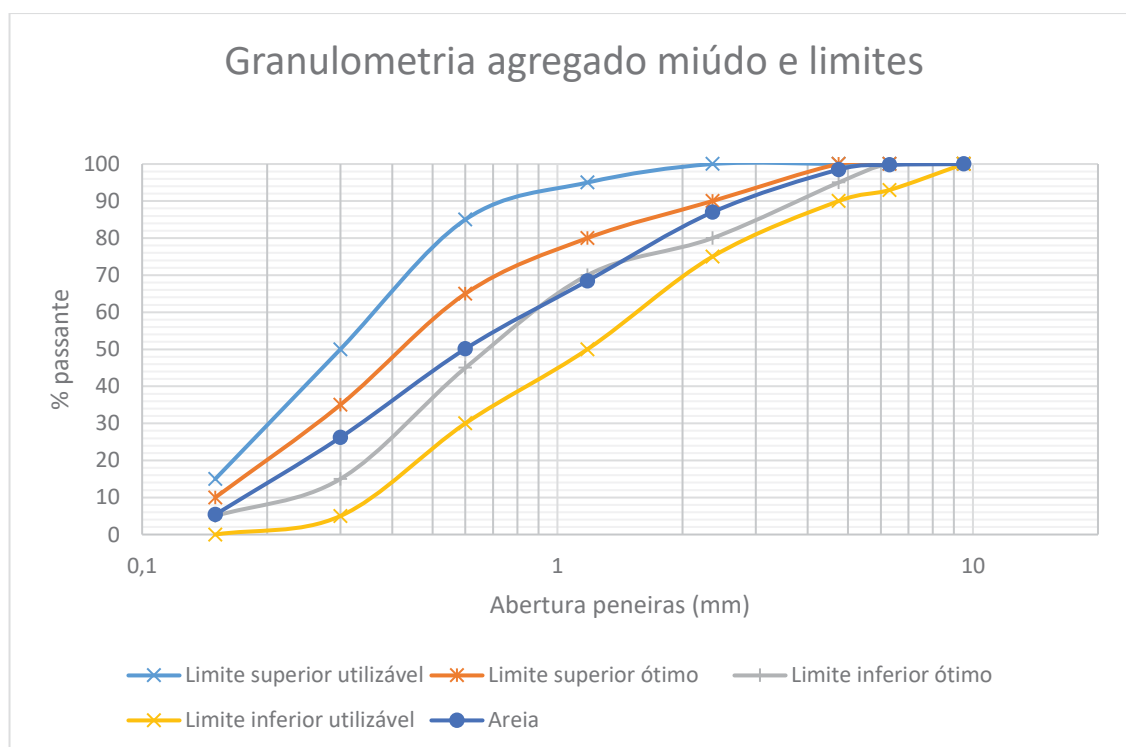
A NBR 7211 (ABNT, 2022) estipula o valor máximo de absorção 5% para a areia quando o concreto está protegido do desgaste superficial (3% quando submetido

ao desgaste superficial), e de 2% para o pedrisco e brita quando a % de absorção é inferior a 1% (o limite da absorção é reduzido para 1% quando a absorção é superior a 1%). Assim, o teor de pulverulento obtido para a areia não atende aos requisitos da norma enquanto o teor de pulverulento da brita e do pedrisco atendem.

- Granulometria

A distribuição granulométrica da areia assim como os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009) são apresentados na Figura 19. O detalhamento da distribuição granulométrica dos agregados é apresentado no Apêndice 4.

Figura 19 - Granulometria areia com limites estabelecidos pela norma



O agregado miúdo escolhido para o desenvolvimento desse trabalho possui dimensão máxima ($D_{m\acute{a}x}$) é de 4,75 mm. Optou-se também por utilizar um agregado graúdo de $D_{m\acute{a}x}$ de 9,5 mm (brita 0) e um segundo de $D_{m\acute{a}x}$ de 19 mm (brita 1).

Conforme pode ser observado na Figura 19, a distribuição granulométrica da areia se encontra majoritariamente dentro da zona ótima recomendada pela NBR 7211 (ABNT, 2009). É possível ainda observar que a distribuição granulométrica da

areia é contínua. Na Figura 20 é apresentado o material retido em cada peneira da amostra de areia após o peneiramento mecânico.

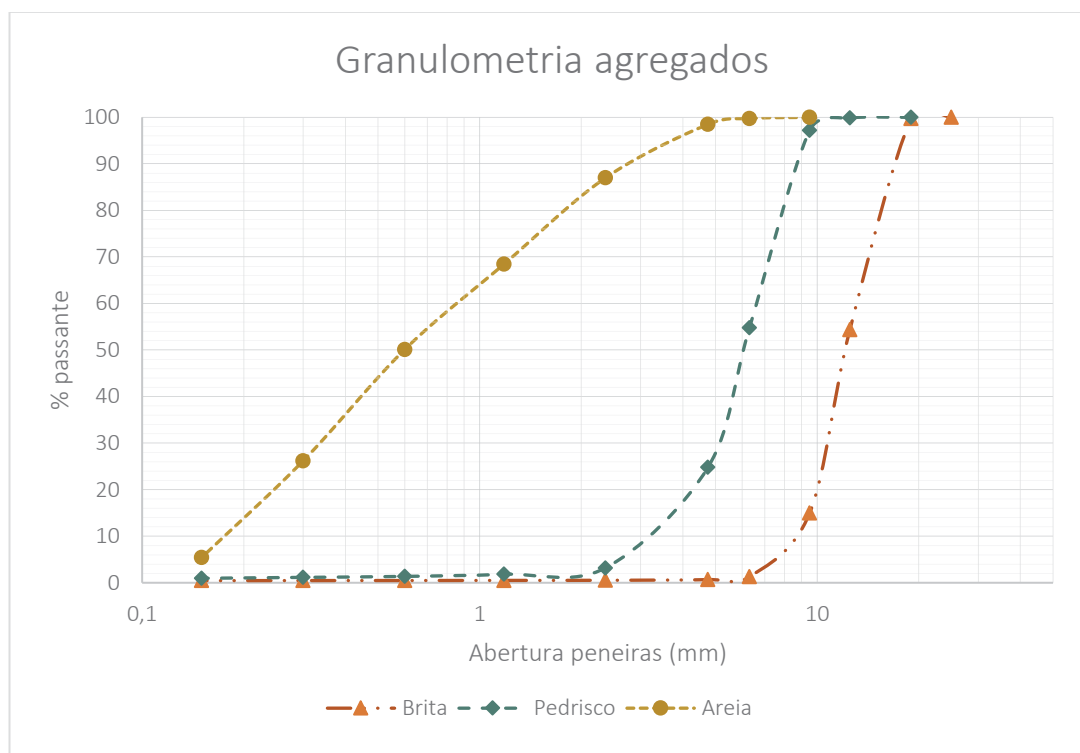
Figura 20 - Material retido por peneira (areia)



FONTE: A autora

A distribuição granulométrica do pedrisco e da brita são apresentadas na Figura 21. Optou-se também por apresentar a distribuição granulométrica da areia na mesma figura para mais fácil visualização.

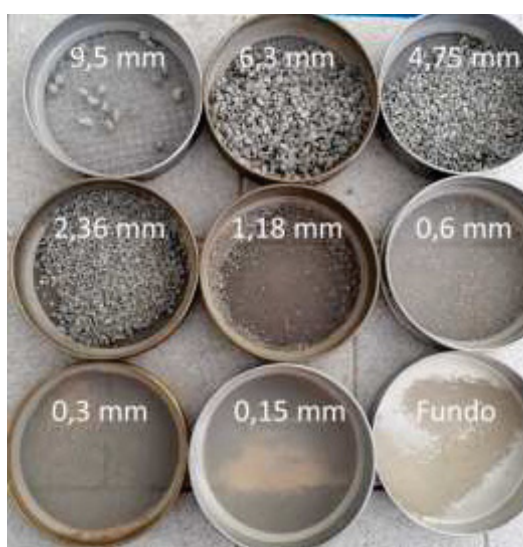
Figura 21 - Curva granulométrica dos agregados



FONTE: A autora

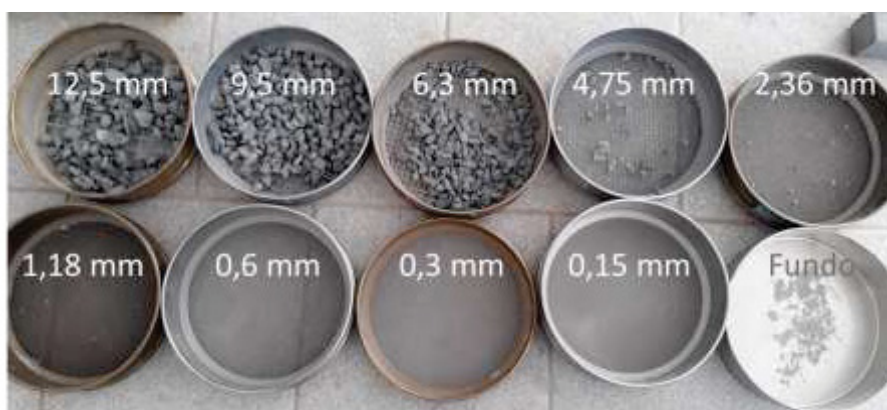
É possível observar na Figura 21 que o formato e inclinação das curvas de distribuição granulométrica do pedrisco e da brita são similares, sendo mais uniformes que a areia. Nas Figuras 22 e 23 é apresentado o material retido por peneira após peneiramento do pedrisco e da brita, respectivamente.

Figura 22 - Material retido por peneira (pedrisco)



FONTE: A autora

Figura 23 - Material retido por peneira (brita)



FONTE: A autora

O material retido em cada peneira após processo de peneiramento da brita e do pedrisco ilustram a curva granulométrica. Nas peneiras de malha de maior abertura há uma maior quantidade de material retido enquanto nas peneiras mais finas há uma quantidade pequena de material.

3.1.3 Aditivo químico

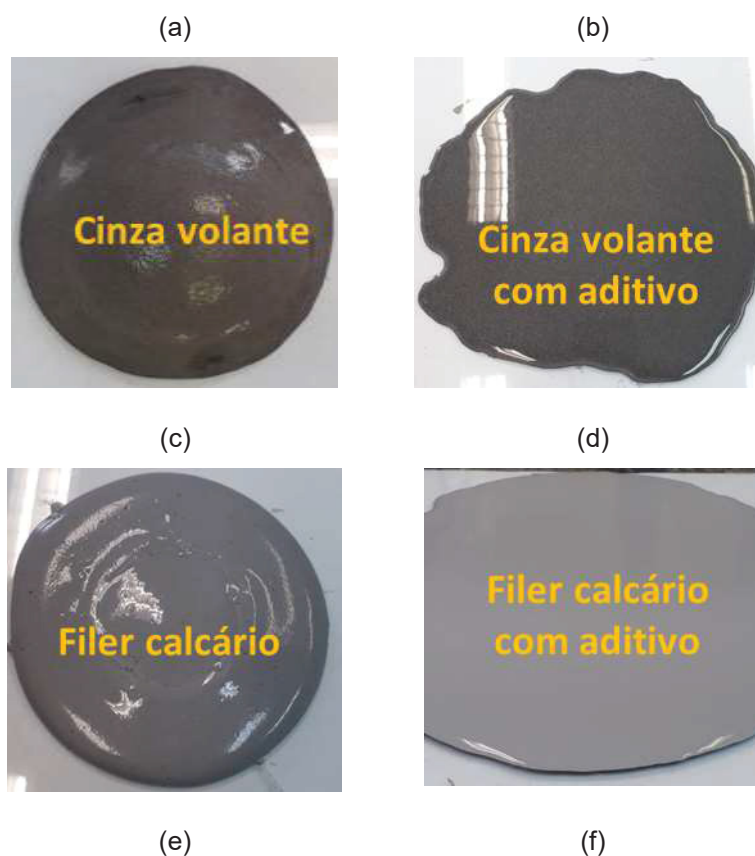
A pasta do concreto é composta por materiais granulares finos envoltos em água. Nessa situação há uma grande tendência de aglomeração dos grãos devido à força de atração entre eles (força de van der Waals). A dispersão das partículas é fundamental para otimizar o processo de homogeneização, o empacotamento de partículas e o comportamento reológico do concreto (OLIVEIRA *et. al.*, 2000). A fim de mitigar a aglomeração foi utilizado, na produção dos concretos, o aditivo classificado com aditivo redutor de água de base policarboxilato, conforme a NBR 11768 (ABNT, 2019). A densidade do aditivo foi fornecida pelo fabricante, igual a 1,09 g/cm³.

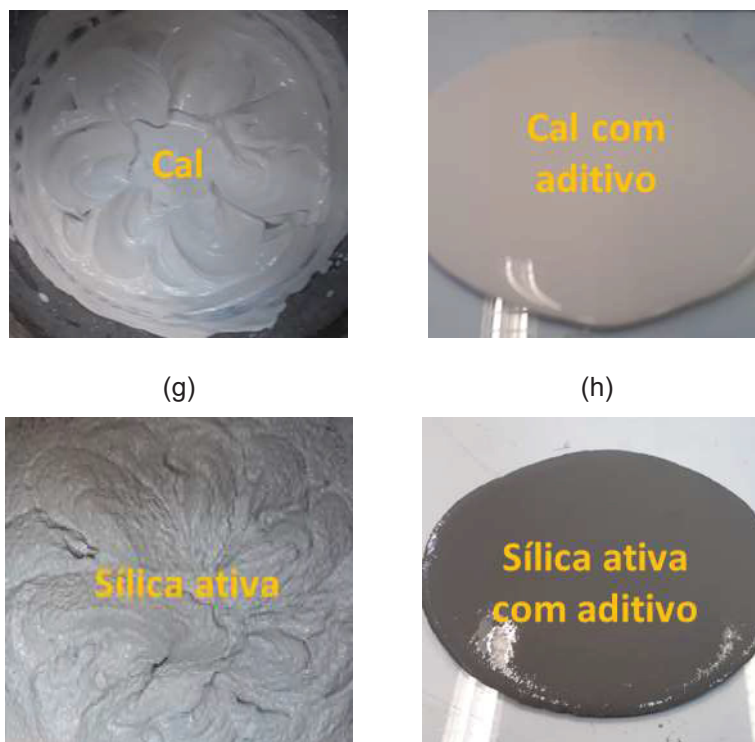
Devido à elevada quantidade de finos presente nos concretos dosados escolheu-se também investigar o efeito do aditivo em todos os materiais finos. Tal investigação teve como objetivo determinar a efetividade do aumento da dosagem do aditivo para um teor superior ao recomendado pelo fabricante (5% em relação à massa de cimento). Foram produzidos 150 ml de pasta para cada uma das adições. A dosagem das pastas seguiu o padrão de relação água/aditivo de 0,4 e teor de aditivo

de 5% da massa da adição ensaiada. Durante a execução do ensaio foi percebida a necessidade de adicionar mais água nas pastas de cal e de sílica (relação 0,4 foi insuficiente para envolver todos os grãos). Para essas a relação água/adição foi modificada para 0,7.

O procedimento de mistura foi dividido em duas etapas, na primeira etapa a pasta foi composta exclusivamente de água e adição. Nessa etapa a quantidade total de água e adição foram despejadas na cuba da argamassadeira e misturadas em velocidade baixa por dois minutos. Após o tempo de mistura foi analisada a consistência da pasta pelo ensaio de espalhamento utilizando o mini cone de Kantro. Na segunda etapa foi adicionado o aditivo na cuba e toda a pasta foi misturada por mais dois minutos. Após finalização da segunda etapa foi novamente analisada a consistência da pasta. A comparação entre os resultados obtidos nas duas etapas permitiu observar o efeito do aditivo em cada uma das adições estudadas (Figura 24).

Figura 24 - Efeito do aditivo redutor de água nas adições: (a) cinza volante, (b) cinza volante com aditivo, (c) filer calcário, (d) filer calcário com aditivo, (e) cal; (f) cal com aditivo; (g) sílica e (h) sílica com aditivo





FONTE; A autora

É possível concluir que o aditivo redutor de água escolhido para essa pesquisa é capaz de agir nas adições utilizadas. Nas imagens referentes às pastas de cal e sílica (Figura 24, imagens (e) e (g), respectivamente) é possível observar que mesmo com o aumento do teor de água ainda não foi possível obter uma consistência fluida o suficiente para realizar o ensaio de mini cone de Kantro. O ensaio foi viabilizado após a adição do aditivo à pasta.

3.2 DOSAGEM TEÓRICA

O desenvolvimento dos traços dessa pesquisa se deu em três partes. Inicialmente foi escolhido o modelo de dosagem a ser seguido, o de Alfred (Funk e Dinger, 1980 apud Oliveira et al., 2000). Na sequência foi desenvolvido um algoritmo em Python para determinar a proporção que apresenta menor desvio da curva sugerida pelo modelo de Alfred para os materiais estudados. Após obter a proporção com menor desvio foram determinados os traços derivados a partir da substituição do cimento por sílica e dos finos (cimento, sílica, filer e cinza volante) ou da areia por cal. A seguir são detalhadamente explicadas as três partes que compõe a dosagem teórica dessa pesquisa.

3.2.1 Modelo de Alfred

A dosagem dos concretos produzidos nessa pesquisa é baseada no modelo de Alfred (Funk e Dinger, 1980 apud Oliveira et al., 2000). A aplicação desse modelo requer como dado de entrada a distribuição granulométrica de todos os materiais e a determinação do valor do coeficiente de distribuição denominado “q”.

O fator q (coeficiente de distribuição) é relacionado ao grau de empacotamento (FUNK; DINGER, 1994). Segundo Vanderlei (2004), o fator q, ao assumir valores de até 0,25 retorna uma mistura auto adensável. O autor ainda explica que a diminuição do valor associado a “q” está relacionada ao aumento de finos na mistura.

Para essa dissertação o valor de q escolhido foi de 0,25. Justifica-se essa escolha a fim de se obter um concreto auto adensável com o consumo de cimento de até 280 kg/m³. O limite estabelecido para o consumo de cimento é baseado no mínimo estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 2015) para concreto estrutural pertencente à classe de agressividade ambiental II (zona urbana).

Após definido o valor de “q” e determinada a curva granulométrica de cada um dos materiais que constituem o concreto determina-se a curva ideal para os materiais estudados a partir da aplicação da Equação 15. A curva ideal do modelo de Alfred, caracterizada pela maior densidade de empacotamento para aquela condição, representa a distribuição granulométrica ideal dos materiais estudados para o coeficiente de distribuição (q) utilizado.

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde,

CPFT(%) = porcentagem de partículas menores que D ou porcentagem passante em determinada peneira;

q = Coeficiente de distribuição;

D = Diâmetro da partícula (faixa granulométrica estudada);

D_s = Diâmetro da menor partícula da distribuição;

D_L = Diâmetro da maior partícula da distribuição.

Tendo estabelecido a curva ideal para a situação estudada o passo seguinte consiste em determinar a proporção entre os materiais componentes, cuja curva granulométrica (de todo o conjunto) mais se aproxime à curva ideal obtida anteriormente pelo uso do modelo de Alfred. Para cada uma das proporções testadas deve-se determinar a curva granulométrica do conjunto dos materiais com as respectivas proporções. Esse processo é dado pela média ponderada das distribuições granulométricas em que os fatores de multiplicação são os percentuais em volume de cada material da mistura, posteriormente convertidos para proporção em massa para fins de cálculo (YU *et al.*, 2015).

A escolha da proporção que apresentará a maior densidade de empacotamento se dá a partir da comparação da curva ideal com a curva gerada pelas proporções. A determinação das proporções (mistura) que mais se aproxima da ideal é realizada pelo método dos mínimos quadrados. Esse método consiste em somar os desvios dos quadrados, ou resíduo (RSS), de cada peneira (YU *et al.*, 2015; PEREIRA, 2010). A proporção a ser escolhida é aquela que apresenta menor somatório de desvio de cada faixa granulométrica estudada, isso é, menor resíduo.

3.2.2 Algoritmo

Tendo em vista a infinidade de possibilidades de combinação dos materiais decidiu-se por desenvolver um algoritmo (Apêndice 5) capaz de gerar um elevado número de proporções a serem analisadas, de forma iterativa. O algoritmo aplica, para cada uma das proporções geradas, a equação de Alfred (Equação 15) e em seguida o método dos mínimos quadrados para determinação do resíduo daquele teste. Ao final, o programa retorna a proporção que mais se aproxime da curva ideal para os materiais escolhidos para o coeficiente de distribuição no valor de 0,25, isso é, a proporção com menor valor de resíduo.

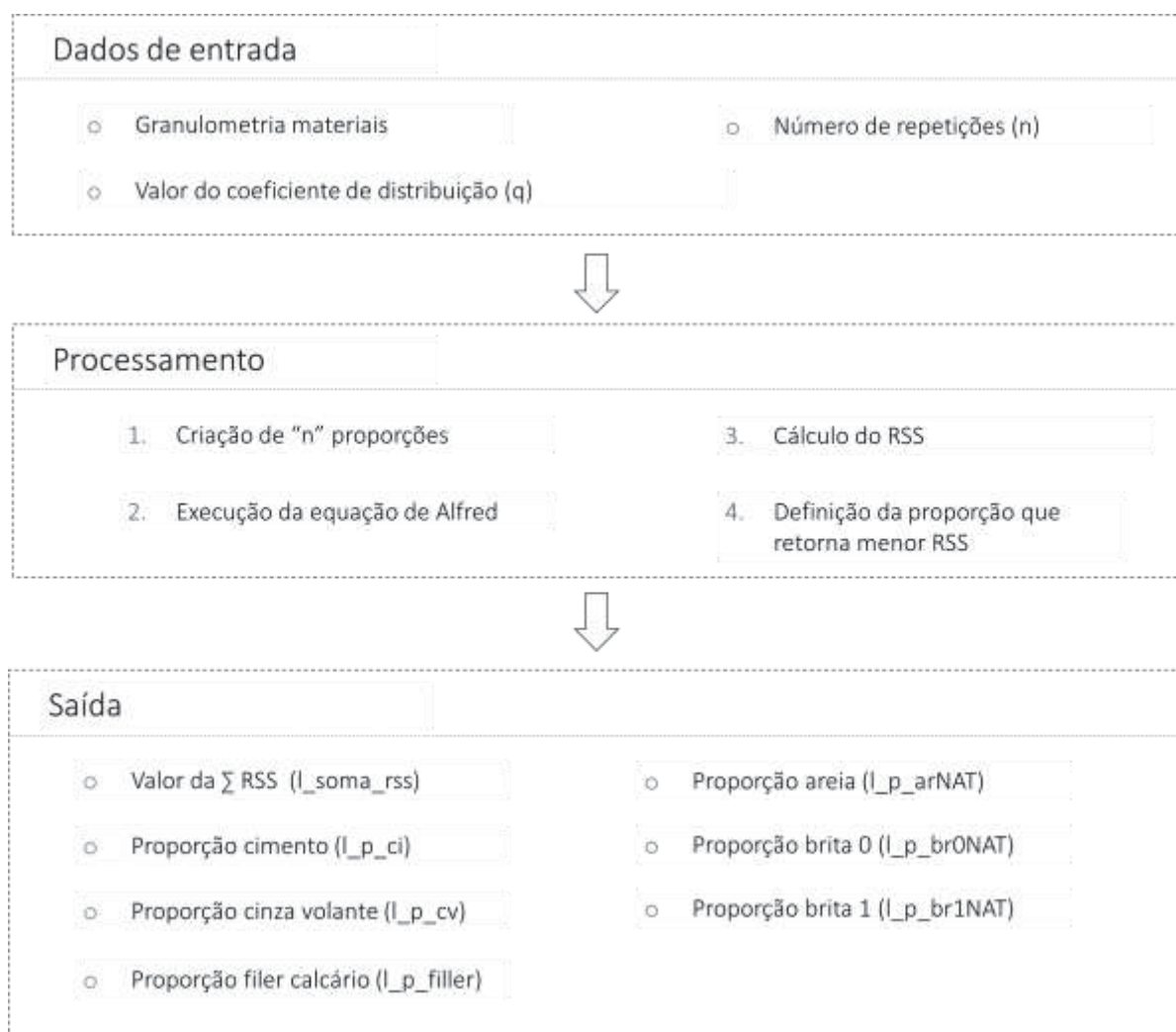
Para o desenvolvimento do algoritmo foi utilizada a linguagem de programação Python, cujo código fonte, livre e aberto, encontra-se disponível no site oficial da organização de gerenciamento da linguagem, *Python Software Foundation* (2022). O uso da linguagem Python para desenvolvimento do algoritmo foi escolhido devido à sua flexibilidade e facilidade de uso (linguagem de alto nível). Um segundo fator determinante na escolha diz respeito às bibliotecas disponíveis, como a direcionada à manipulação e análise de dados (PANDAS, 2022) assim como à

relacionada à viabilização do uso matrizes e operações matemáticas complexas (NUMPY, 2022).

O desenvolvimento e a execução do programa criado foram realizados no ambiente de desenvolvimento do Google, o *Google Colaboratory* (GOOGLE, 2022). O *Google Colaboratory*, conhecido como *Google Colab*, é um produto do *Google Research* que permite o desenvolvimento de códigos em Python online, sem a necessidade de download ou instalação de qualquer software ou editor de texto.

O código desenvolvido pode ser dividido em três partes: dados de entradas, processamento e saída (Figura 25). As entradas são os dados inicialmente fornecidos. O processamento é todo o cálculo realizado pelo programa. A saída é o resultado devolvido pelo programa ao final da execução.

Figura 25 - Esquema funcionamento algoritmo de dosagem



FONTE: A autora

Além da distribuição granulométrica dos materiais e o valor de “q”, para a execução do algoritmo é também necessário definir quantas proporções aleatórias (n) o programa deve gerar e, conseqüentemente, realizar todo processo matemático do método de dosagem de Alfred. O valor definido para n foi de 1.000.000 (um milhão).

Após a inserção dos dados de entrada é iniciada a fase de processamento, que é baseada na simulação de Monte Carlo (Krauth, 2006). Essa simulação tem como objetivo a previsão de um resultado a partir de uma distribuição de probabilidade para uma variável (proporção dos materiais utilizados na dosagem). O processamento é baseado em um cálculo sucessivo utilizando um conjunto diferente de números aleatórios contidos no intervalo de mínimo e máximo previamente determinados. O teste de Monte Carlo é repetido n de vezes (no presente trabalho n = 1.000.000), sendo que quanto maior o número de repetições, menor o erro (diferença) do resultado obtido com o objetivo inicialmente proposto (IBM, 2022). Para essa pesquisa o intervalo definido foi entre zero e um, sendo que a soma das proporções deveria ser inferior a um e superior a zero.

Além da definição de “n” para primeira etapa do processamento foram também determinadas duas restrições para as proporções aleatórias a serem criadas, são elas:

- Proporção em massa do cimento \geq Proporção em massa da cinza volante + Proporção em massa do filer
- Proporção em massa da cinza volante \geq Proporção em massa do filer

Durante a realização dos testes de dosagem teórica foram retornados consumos de cimento muito baixo (cerca de 100 kg/m³). Diante de repetidos resultados similares optou-se por definir a restrição quanto ao consumo de cimento.

Uma segunda situação observada nessa fase foi o retorno de consumo de adições alternado, isso é, vezes o consumo de filer calcário era significativamente superior, vezes o consumo de cinza volante era significativamente superior. Esse cenário levou à adoção da restrição quanto ao consumo de cinza volante.

É importante salientar que a escolha por priorizar um maior consumo de cinza volante em detrimento ao filer tem como base o objetivo de promover o consumo do

hidróxido de cálcio produzido a partir da hidratação do cimento pela reação pozolânica da adição. O consumo da portlandita por parte da reação pozolânica gera um déficit de hidróxido de cálcio a ser fornecido pela adição de cal nos traços derivados do programa.

A ocorrência de resultados não satisfatórios para o consumo dos finos está relacionada à similaridade da distribuição granulométrica dos materiais finos (cimento e adições). Quando há tal similaridade pode vir a acontecer a situação descrita devido ao procedimento de cálculo adotado. Conforme explicado, um elevado número de proporções é testado e a proporção que apresenta menor resíduo é retornada pelo programa. Quando dois ou mais materiais apresentam uma distribuição granulométrica similar, devido à aleatoriedade como são geradas as proporções, o resultado devolvido pelo programa pode apresentar consumo predominante alternado entre os dois materiais distintos por esses serem capazes de se adequarem de forma similar à curva ideal gerada pelo modelo de Alfred.

Após o processamento, o resultado do resíduo e das proporções em volume do cimento, da cinza volante, do filer calcário, da areia, da brita (brita 1) e do pedrisco (brita 0) são retornados. Essa etapa do código é chamada de saída. A partir da proporção em volume dos materiais granulares é possível calcular a proporção em massa e, conseqüente, o traço unitário.

Para garantir que o resultado da execução do código apresentou o menor valor de resíduo tomou-se, como parte da metodologia, três execuções do código. Conforme explicado anteriormente, o programa calcula um milhão de proporções e retorna a de menor valor de resíduo. Ao comparar as três execuções notou-se proximidade das proporções e valores de resíduo para todos os retornos, com variações não significativas (a partir da terceira casa decimal). Ainda assim, dentre eles, foi escolhido o de menor resíduo.

3.2.3 Determinação do consumo dos materiais granulares

Para o desenvolvimento dessa dissertação foram dosados seis traços (Tabela 9), dos quais um foi obtido a partir do resultado do algoritmo programado para executar o modelo de Alfred e os outros cinco são derivados do primeiro traço.

Tabela 9 - Nomenclatura e composição pasta traços C1 e C2

Grupo	Nomenclatura traços	Composição pasta
Grupo 1	C1	C + FC + CV
	C1_F	C + FC + CV + CH
	C1_A	C + FC + CV + CH
Grupo 2	C2	C + FC + CV + SA
	C2_F	C + FC + CV + SA + CH
	C2_A	C + FC + CV + SA + CH

Fonte: A autora

Legenda: C – Cimento Portland (CP V – ARI); CH – Cal hidratada (CH I); CV – Cinza volante; FC – Filer calcário; SA – Sílica ativa

O traço C1 foi fornecido pelo algoritmo desenvolvido para executar o modelo de Alfred. A partir dele foi criado o traço C2 que apresenta como diferença a presença de sílica ativa. O teor de sílica ativa escolhido foi de 10% em substituição à massa de cimento.

Dentro de cada um dos dois Grupos foi adicionada a cal de duas maneiras, em substituição aos finos (Classe F, traços C1_F e C2_F) e em substituição à areia (Classe A, traços C1_A e C2_A), ambas em volume. Optou-se por adicionar a cal de duas maneiras diferentes para investigar os efeitos de cada opção.

- Substituição de cal

Para definir a quantidade de cal a ser utilizada em cada traço foi inicialmente determinado o teor de portlandita disponível na cal (43,90%) conforme Equação 11. O resultado da aplicação dessa equação aos resultados de termogravimetria da cal fornecem uma porcentagem em massa da quantidade de portlandita por unidade de massa da cal.

Em seguida, a partir do resultado da atividade pozolânica por Chapelle das adições e do consumo de cada uma das adições nos traços C1 e C2, foi possível determinar o déficit de portlandita gerado pela atividade pozolânica das adições. É importante ressaltar que para este cálculo parte-se da premissa de que as adições vão consumir o teor quantificado no ensaio de Chapelle.

A partir do consumo de portlandita e do teor de portlandita disponível na cal, foi possível determinar a quantidade de cal em massa necessária para repor 100% do hidróxido de cálcio consumido pela reação pozolânica das adições. Para a aplicação

da Equação 16, deve-se, dentro da parcela do somatório, realizar a operação para todas as adições presentes no traço calculado.

$$M_{cal} = \frac{\sum(C_{adição} * AP_{adição})}{\%Ca(OH)_{cal}} \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde,

M_{cal} – Massa de cal necessária para repor a portlandita consumida (kg);

$C_{adição}$ – Consumo de cada adição por traço (kg);

$AP_{adição}$ – Atividade pozolânica de cada adição (mg Ca(OH)₂/g);

$\%Ca(OH)_{cal}$ – Teor de portlandita da cal.

A adição de cal, tanto em substituição aos finos (cimento, cinza volante, filer calcário e, para o Grupo 2 também a sílica) quanto à areia, foi realizada em volume de forma que o somatório do volume de todos os materiais fosse 1m³. É importante ressaltar que a substituição dos finos pela cal foi realizada de forma que o volume total a ser substituído fosse igualmente dividido entre todos os materiais finos que compunham o traço.

Para a dosagem da Classe F, conforme finos eram retirados do traço, menor era a demanda pela cal por reduzir o consumo de portlandita. Para tanto, a quantidade de cal dos traços da Classe F foi ajustada, por convergência, de acordo com o volume retirado de cada um dos finos de forma a garantir que não haveria portlandita extra nesses traços.

- Consumo água

A quantidade de água utilizada foi fixada em relação aos finos, isso é, a relação A/F, que foi no valor de 0,28 para todos os traços, definida a partir do teste de dosagem apresentado a seguir, no item 3.3.1. Optou-se por abordar o consumo de água por essa ótica devido à variação do consumo de materiais finos, de 473 kg/m³ a 703 kg/m³. Considerando o intervalo de consumo de materiais finos para os concretos dessa dissertação, caso o consumo de água fosse determinado a partir da quantidade de cimento a disponibilidade de água para envolver todos os grãos seria diferente entre os traços e, para alguns deles, insuficiente devido ao fato dessa quantidade aumentar conforme a superfície específica da mistura aumenta (maior teor de finos).

3.3 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO CONCRETO

A seguir são apresentados os procedimentos de mistura e caracterização dos traços dosados para essa pesquisa. Inicialmente é apresentado o procedimento de produção. Na sequência são abordados os ensaios realizados para caracterizar o concreto no estado fresco assim como no endurecido.

3.3.1 Produção

A produção dos concretos envolveu duas partes, a etapa de teste de dosagem e a produção oficial dos concretos que compõe esse trabalho. A seguir tais etapas são descritas.

- Teste de dosagem

O procedimento de dosagem teórica desenvolvido até o momento fornece a proporção dos materiais que compõe o traço dos concretos estudados, ficando ainda pendente a dosagem da água. Devido à variação dos consumos de finos dos traços e consumo de cimento, optou-se por padronizar o consumo de água em relação ao consumo total de finos do traço e não apenas em relação ao cimento.

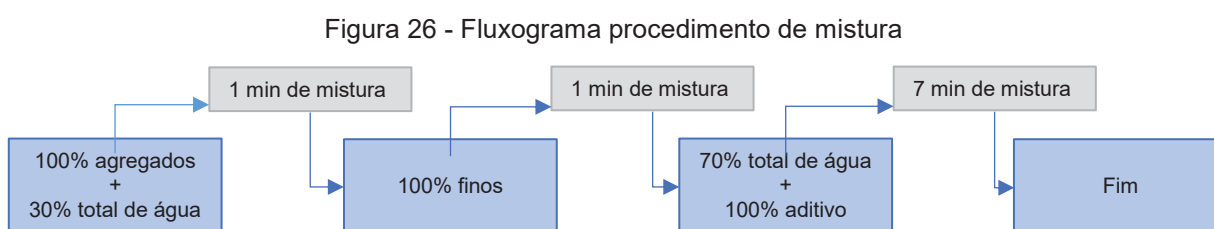
Com o intuito de definir a quantidade de água necessária para envolver os grãos e prover trabalhabilidade condizente com um CAA à mistura optou-se por desenvolver a pasta referente ao traço C2_A. Justifica-se a escolha desse traço por esse ter sido avaliado como o pior cenário quanto à composição (maior consumo de finos, 703 kg/m³, e maior quantidade de cal, 219 kg/m³).

Idealmente, para garantir melhor desempenho individualizado dos concretos no estado fresco, a dosagem de água deveria ser realizada caso a caso. Apesar disso, para possibilitar a comparação de desempenho entre os traços foi necessário reduzir o número de variáveis. Portanto, com o intuito de prover similar quantidade de água para envolver os grãos de todos os traços optou-se por reproduzir a relação A/F encontrada no caso considerado como pior devido ao elevado teor de finos (sendo parte significativa dos finos, cal: 703 kg/m³, de finos e de cal, 219 kg/m³).

Devido ao elevado teor de finos das misturas optou-se por definir o teor do aditivo em 5% (limite superior recomendado pelo fabricante). A dosagem da água foi iniciada na a/f de 0,13, valor correspondente a a/c de 0,35 para o traço C2_A. O teste de dosagem seguiu o mesmo procedimento utilizado para a produção dos concretos (Figura 26), apresentado a seguir. A modificação do processo de dosagem de água em relação à produção foi a seguinte, após o último passo foi adicionada quantidade de água de 0,018 a/f (correspondente a 0,05 em a/c, para o C2_A) e misturado por mais 1 minuto. O passo extra foi repetido até atingir a quantidade de água suficiente para obtenção de trabalhabilidade característica do CAA avaliada pelo ensaio de *slump flow*.

- Produção definitiva

A produção dos concretos utilizados na pesquisa seguiu a metodologia descrita no fluxograma apresentado na Figura 26. Alguns pontos são ressaltados. Para evitar perda da água dosada na parede da betoneira, antes do início da produção a betoneira foi lavada e completamente escorrida. Um segundo ponto sobre a mistura é a adição do aditivo redutor de água. Com o intuito de melhor difundir o aditivo na mistura (PEREIRA; NASCIMENTO; JOFFILY, 2017) optou-se por diluir todo aditivo no volume de água correspondente à segunda adição de água na betoneira.



FONTE: A autora

O tempo de mistura escolhido de 7 minutos teve como intenção garantir completa homogeneização reduzindo ainda a probabilidade de incorporação de ar devido a um tempo de mistura elevado. É importante ressaltar que o tempo de mistura foi mantido para todos os traços.

3.3.2 Caracterização no estado fresco

Para a avaliação do CAA no estado fresco as propriedades de fluidez, habilidade passante, resistência à segregação e habilidade de preenchimento devem ser averiguadas. Para tal, se faz necessária a realização de mais de um tipo de ensaio (EFNARC, 2005). Portanto, a avaliação das propriedades dos concretos no estado fresco foi realizada a partir dos ensaios listados na Tabela 10.

Tabela 10 - Ensaio estado fresco

Ensaio Estado fresco	Referência
Espalhamento	NBR 15823-2 (2017a)
Anel J	NBR 15823-3 (2017b)
Funil V	NBR 15823-5 (2017c)
Fonte: A autora	

A avaliação da propriedade de habilidade de preenchimento foi efetuada a partir dos ensaios de Espalhamento (assim como pelo T500, obtido através do mesmo ensaio) e pelo Funil V. O ensaio de Anel J foi realizado para avaliar a propriedade de habilidade passante.

3.3.3 Caracterização no estado endurecido

A avaliação das propriedades dos concretos no estado endurecido foi realizada a partir dos ensaios listados na Tabela 11. Os corpos de prova foram moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003d).

Tabela 11 - Ensaio no estado endurecido

Ensaio Estado Endurecido	Referência	Idade (dias)	Número de CP's (amostras)	Dimensão CP's (cm)
Resistência à compressão	NP EN 12390-3	90	4	10 x 10 x 10
Absorção por imersão	NBR 9778 (2005)	91	3	10 x 10 x 10
Absorção por capilaridade	NBR 9779 (2012)	91	3	10 x 10 x 10

Fonte: A autora

Legenda: CP's: corpos de prova

O ensaio mecânico foi realizado para caracterizar o concreto em seu estado endurecido. O número de corpos de prova designados para o ensaio é superior ao mínimo recomendado pela norma de referência.

A preparação dos corpos de prova para o ensaio de determinação da resistência à compressão foi composta por duas partes. A primeira de cura submersa por 85 dias em água. O período foi estipulado com intuito de prover tempo suficiente para o desenvolvimento das reações pozolânicas das adições utilizadas. A segunda etapa da preparação consistiu no armazenamento dos corpos de prova em câmara seca para estabilização do teor de umidade. Essa etapa teve duração de cinco dias e ocorreu na câmara seca em uma temperatura igual a 22 ± 2 °C e umidade relativa correspondente a $50\pm 10\%$. Já a preparação dos corpos de prova para os ensaios de absorção por imersão e capilaridade seguiram o procedimento recomendado pelas respectivas normas.

Os ensaios escolhidos apresentam relação com a permeabilidade e densidade do esqueleto granular do concreto. Tendo em vista a ligação da penetração de CO_2 no concreto com sua porosidade e arranjo dos poros, esses ensaios fornecem parâmetros relevantes para a avaliação da durabilidade do concreto frente à carbonatação.

Ressalta-se ainda que a escolha por corpos de prova cúbico (10 x 10 x 10 cm) teve como intensão a redução do consumo de materiais. Essa necessidade é justificada tendo em vista que o desenvolvimento desta pesquisa se deu durante o período de pandemia de COVID-19 e que, por isso, havia baixa disponibilidade de insumos.

3.4 AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO

A avaliação da resistência à carbonatação dos traços produzidos para esse trabalho foi realizada a partir da exposição de corpos de prova de dimensão 10 x 10 x 10 cm ao ambiente de carbonatação acelerada. A preparação das amostras para o ensaio foi composta de duas etapas, a primeira de cura submersa por 90 dias e a segunda de armazenamento dos corpos de prova na câmara seca (temperatura igual a 22 ± 2 °C e umidade relativa correspondente a $50\pm 10\%$) de até completarem 125 dias de idade. O ensaio teve duração de 100 dias a uma taxa de concentração de CO_2 de $5\pm 1\%$, umidade relativa de $65\pm 5\%$ e temperatura de 25 ± 2 °C. A escolha dos

parâmetros de ensaio foi a mesma utilizada por Medeiros, Raisdorfer e Hoppe Filho (2017).

Os CP's foram posicionados na câmara de carbonatação com a face superior (a face livre, da direção de moldagem) para baixo, em contato com a prateleira. Optou-se por esse posicionamento pois a face que não esteve em contato com a forma apresenta superfície irregular e diferente de todas as outras faces, dificultando a avaliação da frente de carbonatação. Essa face não é avaliada. O posicionamento dos CP's na câmara também obedeceu às duas seguintes regras: 3 cm de distância das bordas (para os que foram posicionados na borda) e 1 cm de espaçamento entre os CP's. O posicionamento dos CP's na câmara de carbonatação pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 - Posicionamento dos CP's na câmara de carbonatação



Fonte: A autora

Para garantir o teor de umidade relativa de $65\pm 5\%$ ao decorrer do ensaio foi utilizada uma solução saturada de nitrito de sódio, conforme executado por Medeiros (2008) em seu trabalho. A solução foi colocada em três béquers plásticos e distribuída entre as prateleiras da câmara de carbonatação (Figura 28).

Figura 28 - Solução saturada de nitrito de sódio



Fonte: A autora

A avaliação do avanço da frente de carbonatação foi realizada após 28, 60 e 100 dias de exposição. Para cada avaliação foram designados três corpos de prova por traço, garantindo um total de 72 medições (3 CP's x 2 metades de cada CP x 3 faces de análise x 4 medições por face).

Após cada um dos intervalos de exposição definidos foi verificado o avanço da frente de carbonatação mediante aspensão de solução de indicador colorimétrico do pH do concreto nos corpos de provas rompidos na metade. A solução utilizada como indicador foi de fenolftaleína. A produção da solução se deu a partir da agitação mecânica da mistura de 50g de álcool 99% e 1g de fenolftaleína em pó. Após completa dissolução foi acrescentada água destilada até completar 50ml de solução. Após preparo a solução foi armazenada a uma temperatura de $8\pm 2^{\circ}\text{C}$ para melhor conserva-la.

3.5 MICROESTRUTURA

Com o intuito de observar os produtos de hidratação das misturas a microestrutura dos concretos foi analisada. Foi realizado, com uso do equipamento TESCAN Vega 3, o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Foram preparadas amostras de aproximadamente 5 mm obtidas a partir da quebra do concreto.

Para a preparação as amostras foram desidratadas. O processo se deu em duas etapas. Primeiramente as amostras foram imersas em álcool etílico por 24h. Em seguida as amostras foram secas em estufa por 24h a 40°C . Esse processo de ensaio é descrito por Hoppe Filho *et. al.* (2021). Para submeter ao MEV, as amostras foram posicionadas em um *stub* (Figura 29).

Figura 29 - Amostras prontas para ensaio de MEV



FONTE: A autora

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O tratamento estatístico dos dados referentes aos resultados das análises do estado endurecido dos concretos foi realizado com intuito de excluir os que se distanciavam da média aritmética do conjunto de dados analisado.

A metodologia utilizada para cada grupo de dados analisado se deu pela definição de um intervalo de confiança (limite superior e inferior) que foi estabelecido a partir da média, desvio padrão e de um coeficiente relacionado ao nível de confiança (adotado 95%) atribuído à amostragem conforme Equação 17.

$$IC = \bar{X} \pm z \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde,

IC – Intervalo de confiança;

\bar{X} – Média;

z – Fator tabelado = 1,96 (para o nível de confiança de 95%);

σ – Desvio padrão;

n – Número de resultados.

No Apêndice 7 são apresentados os dados obtidos sem tratamento estatístico, assim como a média, desvio padrão, limite de confiança inferior e limite de confiança superior para cada grupo de dados.

Além do tratamento estatístico dos dados, com intuito de avaliar se os dados obtidos para os diferentes traços analisados apresentam diferença estatística significativa, foram realizados os testes ANOVA e de Tukey. A aplicação do teste de

variância ANOVA buscou identificar se as variações encontradas eram significativas enquanto o teste de Tukey auxiliou a determinar quais traços apresentavam tais diferenças.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

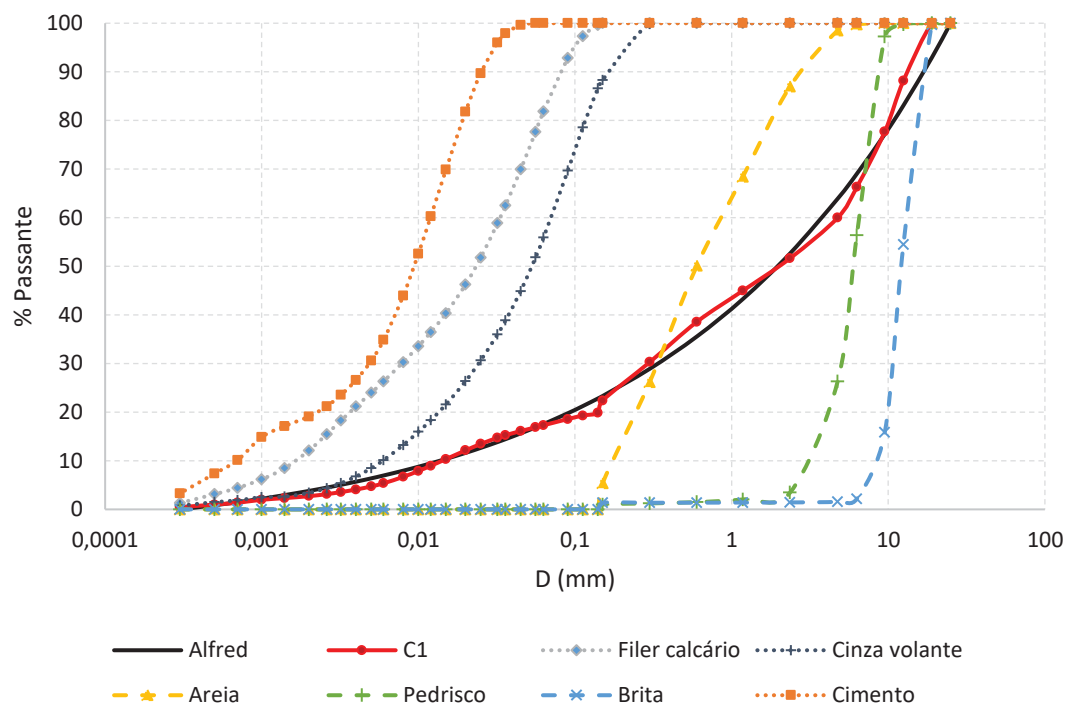
Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir da execução da metodologia descrita no Capítulo 3. Inicialmente são apresentados os resultados da dosagem teórica. Na sequência são apresentadas as características do concreto no estado fresco e endurecido. O capítulo é finalizado com a apresentação e discussão dos resultados de durabilidade do concreto.

4.1 DOSAGEM

4.1.1 Modelo de Alfred e código para dosagem

A aplicação do modelo de Alfred retorna, num primeiro momento, a curva de distribuição ideal para o coeficiente de distribuição escolhido. Para essa dissertação o coeficiente de distribuição escolhido foi de $q = 0,25$. Conforme explicado anteriormente, para a execução do modelo de Alfred foi desenvolvido um código em Python (Apêndice 5) que retornou a combinação de proporções entre cimento, cinza volante, filer calcário, areia e brita 0 e 1 que mais se aproximava da curva ideal fornecida pelo modelo de Alfred, isso é, o traço C1. Na Figura 30 é apresentada a curva granulométrica do C1, a curva ideal do Modelo de Alfred e as curvas dos materiais que compõe o traço.

Figura 30 - Distribuição granulométrica traço código x traço teórico



FONTE: A autora

A distribuição granulométrica do traço, conforme apresentado na Figura 30, gerou valor de resíduo de 0,0146 após executar o código com “n” recebendo o valor de 1.000.000 (um milhão de proporções geradas, sendo a de menor valor de RSS escolhida). Com base nas proporções em volume fornecidas pelo programa foi possível determinar o traço de referência do Grupo 1 e, a partir da substituição de 10% do cimento por sílica, determinou-se o traço de referência do Grupo 2 (Tabela 12).

Tabela 12 - Consumo de materiais granulares traço C1 (obtido pelo código) e C2 (derivado)

Traço	Propriedade	Material						
		C	SA	CV	FC	A	B0	B1
C1	Proporções. vol.*	10,60	-	6,08	4,03	34,38	19,04	25,87
	Traço unitário.	1	-	0,37	0,34	2,59	1,51	2,10
	Consumo (kg/m ³)	283	-	106	95	734	426	594
C2	Proporções. vol.*	9,50	1,50	6,05	4,01	34,22	18,96	25,75
	Traço unitário.	1	0,10	0,42	0,37	2,88	1,67	2,33
	Consumo (kg/m ³)	255	28	106	95	734	426	594

FONTE: A autora

LEGENDA: C – Cimento (CP V ARI); SA - Sílica ativa; CV – Cinza Volante; FC – Filer calcário; A – Areia, B0 – Pedrisco, B1 – Brita

4.1.2 Dosagem cal

A dosagem da cal em cada um dos traços foi baseada na quantidade necessária para repor 100% do hidróxido de cálcio consumido pelas adições pozolânicas com base na capacidade de fixar cal determinada pelo ensaio de Chapelle. A definição do consumo de cal foi embasada no Chapelle das adições pozolânicas e termogravimetria da cal, conforme Equação 16 apresentada no capítulo 3, seção 3.2.3 – Determinação dos traços.

Na Tabela 13 é apresentado o consumo de portlandita e cal para os traços da Classe F, em que a cal é adicionada em substituição aos finos (C1_F e C2_F) e para os traços da Classe A, em que a cal é adicionada em substituição à areia (C1_A e C2_A). Cálculo realizado conforme Equação 15 apresentada no item 3.2.1.

Tabela 13 - Consumo de portlandita e de cal traços com cal substituindo finos

Traço	Consumo de portlandita das adições pozolânicas (kg/m ³)		Consumo de Ca(OH) ₂ pelas adições (kg/m ³)	Consumo de cal (kg/m ³)
	Cinza volante	Sílica ativa		
C1_F	79	-	50	114
C1_A	106	-	67	153
C2_F	71	19	64	147
C2_A	106	28	96	219

FONTE: A autora

Apesar de os traços da Classe A e F serem derivados do traço de referência de cada Grupo, o consumo de adições é inferior para a Classe F devido à forma de adição de cal (em substituição aos finos). Consequentemente, o teor de cal demandado para esses traços também é inferior.

4.1.3 Traços de concreto

Após a execução do código e cálculo do teor de cal (Equação 15, item 3.2.1) obteve-se os traços que compõe essa pesquisa. Na Tabela 14 é detalhada a composição e parâmetros de cada um deles.

Tabela 14 - Detalhamento consumo e parâmetros traços

Parâmetros	C1	C1_F	C1_A	C2	C2_F	C2_A
Consumo de cimento (kg/m ³)	283	211	283	255	172	255
Consumo de filer calcário (kg/m ³)	95	71	95	95	64	95
Consumo de cinza volante (kg/m ³)	106	79	106	106	71	106
Consumo de sílica ativa (kg/m ³)	-	-	-	28	19	28
Consumo cal hidratada (kg/m ³)	-	114	153	-	147	219
Areia (kg/m ³)	734	734	468	734	734	348
Brita 0 (kg/m ³)	426	426	426	426	426	426
Brita 1 (kg/m ³)	594	594	594	594	594	594
Consumo de água (litros/m ³)	136	133	178	136	132	197
% Aditivo SP (sob massa de cimento)	5%	5%	5%	5%	6%	5%
% Aditivo SP (sob massa de adições)	2,92	2,22	2,22	2,63	1,82	1,81
Relação A/C	0,48	0,63	0,63	0,53	0,77	0,77
Relação A/AGL	0,35	0,46	0,46	0,35	0,51	0,51
Relação A/F	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Consumo de cimento + adições (kg/m ³)	389	290	389	389	262	389
Consumo de finos (kg/m ³)	484	475	637	484	473	703
Vol. de pasta (litros/m ³)	325	321	431	327	323	479
Vol. de argamassa no concreto (%)	62%	61%	62%	62%	61%	62%

FONTE: A autora

LEGENDA: M – massa; A/C – água/cimento; A/AGL - água/aglomerante (cimento + adições pozolânicas); AGL – cimento + cal + cinza volante + sílica; A/F – água/finos; SP – redutor de água.

O traço C1, obtido a partir da execução do código, dá origem ao C2, sendo esses os traços referência dos grupos 1 e 2, respectivamente. Para todos os traços que compõe a pesquisa, a quantidade de pedrisco e brita foram mantidas constante. A dosagem da areia foi alterada apenas nos traços C1_A e C2_A para substituição em volume da areia pela cal.

O consumo de cimento intencionado para o traço C1 (obtido pelo código) foi de 283 kg/m³ próximo ao recomendado pela NBR 12655 (ABNT, 2015) (280 kg/m³) para concreto estrutural pertencente à classe de agressividade ambiental II (zona urbana). A meta inicialmente estabelecida, de obtenção de um traço com consumo do mínimo recomendado para Classe de Agressividade II, foi atingida. Esse consumo se repete no traço C1_A. Ainda no grupo 1, o consumo do traço C1_F é inferior aos demais, no valor de 211 kg/m³, devido à substituição parcial dos finos por cal.

O consumo de cimento para os traços do grupo 2 seguiu o mesmo padrão do grupo 1. Os traços C2 e C2_A apresentaram o mesmo consumo de cimento, 255 kg/m³. Esse valor é inferior ao C1 devido à substituição em massa de 10% do cimento por sílica ativa. O traço C2_F possui o menor consumo de cimento dentre os traços de estudo, no valor de 172 kg/m³.

O consumo de cimento para os traços dosados foi condizente aos encontrados na literatura para CAA com baixo teor de cimento, conforme apresentado na Tabela 2 (item 2.1.2). Na Tabela 14 é possível encontrar consumos de cimento variando de 125 a 380 kg/m³, intervalo similar aos concretos dessa pesquisa, 172 a 283 kg/m³.

O consumo de agregado graúdo, que foi constante em todos os traços, apresentou uma baixa variação quando analisado em relação à porcentagem do volume total de sólidos por ele ocupada, 45% a 48%. Essa faixa de valores se encontra dentro do estipulado por Okamura e Ouchi (2003), de até 50%. O consumo de areia foi igual para os traços C1, C1_F, C2 e C2_F. Já os traços C1_A e C2_A, devido à adição de cal em substituição à areia, apresentaram consumo inferior, de 468 kg/m³ e de 348 kg/m³, respectivamente.

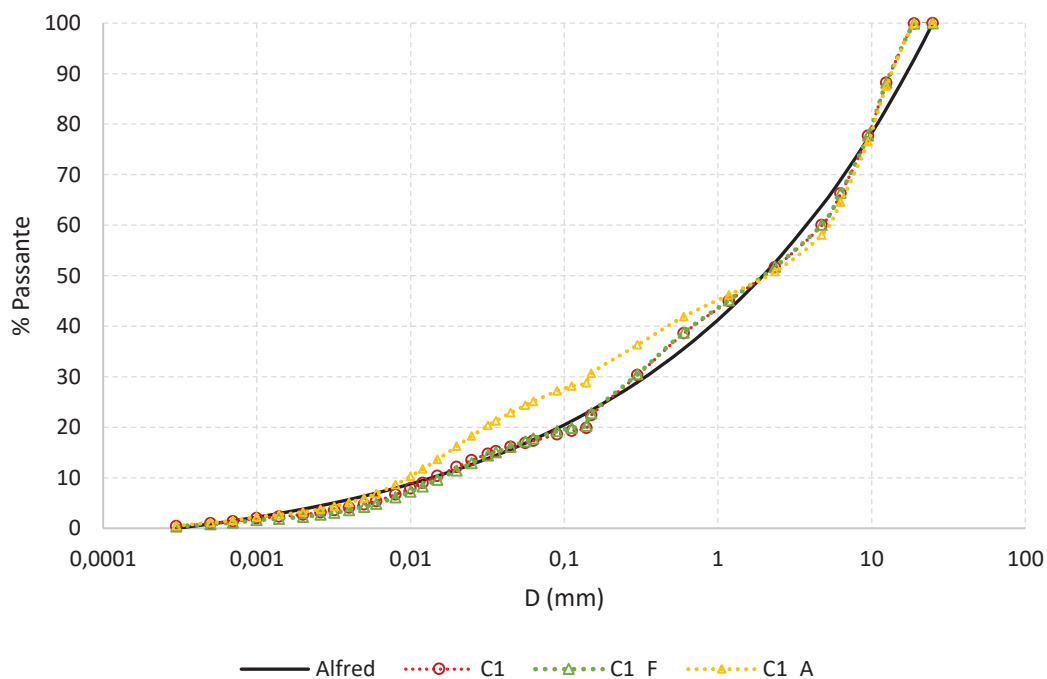
O consumo de água foi guiado pela relação água/finos (A/F), mantida constante no valor de 0,28 para todos os traços. O consumo, em litros por m³, variou entre 132 e 136 L/m³ para os traços de referência e da Classe F dos dois Grupos. Para a Classe A, o consumo de água foi de 178 l/m³ para o C1_A e de 197 l/m³ para o C2_A. Justifica-se o aumento do consumo de água para a Classe A devido ao aumento do consumo de finos, de 637 kg/m³ para o C1_A e de 703 kg/m³ para o C2_A, enquanto para os outros traços esse consumo é contido no intervalo de 473 a 484 kg/m³.

O teor de aditivo redutor de água foi alterado para o traço C2_F durante a sua produção. A consistência atingida com 5% foi seca, de baixa trabalhabilidade. Apesar da recomendação do fabricante limitar o uso ao teor de 5% em relação à massa de cimento, optou-se pelo uso de 6% para esse traço por ter sido constatado que o aditivo é capaz de agir nas adições utilizadas (olhar item 3.1.3 – Aditivo químico).

Apesar do aumento do teor de aditivo redutor de água para o traço C2_F quando comparado aos outros traços que compõe essa pesquisa, ao analisar o teor em relação à massa das adições (não apenas cimento), o consumo do C2_F é o segundo menor.

Já em relação ao empacotamento de partículas, os traços do Grupo 1 apresentaram boa adequação à curva ideal fornecida pelo Modelo de Alfred (Figura 31). Essa avaliação é realizada a partir do resíduo (RSS), calculado pelo método dos mínimos quadrados.

Figura 31 - Distribuição granulométrica e RSS Grupo 1



FONTE: A autora

Apesar de apenas o traço C1 ter sido dosado a partir do Modelo de Alfred, com resultado de RSS de 0,0146, o traço C1_F apresentou resultado de RSS próximo, no valor de 0,0155. Já o traço C1_A apresentou resultado de RSS superior aos outros traços do grupo, no valor de 0,0751.

A similaridade das curvas de distribuição granulométrica dos traços C1 e C1_F e, conseqüentemente, valores de RSS, pode ser justificado pela adição da cal em substituição aos finos. Apesar de alterar a distribuição granulométrica dos finos, a distribuição granulométrica da cal é próxima (ver item 3.1.1 e Apêndice 3).

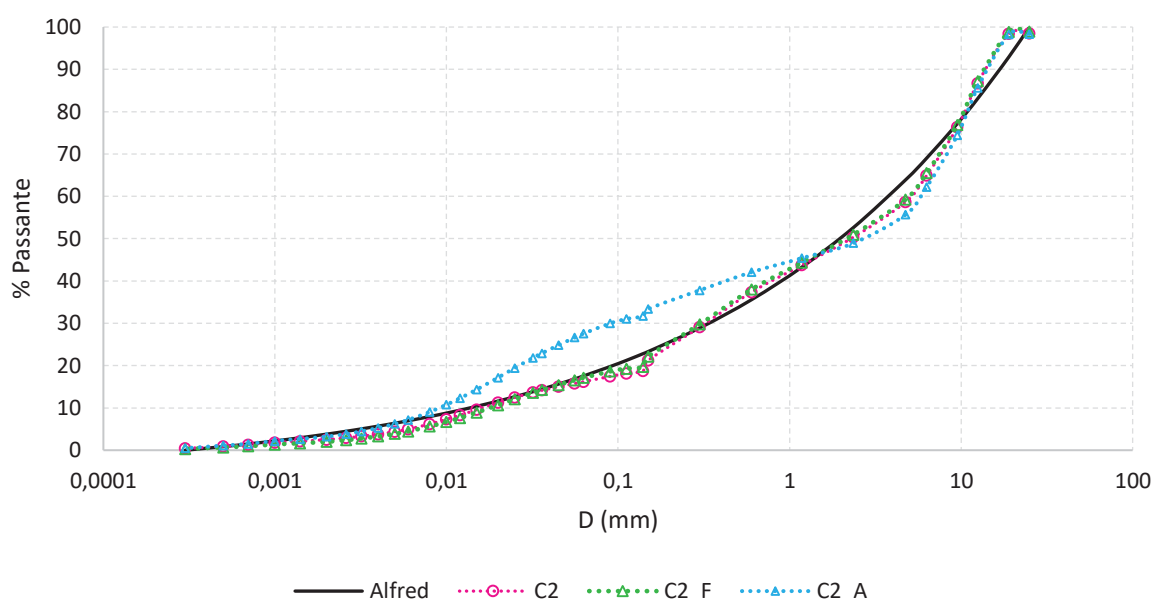
Já para o traço C1_A, o valor de RSS é mais distante dos outros dois traços justamente pela diferença da granulometria entre a cal e a areia, assim como pela quantidade de cal adicionada nesse traço. Essa diferença é evidenciada, na Figura 31, no intervalo granulométrico de 0,01 mm a 1 mm. É possível observar que a

distribuição granulométrica do traço C1_A é deslocada para a esquerda do gráfico, acusando maior quantidade de finos na mistura.

Em relação ao Grupo 2, não é possível obter valor de RSS para a comparação entre as curvas dos traços e do modelo. Conforme explicado no Capítulo 3, não foi possível determinar a granulometria da sílica ativa, impossibilitando gerar as curvas de distribuição granulométricas completas dos traços.

Com o intuito de avaliar qualitativamente o empacotamento optou-se por plotar as curvas de distribuição granulométrica dos traços do Grupo 2 de todos os materiais, com exceção da sílica ativa (Figura 32). Mesmo havendo a curva, é inviável obter um valor de RSS para os traços desse grupo que seja representativo.

Figura 32 - Distribuição granulométrica parcial Grupo 2



FONTE: A autora

Devido à ausência da sílica ativa, um dos materiais que compõe os finos, na composição da curva granulométrica dos traços do Grupo 2 a análise qualitativa da distribuição granulométrica terá foco no esqueleto granular.

Em relação à distribuição granulométrica da sílica ativa, os autores Sohail *et al.* (2018) realizaram em seu trabalho uma análise da literatura e observaram que a faixa granulométrica da sílica se encontra tipicamente no intervalo 0,1 μm a 1 μm . Resultado similar foi observado por Adorno *et al.* (2020), que para a sílica ativa por eles utilizada, o intervalo granulométrico foi de 0,01 μm a 0,3 μm . Em contrapartida,

os autores Hoppe Filho et. al. (2015) e Queiroz (2018) encontraram valores máximos de diâmetro de partícula de 50 μm e 100 μm , respectivamente.

Conforme descrito na seção 3.1.1, a sílica ativa utilizada nessa pesquisa estava densificada, apresentando aglomerados de grãos de maior diâmetro, não sendo possível comprovar o estado destes na matriz do concreto, após fabricação. A partir do exposto, optou-se por analisar a Figura 32 a partir do valor de diâmetro de 0,1 mm (100 μm), já que este foi o maior valor encontrado para o material na literatura. Logo, as curvas granulométricas dos traços, analisadas a partir de 100 μm , seguramente irão indicar as alterações no esqueleto granular das composições.

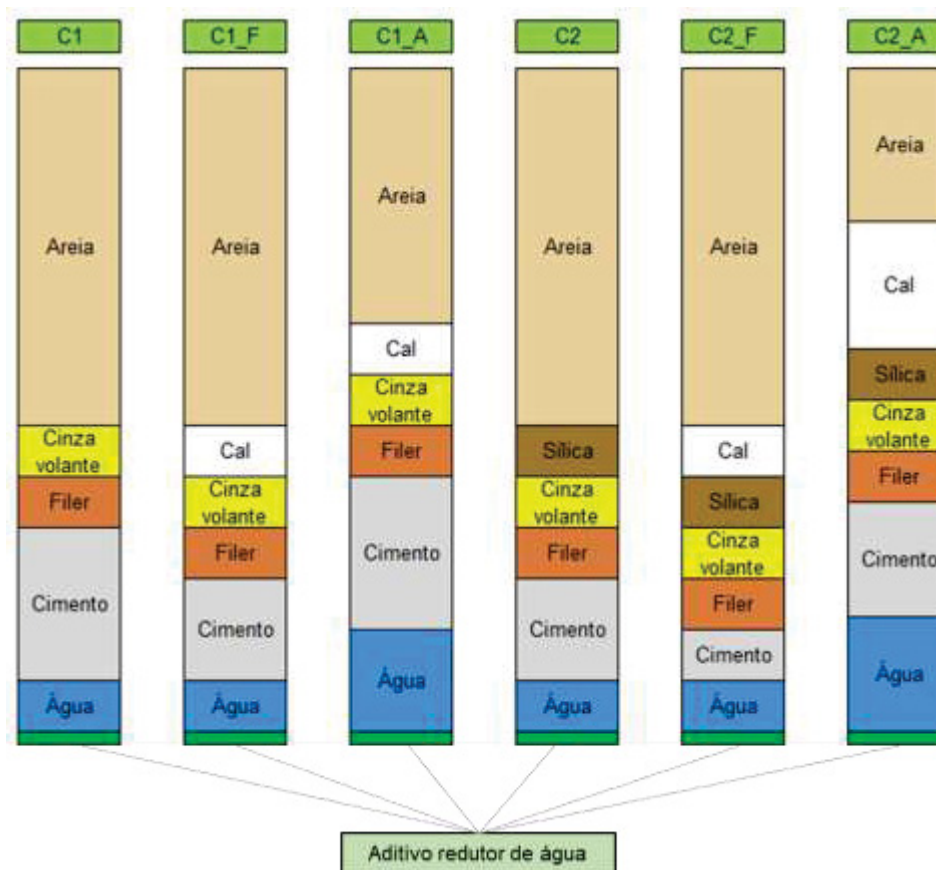
Ao analisar as curvas dos traços C2 e C2_F em comparação à curva do Modelo de Alfred é possível observar que as curvas dos traços são próximas à curva ideal, demonstrando maior adequação a ela. Conforme explicado para os traços do Grupo 1, a alteração na distribuição granulométrica entre os traços de referência e os da Classe F, em que a cal é adicionada em substituição aos finos, é baixa. Ao comparar a Figura 31, da distribuição granulométrica dos traços do Grupo 1, com a Figura 32, nota-se que há similaridade entre as curvas dos traços C1, C1_F, C2 e C2_F.

Para esses traços (C1, C1_F, C2 e C2_F) é encontrado um desvio da curva do modelo logo após o diâmetro de 0,1 mm. Nesse ponto as curvas de distribuição estão à direita da curva ideal, demonstrando a presença de partículas maiores que o diâmetro previsto no modelo. Entre os diâmetros de 1 mm e 10 mm esse fenômeno é novamente percebido. Já ao final da curva, a partir do diâmetro de 10 mm, nota-se que, para esses traços, as partículas contidas no intervalo granulométrico apresentaram granulometria inferior à prevista no Modelo de Alfred.

A distribuição granulométrica do Traço C2_A é a que mais se distancia da curva proposta pelo Modelo de Alfred para o intervalo granulométrico avaliado. Para o traço C2_A também é possível observar similaridade com a curva do seu correspondente do Grupo 1, o C1_A. Para ambos, devido à redução do consumo de areia pela forma de adição da cal, há um maior distanciamento da curva ideal. Observa-se que entre o trecho de diâmetro de 0,1 mm a 1 mm a curva é deslocada para esquerda, o que demonstra que as partículas deste trecho apresentam diâmetro inferior ao ideal apontado pelo modelo, resultado direto da redução do volume de areia na composição.

Com o intuito de auxiliar a compreensão e visualização da composição dos traços dessa pesquisa, na Figura 33, é apresentada uma representação gráfica do consumo dos finos, água e areia. Não foram representados os agregados graúdos pois esses apresentam consumo constante para todos os traços.

Figura 33 - Representação visual traços de concreto



FONTE: A autora

4.2 ESTADO FRESCO

Os concretos foram avaliados quanto ao desempenho no estado fresco, como mostra a Tabela 15 e a Figura 34. A avaliação em relação ao índice de estabilidade visual é qualitativa e prescrita pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017), onde IEV 0 indica um concreto altamente estável, sem evidência de segregação ou exsudação. IEV 1 refere-se a um concreto estável, sem evidência de segregação e leve exsudação, enquanto IEV 2 apresenta um concreto instável), com a presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto. Por fim, IEV 3 indica um concreto altamente instável, que apresenta segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassas nas extremidades (aureola de argamassa > 10 mm).

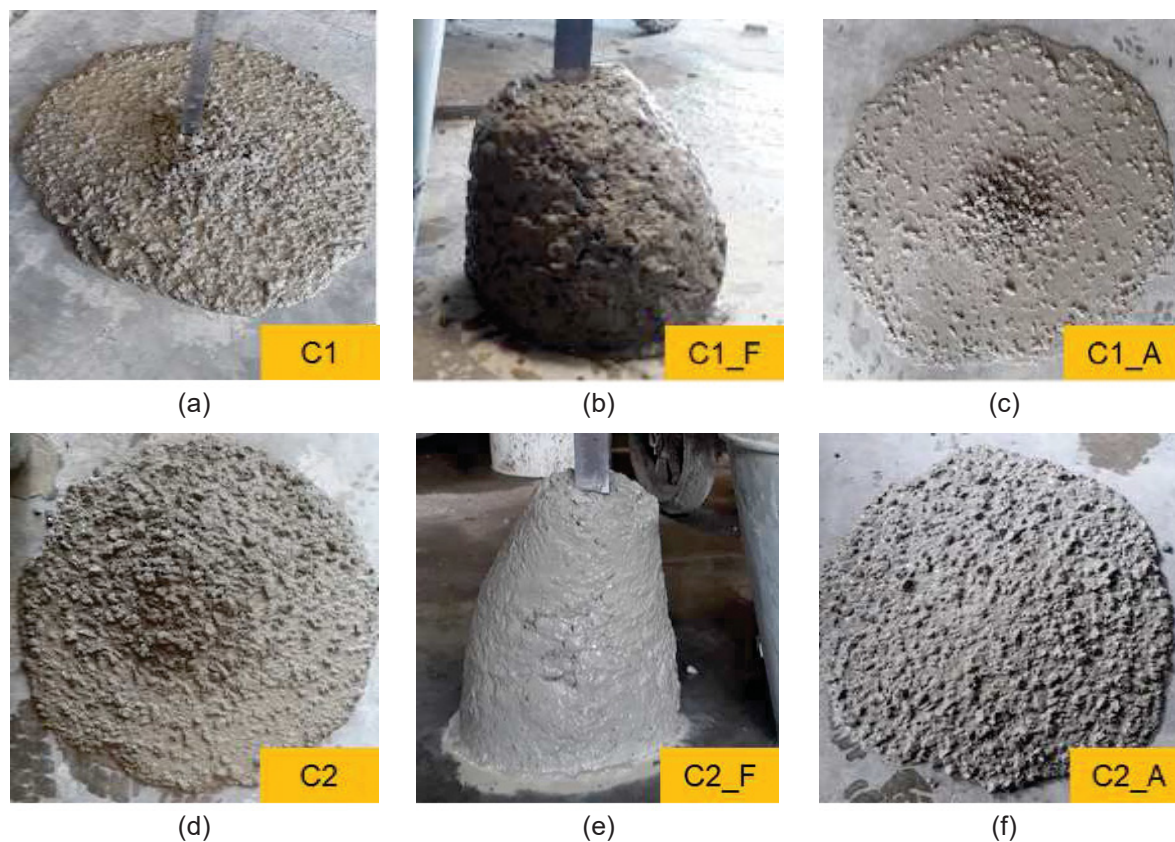
Tabela 15 - Caracterização dos concretos no estado fresco

Traços	Slump-flow (mm)	Slump test (mm)	T-500 (s)	Anel J (mm)	IEV*	Funil V (s)
Limite recomendado	500 – 850	-	-	0 - 50	-	Até 25
C1	530	250	24	75	IEV 2	Obstrução
C1_F	-	115	-	-	-	-
C1_A	690	-	18	50	IEV 3	37
C2	550	-	24	90	IEV 2	Obstrução
C2_F	-	70	-	-	-	-
C2_A	550	-	21	100	IEV 0	Obstrução

FONTE: A autora

LEGENDA: IEV – Índice de estabilidade visual (ABNT NBR 15823-1, 2017)

Figura 34 - Desempenho estado fresco: (a) C1, (b) C1_F, (c) C2_F, (d) C2, (e) C2_F, (f) C2_A



FONTE: A autora

Analisando os resultados mostrados na Tabela 15 e na Figura 34, observa-se que os concretos C1, C1_F e C2_F não apresentaram resultados de espalhamento que permitisse sua classificação como CAA, segundo limites indicados pela ABNT NBR 15823-1 (2017), ainda que o concreto C1 apresentou *slump-flow* igual a 530 mm, muito próximo do limite normativo de 550 mm. Já os concretos C1_F e C2_F apresentaram comportamento de CCV no estado fresco.

Devido à diferença na consistência dos concretos o processo de moldagem adotado para os traços que apresentaram comportamento similar a um CCV, o C1_F e C2_F, diferiu do processo de moldagem dos outros traços. Para os traços C1, C1_A, C2 e C2_A a moldagem consistiu em verter o concreto fresco nos moldes cúbicos a uma altura de aproximadamente 10 cm. Já para os traços C1_F e C2_F, para garantir uma moldagem satisfatória, os corpos de prova foram submetidos ao processo de adensamento mecânico em mesa vibratória por 15s.

É importante ressaltar que durante o teste de dosagem o traço C2_A apresentou espalhamento condizente com um CAA e índice de estabilidade visual

satisfatório. Já no processo de mistura do traço oficial seu desempenho foi inferior ao encontrado na mistura teste. Levanta-se a hipótese de que o volume de material tenha exercido influência na mistura, reduzindo sua fluidez. Apesar disso, optou-se por seguir com o mesmo valor de A/F partindo do pressuposto que os outros traços obteriam comportamento mais fluído pela redução do consumo de finos no traço.

O desempenho de ambos os concretos de referência de cada grupo, C1 e C2, em todos os ensaios é similar. No ensaio de espalhamento, os resultados foram iguais a 530 mm para o C1 e 550 mm para o C2, ambos com valor de T-500 igual a 24s, sendo classificados como IEV 2 (indícios de segregação devido a um acúmulo de agregado graúdo no centro, mas sem presença de auréola de argamassa) e tendo sofrido obstrução no ensaio do Funil V. A diferença nos resultados de Anel J também foi pequena, sendo 75 mm para C1 e 90 mm para C2, estando estes resultados fora do intervalo recomendado pela norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017), de 0 mm a 50 mm.

Devido ao resultado de *slump-flow* do C1 inferior ao recomendado pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017) optou-se por também avaliar o concreto pelo *slump test* (NBR NM 67 ABNT, 1996) que resultou em um abatimento do tronco de cone de 250 mm, bastante fluído. Segundo a classificação da NBR 8953 (ABNT, 2015), o C1 pertence à classe S220 e, portanto, pode ser aplicado em situações de elevada taxa de armaduras e peças esbeltas.

O comportamento semelhante observado para os concretos C1 e C2 deve-se à similaridade de suas composições. Conforme explicado no Capítulo 3, o traço C2 é derivado do traço C1. Apesar da redução do consumo de cimento de 283 kg/m³ para 255 kg/m³) o consumo de finos foi o mesmo para os dois traços, de 484 kg/m³. Outros parâmetros que são iguais para ambos que podem ser citados como explicação são o consumo de água (136 l/m³), relação A/AGL (0,36) e o volume de pasta (325 l/m³ para o C1 e de 327 l/m³ para o C2).

Os concretos em que a cal foi adicionada em substituição à areia, C1_A e C2_A, apresentaram resultado de espalhamento de 690 mm e de 550 mm, respectivamente. O traço C1_A foi o único capaz de fluir no Funil V, mesmo com o tempo do ensaio, de 37s, que ultrapassa o limite superior recomendado pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017), de 25s. Apesar do traço C1_A ter obtido valor de espalhamento superior e ter sido capaz de fluir pelo Funil V a classificação IEV para o traço foi correspondente ao IEV 3, enquanto para o C2_A a classificação foi IEV 0.

Mesmo com um consumo de finos semelhante para os traços da Classe A, de 637 kg/m^3 para C1_A e de 703 kg/m^3 para C2_A, e da relação A/F ser de 0,28 para ambos, o desempenho do traço C1_A, quando comparado ao C2_F é de redução da coesão e segregação.

É possível concluir que a redução do consumo de cal em aproximadamente 30% do C2_A para o C1_A em conjunto com a ausência de sílica influenciaram o comportamento de segregação do C1_A. Como foi observado no teste de efetividade do aditivo redutor de água nas adições (ver item 3.1.3), tanto a sílica quanto a cal demandaram maior quantidade de água que as outras adições para formarem uma pasta fluida (teor de 0,4 água/adição para as demais e de 0,7 água/adição para sílica e cal). Portanto, no traço C1_A, a quantidade de água disponível foi superior à do C2_A, levando ao quadro de segregação observado.

Um segundo fator que favorece o cenário de segregação para o traço C1_A é o teor de aditivo redutor de água. Apesar de ambos concretos da Classe A conterem teor de 5% em relação à massa de cimento, quando o teor de aditivo é calculado sob a massa de adições, o teor para o C1_A é de 2,22% enquanto para o C2_A é de 1,81%.

Os traços C1_F e C2_F apresentaram o aspecto menos fluido de todos, com resultados de abatimento de tronco de cone de 115 mm e 70 mm, respectivamente, realizado conforme procedimento da NBR NM 67 (ABNT, 1996). Segundo a classificação da NBR 8953 (ABNT, 2015) o C1_F pertence à classe S160 e, portanto, pode ser aplicado em elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto e o C2_F pertence à classe S50 e pode ser aplicado em alguns tipos de pavimento e elementos de fundações. A partir da inspeção visual dos concretos no estado fresco é possível observar que, apesar da expressiva redução de abatimento para os traços C1_F e C2_F, todos são bem argamassados e coesos.

Analisando os traços que apresentaram comportamento condizente com o CCV pode-se obter as seguintes conclusões. Os traços da Classe F, quando comparados ao traço C1, apresentaram redução de 54% no abatimento para o C1_F e de 72% para o C2_F. Esses traços, quando comparado aos traços da Classe A (C1_A e C2_A), apesar de apresentarem a mesma relação A/C (0,63 para o Grupo 1 e 0,77 para o Grupo 2) e água/aglomerante (cimento + adições pozolânicas) (0,46 para o Grupo 1 e 0,51 para o Grupo 2) dentro de cada grupo, o volume de pasta do C1_F é 25,5% inferior ao C1_A enquanto para o C2_F o consumo de pasta é 32,6%

inferior ao C2_A. A redução de pasta prejudica a fluidez do concreto (WONG E KWAN, 2008; KWAN et al.,2012).

Conforme discutido anteriormente, a cal, que apresenta elevada superfície específica e demanda de água para molhagem dos grãos, adicionada em substituição aos finos aumenta a superfície específica a ser molhada sem contribui para o aumento do teor de pasta dessas misturas. Esse cenário é agravado para o C2_F devido ao maior consumo de cal no traço, de 147 kg/m³ enquanto para o traço C1_F o consumo é de 114 kg/m³.

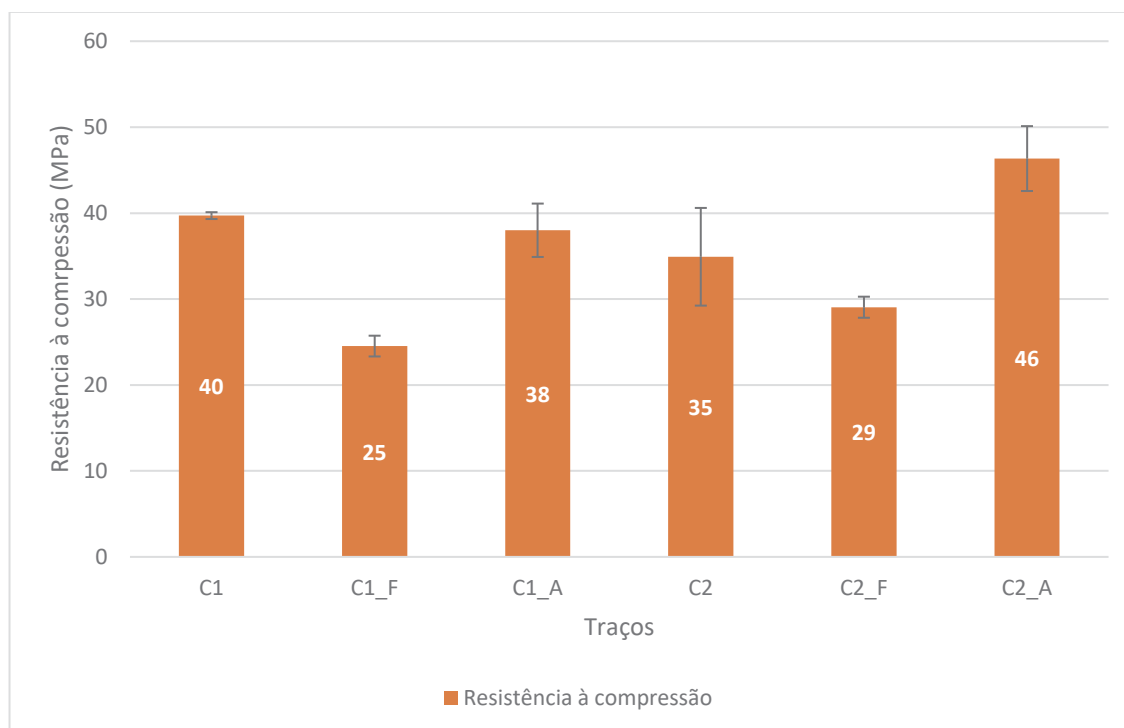
Durante a produção do traço C2_F, devido sua baixa trabalhabilidade, optou-se por adicionar 1%, sob a massa de cimento, de aditivo redutor de água (além do valor inicialmente usado de 5%), totalizando 6%. Quando analisado o teor do aditivo em relação à massa de cimento, o traço C2_F apresenta o maior consumo. Porém, ao analisar em relação aos finos, o teor de aditivo para o traço é de 1,82%, superior apenas ao teor do C2_A (1,81%). Mesmo com aumento do consumo do redutor de água, ainda não foi possível obter uma maior fluidez para o traço C2_F.

4.3 ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado na idade de 91 dias, em quatro corpos de prova por traço. É apresentado na Figura 35 o resultado de média dos valores tratados estatisticamente e no Apêndice 6 são apresentados os resultados individuais de cada corpo de prova.

Figura 35 - Resistência à compressão 91 dias



FONTE: A autora

Aos 91 dias, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), os corpos de prova de todos os traços apresentaram resistência estrutural (> 20 MPa). Os concretos dessa pesquisa apresentam também resistência suficiente (>25 MPa) para serem utilizados em ambiente de classe de agressividade II, como mostra a figura 35 (gráfico res. Comp.).

A análise de variância ANOVA, com confiabilidade de 95%, associada ao Teste de Tukey (Apêndice 7) dos resultados de compressão demonstrou que não há diferença estatística entre os concretos correspondentes dos dois grupos para os de referência (C1 x C2) e da Classe F (C1_F x C2_F). Nestes casos, a reação pozolânica da sílica ativa (presente nos concretos do Grupo 2) compensou a redução do consumo de cimento do Grupo 2 (comparado aos traços do Grupo 1) no desempenho mecânico. Comportamento semelhante a este foi também observado por Ghoddousi *et. al.* (2014), onde a adição de sílica ativa não apenas foi responsável por manter a resistência mecânica, mas o traço com sílica ativa (32 kg/m^3) e com consumo de cimento inferior (368 kg/m^3 para o traço com sílica e 400 kg/m^3 para outros traços da pesquisa) foi responsável por aumentar a resistência à compressão do concreto. Para os concretos de referência (C1 e C2), um segundo fator colabora para a igualdade do

resultado, a relação água/aglomerante (cimento + adições pozolânicas). Este parâmetro foi mantido constante para ambos traços, no valor de 0,35.

Já os concretos pertencentes à Classe A, C1_A e C2_A apresentaram diferença estatística entre si. A resistência à compressão do traço C1_A foi inferior à do C2_A. Esse resultado não era esperado considerando que o consumo de cimento é maior para o C1_A (283 kg/m³, enquanto para o C2_A é de 255 kg/m³) e a relação água/aglomerante (cimento + adições pozolânicas) é menor (0,46 para o C1_A e 0,51 para o C2_A). Cita-se novamente o trabalho de Ghoddousi *et. al.* (2014), descrito no parágrafo anterior, onde situação semelhante foi também reportada.

Levanta-se ainda a hipótese de que o consumo de cal no traço C2_A (219 kg/m³), que é superior à do traço C1_A (153 kg/m³), reduziu a disponibilidade de água para as reações de hidratação e pozolânicas no traço C2_A. Essa hipótese se baseia na elevada superfície específica da cal que demanda maior quantidade de água para envolver os grãos (HUNGER; BROUWERS, 2009). Com a possível redução da água disponível no traço C2_A, tanto a relação a/c quanto a água/aglomerante (cimento + adições pozolânicas) para esse traço podem ter sido inferiores às calculadas, favorecendo o desempenho mecânico.

Dentre os concretos dosados com a presença de cal na composição, as amostras da Classe A, C1_A e C2_A, apresentaram as maiores resistências à compressão. Esses são também os traços que possuem maior volume de pasta, 431 l/m³ e 479 l/m³, respectivamente. Os outros traços possuem consumo entre 321 l/m³ e 327 l/m³, o que colabora mecanicamente, considerando que a resistência do concreto é fornecida principalmente pela pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Um segundo fator que colabora para maior resistência dos concretos da Classe A é a redução da zona de transição (ZT) com o agregado miúdo (GARBOCZI; BENTZ, 1996) devido à redução do consumo de areia para a Classe A, 468 kg/m³ para o C1_A e de 348 kg/m³ para o C2_A, enquanto os outros traços apresentam consumo de areia de 734 kg/m³. Como a ZT é uma região fraca, a redução do consumo de areia reduz, conseqüentemente, a extensão da ZT, gerando um concreto mais resistente.

Quando comparado ao concreto de referência de cada grupo, os traços da Classe A apresentam o mesmo consumo de cimento, de 283 kg/m³ para C1 e C1_A e de 255 kg/m³ para C2 e C2_A. Já a relação a/c é maior para Classe A, no valor de 0,63 para o C1_A e de 0,77 para o C2_A. A partir do exposto é possível inferir que a

redução da extensão da ZT aliada ao maior volume de pasta para os traços da Classe A compensaram a elevação do consumo de água.

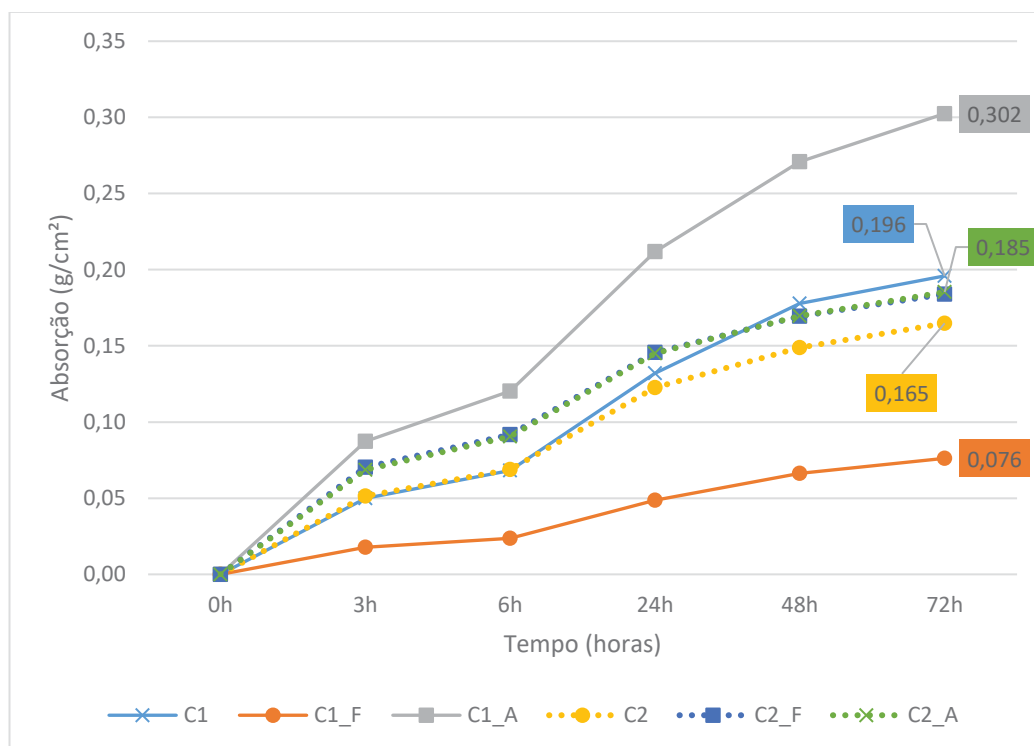
Analisando a relação entre o traço C1 e o traço C1_F, observa-se redução da resistência. Essa observação está ligada à redução do consumo de cimento e aumento da relação a/c. Para os traços C1 e C1_F o consumo de cimento foi de 283 kg/m³ para 211 kg/m³, respectivamente, enquanto a relação a/c subiu de 0,48 para 0,63. Tanto a redução do consumo de cimento quanto o aumento do teor de água prejudicam a resistência mecânica dos concretos (METHA; MONTIRO, 2014).

A análise pelo Teste de Tukey (Apêndice 7) para os concretos C2 e C2_F demonstrou que ambos resultados são estatisticamente iguais, mesmo com redução do consumo de cimento (de 255 kg/m³ para 172 kg/m³), aumento da relação a/c (de 0,53 para 0,77) e da relação água/aglomerante (cimento + adições pozolânicas) (de 0,35 para 0,51). Esse resultado não era esperado. Observa-se que o desvio padrão do traço C2 é o maior dentre os concretos estudados, o que pode ter dificultado as análises envolvendo esse concreto.

4.3.2 Absorção

Os ensaios de absorção realizados foram os de capilaridade (Tabela 16 e Figura 36) e imersão (Figura 37). Ambos ensaios realizados os 91 dias de idade dos concretos. Os resultados desses testes são discutidos a seguir.

Figura 36 - Evolução da absorção por capilaridade ao longo do tempo



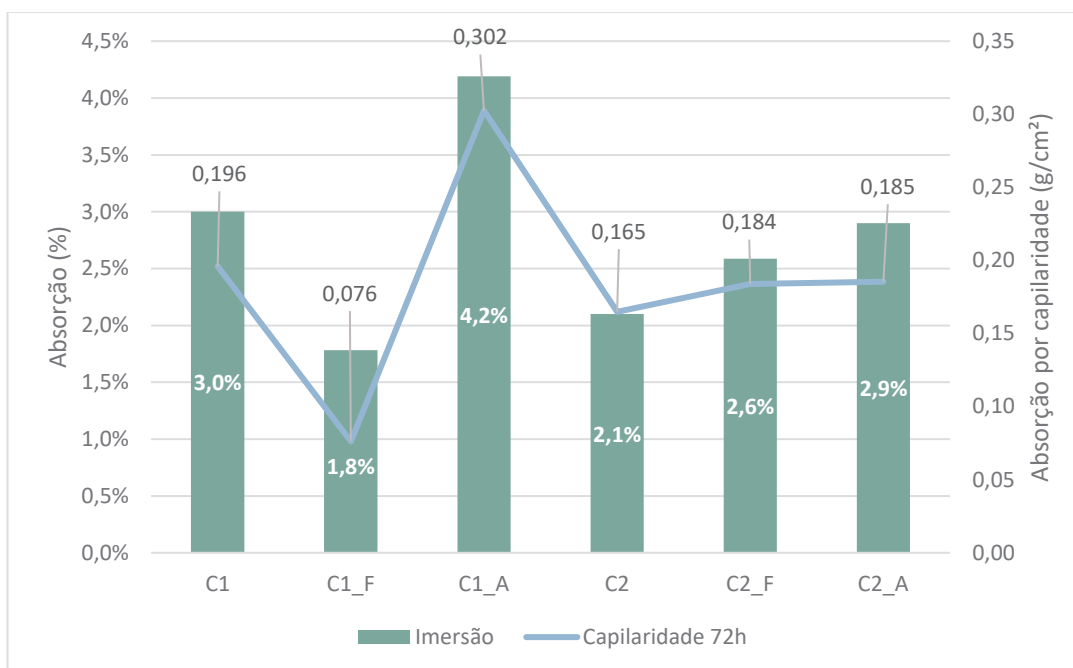
FONTE: A autora

Tabela 16 - Absorção por capilaridade 72h após tratamento estatístico

Tempo	Absorção (g/cm ³)					
	C1	C1_F	C1_A	C2	C2_F	C2_A
3h	0,050	0,018	0,087	0,051	0,070	0,069
6h	0,068	0,024	0,120	0,069	0,092	0,090
24h	0,132	0,049	0,212	0,123	0,146	0,145
48h	0,178	0,066	0,271	0,149	0,169	0,170
72h	0,196	0,076	0,302	0,165	0,184	0,185

FONTE: A autora

Figura 37 - Absorção: imersão x capilaridade



FONTE: A autora

A absorção por capilaridade para todos os traços aumentou ao longo do tempo. Desde o início do ensaio até a medição de 6h todos os traços apresentaram comportamento similar de perfil de absorção. No trecho entre o início do ensaio e a primeira medição (3h) é possível observar uma maior inclinação da reta, indicando uma maior absorção para o período. Já entre a medição de 3h e 6h é possível observar uma menor inclinação da reta correspondente ao trecho, indicando uma estabilização da absorção para todos os traços no período. A partir da medição de 6h o comportamento é revertido e, para todos os traços, as retas entre cada medição passam a demonstrar comportamento ascendente mais expressivo quando comparado ao intervalo de 3h a 6h de ensaio.

A análise estatística de variância ANOVA, com confiabilidade de 95%, do ensaio de capilaridade (Apêndice 7) demonstrou que os resultados do Grupo 1 são diferentes entre si. Já para o Grupo 2 os resultados são estatisticamente equivalentes entre si. A igualdade fica evidente ao analisar as curvas dos traços C2_F e C2_A, apresentadas na Tabela 16. Para esses traços, após tratamento estatístico, a absorção por capilaridade foi numericamente próxima, resultando em curvas de absorção sobrepostas na Figura 36. Os dados coletados em laboratório para cada um dos traços são apresentados no Apêndice 6.

O ensaio de absorção por imersão foi realizado em três corpos de prova para cada traço. Os resultados apresentados são a média dos resultados individuais dos corpos de prova após tratamento estatístico (Figura 36). A mesma tendência de absorção pode ser encontrada nos resultados do ensaio de imersão e de capilaridade. A análise estatística de variância ANOVA, com confiabilidade de 95%, do ensaio de imersão (Apêndice 7) demonstrou que há diferença entre os concretos do Grupo 1 e que no Grupo 2 o C2_F e o C2_A são equivalente, mas segundo Teste de Tukey, o C2 difere de ambos.

A partir dos resultados expostos é possível concluir que a adição de sílica, característica ao Grupo 2, proporcionou uma uniformidade nos resultados de absorção, mascarando os efeitos dos outros parâmetros. Apesar da dificuldade de discernir os efeitos de cada variável na absorção para o Grupo 2 levanta-se a seguinte hipótese: devido à consistência obtida para o C2_F houve maior dificuldade para moldagem, o que pode ter gerado um aumento da porosidade para os CPs desse traço. Ressalta-se que não foi possível realizar ensaio direto para avaliação da porosidade devido à indisponibilidade de recursos, equipamentos e técnicos no período da pandemia por COVID-19.

Ao analisar o traço de referência do Grupo 1 em comparação com o traço C1_F, em que a cal é adicionada em substituição aos finos, observa-se uma redução da absorção por capilaridade e por imersão. Esse resultado não era esperado. O consumo de cimento foi inferior para o C1_F (de 211 kg/m³ e de 283 kg/m³ para o C1), o consumo de aglomerantes (cimento + adições pozolânicas) também foi inferior (de 290 kg/m³ para o C1_F e de 389 kg/m³ para o C1), a relação A/C foi superior para o C1_F (de 0,63 e de 0,48 para o C1) e a densidade de empacotamento foi similar para os dois traços (RSS de 0,0155 para o C1_F e de 0,0154 para o C1).

É importante ressaltar que o RSS refere-se à adequação da curva dos traços à curva ideal do Modelo de Alfred, sendo que, quanto menor o valor do RSS para um traço, mais próxima está sua curva de distribuição granulométrica se encontra da ideal e conseqüentemente mais densa é a matriz do concreto.

Rebmann (2011) encontra situação similar em seu trabalho. Os concretos com baixo teor de cimento (comparado aos traços de referência) apresentaram absorção capilar inferior. A hipótese levantada é a de que devido ao empacotamento do esqueleto granular a estrutura dos poros foi afetada, aumentando a sinuosidade do caminho a ser percorrido pela água.

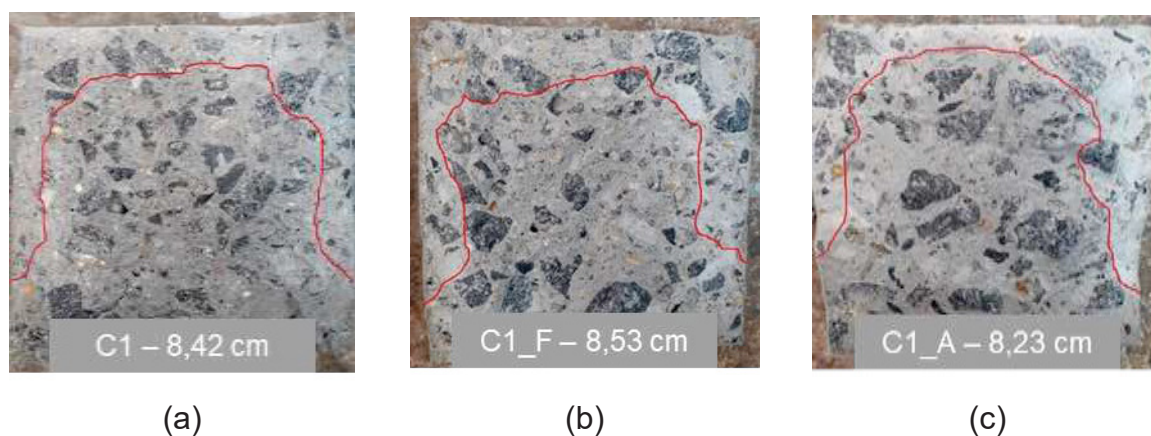
A comparação entre o traço C1 e o traço C1_A, em que a cal é adicionada em substituição à areia, demonstra uma maior absorção para o C1_A nos ensaios de capilaridade e imersão. A menor densidade de empacotamento do C1_A (RSS de 0,0751) quando comparado com o C1 (RSS de 0,0154) corrobora com esse resultado observado.

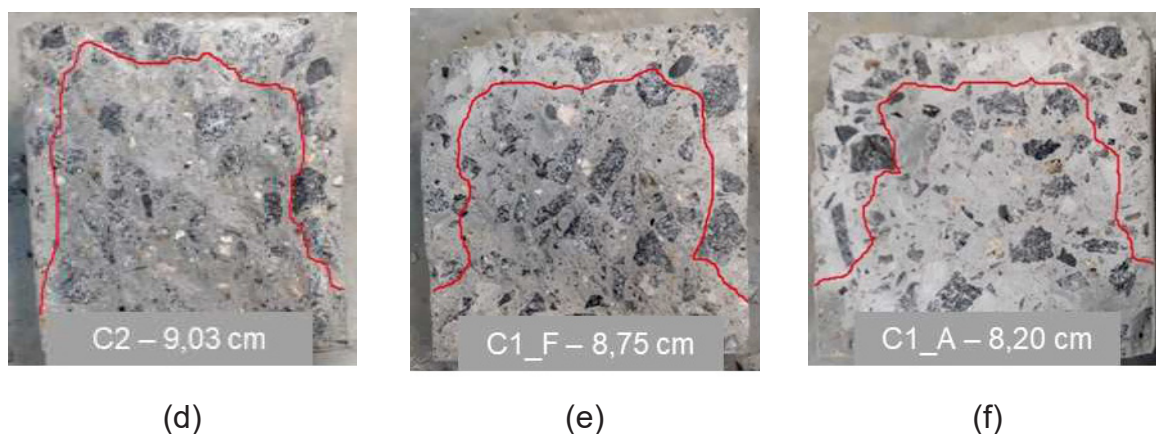
Apesar do respaldo físico da densidade de empacotamento para o resultado de absorção do C1 e C1_A, alguns parâmetros relacionados aos dois traços são contrários ao resultado observado. O consumo de cimento para ambos traços é igual, o consumo de finos é superior para o C1_A (637 kg/m³ e de 484 kg/m³ para o C1) com consequente aumento do consumo de pasta para o traço (431 l/m³ para o C1_A e de 325 l/m³ para o C1).

Para explicar o fenômeno levanta-se a hipótese de que a lixiviação que ocorreu durante o processo de cura submersa aumentou a porosidade do C1_A, deixando-o mais suscetível à absorção. É importante discutir que a hipótese do aumento da porosidade devido à lixiviação tem maior gravidade para o traço C1_A devido ao maior consumo de cal para esse traço quando comparado com o C1_F (153 kg/m³ para o C1_A e 114 kg/m³ para o C1_F). Essa hipótese pode ser expandida para o traço C2_A, que possui o maior consumo de cal dessa pesquisa (219 kg/m³).

O ensaio de capilaridade fornece também o dado de altura de ascensão capilar. A análise estatística de variância ANOVA, com confiabilidade de 95%, do ensaio demonstrou que os resultados são estatisticamente equivalentes. A ascensão capilar de cada traço é apresentada na Figura 38.

Figura 38 - Ascensão capilar 72h: (a) C1; (b) C1_F; (c) C1_A; (d) C2; (e) C2_F; (f) C2_A





FONTE: A autora

4.4 CARBONATAÇÃO

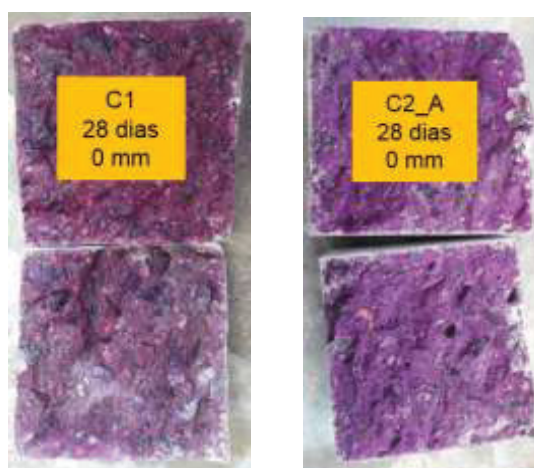
O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado nas idades de 28, 60 e 100 dias. Os resultados encontrados em cada idade são apresentados a seguir.

4.4.1 Avaliação exposição: 28 dias

A análise do avanço da frente de carbonatação teve início aos 28 dias de exposição. Devido à dosagem por empacotamento de partículas e uso de cal na dosagem das amostras não era esperado observar um avanço significativo da frente de carbonatação após 28 dias de exposição. Considerando essa expectativa, optou-se por avaliar um número reduzido de amostras.

Na ocasião foram avaliados dois CP's, um do C2_A e um do C1. A amostra do traço C2_A foi escolhida devido ao seu baixo consumo de cimento, presença de sílica e elevado teor de cal (Grupo 2). O C1 foi escolhido devido à distinção de sua composição (Grupo 1) quando comparado ao C2_A (teor de cimento mais elevado, sem a presença de cal ou sílica). Após a aspersão de fenolftaleína as duas amostras não apresentaram avanço significativo da frente de carbonatação (Figura 39).

Figura 39 - Frente de carbonatação aos 28 dias de exposição: (a) C1 e (b) C2_A



(a)

(b)

FONTE: A autora

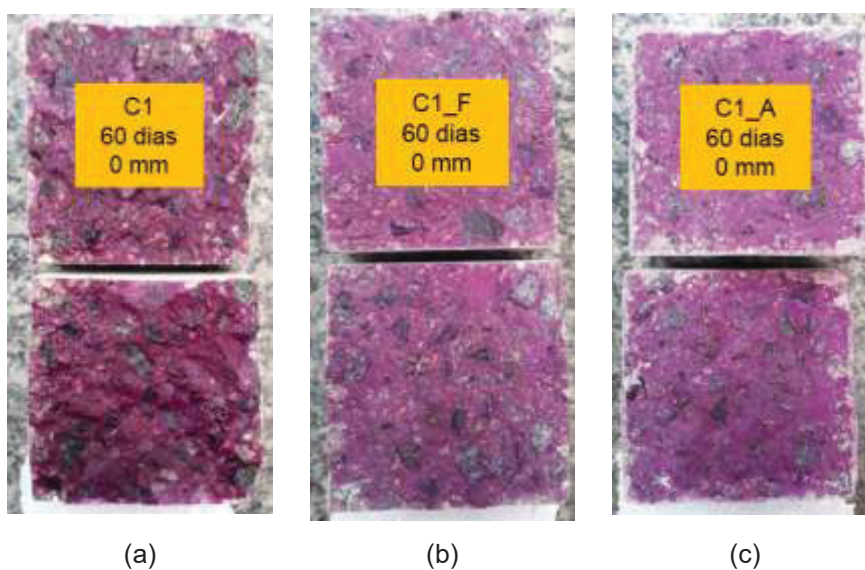
É possível observar na Figura 39 que em todas as faces, em ambas amostras, a frente de carbonatação observada foi insignificante. A partir do resultado obtido aos 28 dias de exposição optou-se por repetir a análise aos 60 dias.

4.4.2 Avaliação exposição: 60 dias

Aos 60 dias de exposição foi realizada uma nova análise da frente de carbonatação. Assim como na análise aos 28 dias, o avanço da frente de carbonatação não foi significativa.

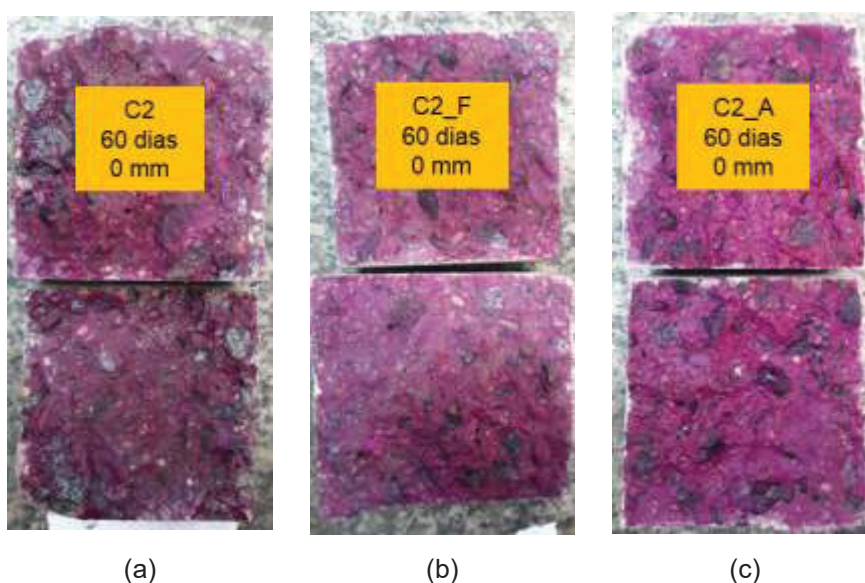
A fim de descartar a possibilidade de que algum dos traços apresentasse frente de carbonatação significativa optou-se por verificar o avanço da deterioração em uma amostra de cada um dos seis traços. Tanto nos traços do Grupo 1 (Figura 40), quanto nos traços do Grupo 2 (Figura 41), não foi observado avanço da frente de carbonatação de forma significativa.

Figura 40 - Frente de carbonatação 60 dias traços Grupo 1 (sem cal): (a) C1, (b) C1_F, (c) C1_A



FONTE: A autora

Figura 41 - Frente de carbonatação 60 dias traços Grupo 2 (com cal): (a) C2, (b) C2_F, (c) C2_A

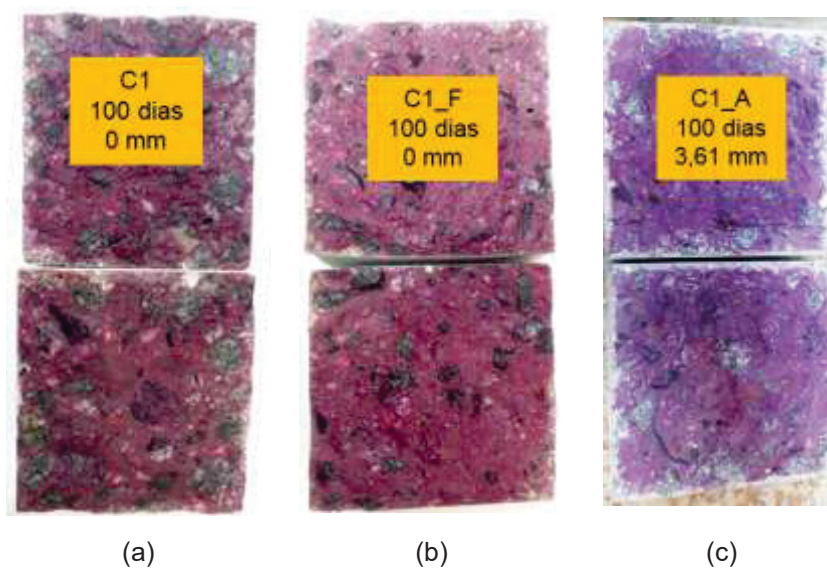


FONTE: A autora

4.4.3 Avaliação exposição: 100 dias

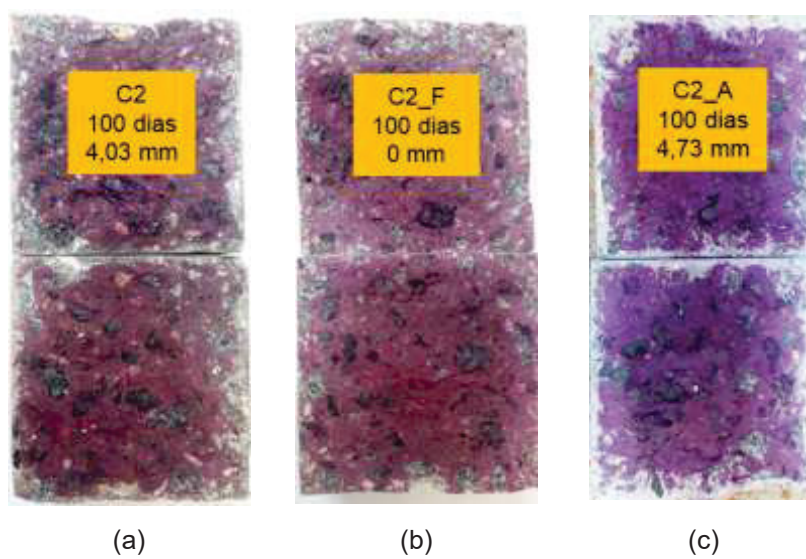
Aos 100 dias de exposição foi realizada uma terceira análise da frente de carbonatação. Diferentemente dos resultados anteriores, foi possível observar avanço de frente de carbonatação nos traços C1_A, C2 e C2_A (Figura 42 e 43). Os valores de profundidade da degradação apresentados foram estatisticamente tratados, sendo apresentados na Figura 44. Os dados brutos são apresentados no Apêndice 6.

Figura 42 - Frente de carbonatação 100 dias traços Grupo 1 (sem cal): (a) C1, (b) C1_F, (c) C1_A



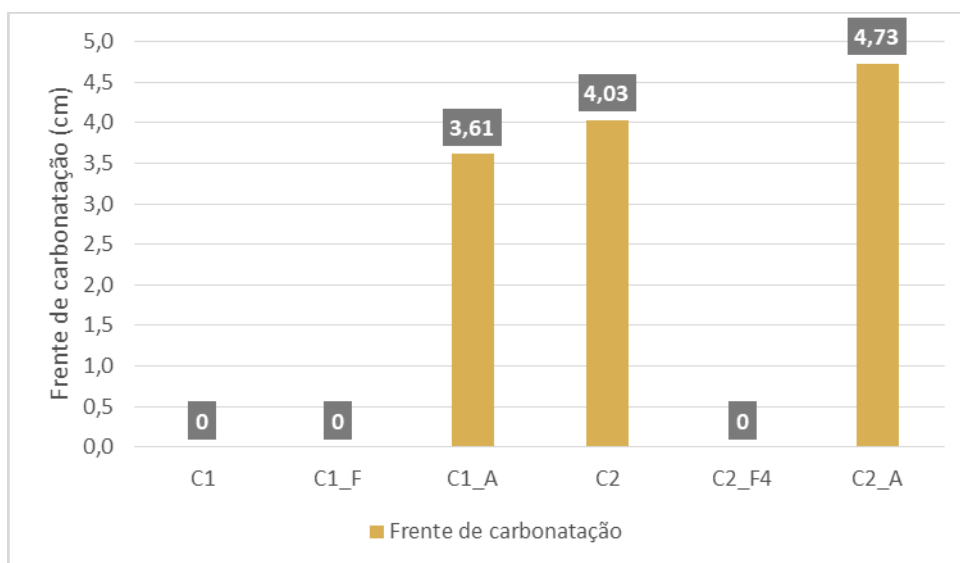
FONTE: A autora

Figura 43 - Frente de carbonatação 100 dias traços Grupo 2 (com cal): (a) C2, (b) C2_F, (c) C2_A



FONTE: A autora

Figura 44 - Avanço frente carbonatação para avaliação de 100 dias de exposição



FONTE: A autora

A análise pelo Teste de Tukey, com 95% de confiabilidade, demonstrou que o avanço da frente de carbonatação observada nos traços C1_A, C2 e C2_A possui diferença estatística.

Para os concretos de referência, o traço C1 não apresentou deterioração enquanto o C2 apresentou frente de carbonatação no valor de 4,03 mm. Esse resultado pode ser explicado pela presença de sílica na composição do Grupo 2. Conforme apontado por Medeiros, Raisdorfer e Hoppe Filho (2017), a utilização da sílica no teor de 10% em substituição ao cimento prejudica o desempenho frente à carbonatação. Apesar do traço C1 conter cinza volante, que também é uma adição pozolânica, a cinza volante foi adicionada como parte da composição dos finos e não em substituição ao cimento, gerando assim menor impacto no consumo de portlandita. Além disso, a atividade pozolânica para essa adição é de 636,12 mg Ca(OH)₂/g pelo ensaio de Chapelle, enquanto para a sílica é de 1016,81 mg Ca(OH)₂/g.

Levanta-se a hipótese sobre um segundo fator que contribuiu para o desempenho do traço C2, a redução da densidade de empacotamento. O traço de referência do Grupo 1 foi dosado pelo Modelo de Alfred, enquanto o traço C2 sofreu a alteração na sua distribuição granulométrica devido à substituição de 10% do cimento por sílica. Não foi possível comprovar essa hipótese devido à ausência da curva granulométrica da sílica.

O malefício da adição de sílica em substituição ao cimento no teor de 10% da massa de cimento explica também o aumento da frente de carbonatação dos

concretos da Classe A, C1_A e C2_A. O concreto C2_A, que contém sílica em sua composição apresentou frente de carbonatação 1,12 mm maior que o traço C1_A. Esse resultado representa um aumento de 31% na frente de carbonatação.

Analisando o Grupo 1, apenas o traço C1_A obteve avanço de frente de carbonatação. Apesar disso, sua frente foi a menor dentre os concretos que apresentaram deterioração, no valor de 3,61 mm. Observando pela ótica do empacotamento de partículas esse resultado pode ser justificado pela redução do empacotamento do traço C1_A. Essa justificativa é baseada nos valores de RSS encontrados para o Grupo 1. São eles: 0,0146 para o C1, 0,0155 para o C1_F e de 0,0751 para o C1_A. O valor de RSS para o traço C1_F, quando comparado ao traço de referência do Grupo, o C1, é, aproximadamente, 5 vezes maior.

Ao analisar o desempenho dos concretos que apresentaram frente de carbonatação no Grupo 2, C2 e C2_A, observa-se que a frente de carbonatação para o traço da Classe A foi superior ao de referência. Apesar do consumo de cimento e adições ser o mesmo para os dois traços (255 kg/m³ e 389 kg/m³, respectivamente), a relação a/c e água/aglomerante (cimento + adições pozolânicas) foi superior para o C2_A. Isso decorre da fixação da relação A/F (de 0,28 para todos os traços) em conjunto com a variação do consumo de finos (484 kg/m³ para o C2 e de 703 kg/m³ para o C2_A). Pauletti (2004) aponta ligação direta entre o aumento da relação A/C e da suscetibilidade à deterioração pela carbonatação. Apesar do elevado teor de cal neste traço, a influência da relação A/C foi mais expressiva.

Os concretos da Classe A apresentaram frente de carbonatação nos dois Grupos. Para o C1_A o avanço da frente de carbonatação foi no valor de 3,61 mm e para o C2_A, de 4,73 mm. O desempenho da Classe F para os dois grupos foi também o mesmo, não foi verificado avanço de frente de carbonatação para esses concretos. Quando comparados aos concretos da Classe A, que apresentaram deterioração, levanta-se uma hipótese para explicar a diferença do desempenho.

Conforme apresentado na Tabela 14, o consumo de cal é superior para os traços da Classe A (C1_F – 114 kg/m³, C1_A – 153 kg/m³, C2_F – 147 kg/m³ e C2_A – 219 kg/m³). Considerando que a cal é solúvel em água (CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2007) levanta-se a hipótese de que a cal foi lixiviada durante o período de cura submersa aumentando a porosidade dos concretos que continham cal.

Conforme descrito no Capítulo 3, os concretos foram mantidos em processo de cura submersa em água (sem saturação de cal) por 90 dias. Após o período de

cura foi observado que havia decantação de um material branco, em pó, no fundo do tanque de cura (Figura 45).

Figura 45 - Tanque de cura com sedimentação de cal



FONTE: A autora

Devido à falta de resultados de frente de carbonatação em idades superiores a 100 dias não foi possível calcular o coeficiente K_{CO_2} (MEDEIROS; RAISDORFER; HOPPE FILHO, 2017, RÉUS, 2022). Apesar dessa dificuldade, com a finalidade de comparação com dados da literatura, na Tabela 17 são apresentados alguns trabalhos com informações acerca da composição do concreto, parâmetros de ensaio e frente de carbonatação observada.

Tabela 17 - Revisão literatura frente de carbonatação

Referência	Idade do ensaio a ser comparada	Parâmetro dosagem		Parâmetros ensaio de carbonatação acelerada		
		Consumo Cimento (kg/m ³)	Adições	% CO ₂ câmara	T. máx. ensaio (dias)	AF (mm)
Teixeira et. al. (2019)	28 dias	175	CV	4.1 ± 0.1	36	16*
Thiery et. al. (2007)		230	-	50 ± 5	28	14*
Fonseca et. al. (2022)	60 dias	170	M, CCA, FC, CH	4 ± 0.5	70	8*
Zhang et. al. (2013)		220	E	20 ± 3	56	5
Rozière, Loukili e Cussigh (2009)		207	CV	50	56	9
Shi, Xu e Zhou (2009)		220	CV, E	20 ± 3	56	5*
Khunthongkeaw, Tangtermsirikul e Leelawat (2006)		192	CV	4	60	18,8

Antunes et. al. (2021)	100 dias	270	FC, CV	5	90	110
Soldado et. al. (2021)		200	CV	5	90	20*
Gruyaert, Heede e Belie (2013)		52	E	10	90	23*
Younsi et. al. (2013)		103	E	50 ± 5	123	26*
Younsi et. al. (2011)		190	CV	50 ± 5	120	27*

FONTE: A autora

LEGENDA: AF – Avanço da frente de carbonatação; FC – Filer calcário; CV – Cinza volante; M – Metacaulim; E – Escória de alto forno; AC – Argila calcinada; CCA – Cinza de casca de arroz; CH – Cal hidratada; * - Consumos obtidos por análise de gráficos (podem não ser exatos)

Na Tabela 17 os artigos selecionados são divididos em três categorias, os a serem comparados com o resultados de 28 dias de carbonatação e os para serem comparados com os resultados de 60 e 100 dias. Para seleção dos trabalhos priorizou-se os que apresentavam consumo de cimento de até 300 kg/m³ para comparar e analisar trabalhos com consumo de cimento próximo aos obtidos nessa dissertação. Para atingir esse objetivo, dentre as misturas apresentadas por cada autor, escolheu-se a de menor consumo de cimento.

Na Tabela 17 é possível observar que há uma expressiva variação na frente de carbonatação encontrada nos artigos analisados. Ressalta-se também que há variação significativa entre os parâmetros de ensaio da carbonatação acelerada. Ainda assim, conclui-se que todos os trabalhos analisados apresentaram frente de carbonatação superior à encontrada nessa dissertação

O resultado de frente de carbonatação para as idades de 28 e 60 dias foram de zero. Na avaliação de 100 dias as frentes de carbonatação obtidas variaram entre 3,61 mm e 4,73 mm. Esses valores são próximos aos encontrados pelos autores Zhang et. al. (2013) e Shi, Xu e Zhou (2009). Ambos encontraram avanço de frente de carbonatação no valor de 5 mm e consumo de cimento de 200 kg/m³ na avaliação do avanço da frente de carbonatação aos 56 e 60 dias, respectivamente.

Antunes et. al. (2021) produziu um concreto de mistura ternária (cimento, filer calcário e cinza volante) com consumo de cimento de 270 kg/m³ que foi submetido à carbonatação acelerada por 90 dias, obtendo frente de carbonatação no valor de 110 mm. O concreto citado desse estudo é similar ao Traço C1_A, que possui as mesmas

adições e consumo de cimento de 283 kg/m^3 e obteve frente de carbonatação de 3,61 mm.

Fonseca et. al. (2022) faz utilização de cal na composição de seus concretos. Optou-se por analisar o traço que apresentava maior consumo de adições pozolânicas, o menor de cimento e consumo de cal simultaneamente, visando similaridade com os concretos desenvolvidos nessa dissertação. O resultado obtido pelos autores para a frente de carbonatação foi de 8 mm na avaliação de 60 dias, próximo ao obtido para o traço C2_A, de 4,75, na avaliação de 100 dias. Fonseca et. al. (2022) apontaram que a adição de cal foi benéfica para a durabilidade do concreto em seu estudo.

Observando a tabela e os trabalhos comentados, levanta-se a hipótese de que a diferença da frente de carbonatação observada está associada principalmente ao empacotamento de partículas. Além da redução da porosidade fornecida pelo método de dosagem, levanta-se também a hipótese de que a utilização da cal foi também benéfica para a durabilidade frente à carbonatação dos concretos produzidos

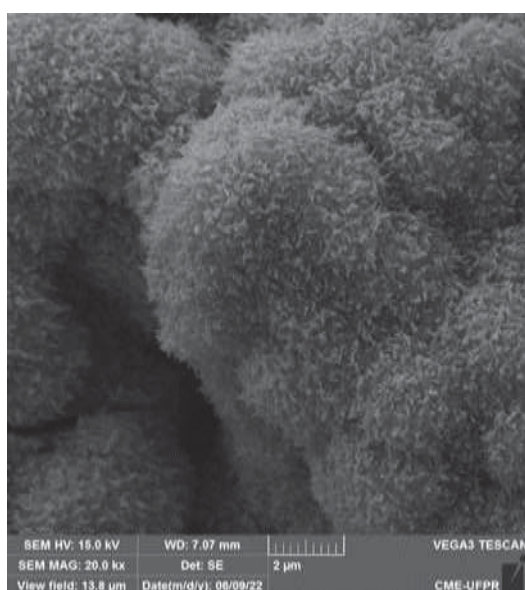
As hipóteses relacionadas à cal e ao empacotamento não puderam ser comprovadas devido à ausência de múltiplas idades de avaliação da frente de carbonatação nas quais fossem obtidos resultados diferentes de zero para todos os concretos. Apesar disso, é importante ressaltar que os traços que apresentaram o menor consumo de cimento, C1_F (211 kg/m^3) e C2_F (172 kg/m^3) não apresentaram frente de carbonatação em 100 dias de exposição à carbonatação acelerada.

O traço C1_F possui resultado de RSS próximo ao traço oriundo do Modelo de Alfred (0,0146 para o C1 e 0,0155 para o C1_f), sendo possível concluir que esse possui uma baixa porosidade. Já para o traço C2_F não foi possível obter valor de RSS. Apesar disso, realizando uma análise qualitativa, foi possível observar (Figura 32) que a curva desse traço é próxima à curva ideal do Modelo de Alfred para o intervalo de granulometria dos materiais utilizados nessa dissertação. Qualitativamente também é possível observar a similaridade do comportamento das curvas de ambos traços.

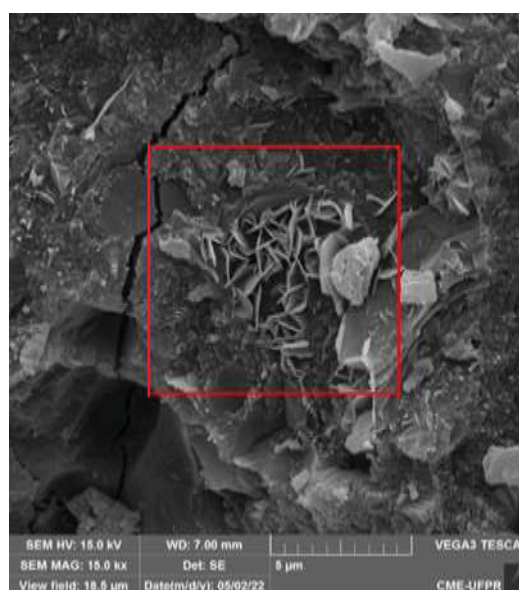
4.5 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

Após cura submersa por 90 dias e paralização da reação conforme descrito no item 3.5 os concretos foram analisados pelo ensaio de MEV. Todas as imagens foram obtidas na parte interna das amostras fraturadas. Os resultados são apresentados e discutidos na sequência.

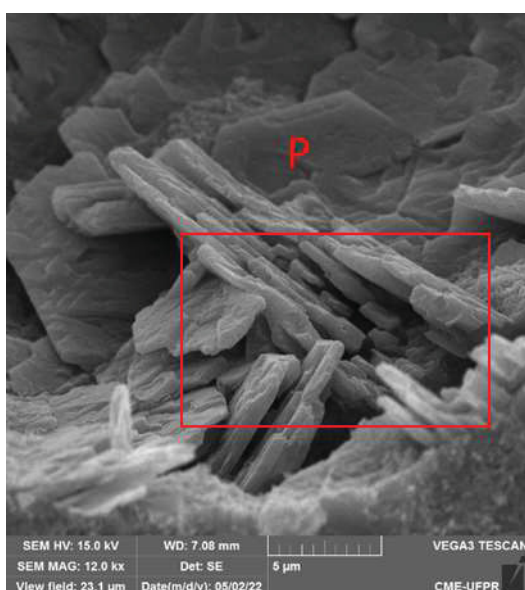
Figura 46 - Estruturas típicas resultantes da hidratação do cimento – (a) C-S-H (escala de 2 μ m); (b) brucita (escala de 5 μ m); (c) portlandita (escala de 5 μ m); (d) poro com C-S-H, etringita e portlandita (escala de 2 μ m)



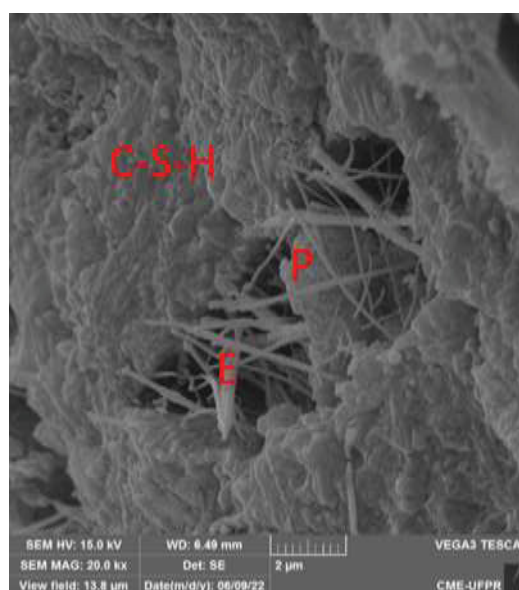
(a)



(b)



(c)



(d)

FONTE: A autora

Na Figura 46 (a) é possível observar uma cobertura contínua e uniforme depositada sob a superfície que é correspondente ao padrão do C-S-H. O silicato de cálcio hidratado é formado a partir da reação do C_2S ou C_3S com a água (HARRISSON, 2019). Méducin *et. al.* (2007) encontraram em seu trabalho estrutura semelhante. Conforme descrito pelos autores, a morfologia do C-S-H é caracterizada pela formação de numerosas agulhas desordenadas que podem ser normalmente observadas em uma escala entre 1 e 2 μm .

A cal utilizada, conforme exposto no item 3.1.1, possui hidróxido de magnésio em sua composição, no teor de 24,99% da composição total da cal. A morfologia da brucita é reconhecida pela sua forma similar ao hexágono agrupada em formato que lembra uma flor (MA *et. al.*, 2014). Na Figura 46 (b), na região demarcada, é possível observar a presença dessa estrutura, similar à encontrada por Ma *et.al.* (2014)

A portlandita é uma estrutura caracterizada por sua forma hexagonal e bem definida (estrutura cristalina), podendo ser encontrada em outros formatos como cristais maciços, placas, cristais grandes e finos alongados e massas em blocos a cristais finamente disseminados (SINGH, 2018) sendo essa morfologia afetada pela disponibilidade de espaço, geralmente apresentando 1 μm de diâmetro (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Na Figura 46 (c) é possível observar na região assinalada com a letra “P” um hexágono característico do hidróxido de cálcio. Os autores Trigo e Liborio (2014) apresentam em seu trabalho uma imagem da estrutura de um cristal de hidróxido de cálcio similar ao encontrado nessa pesquisa.

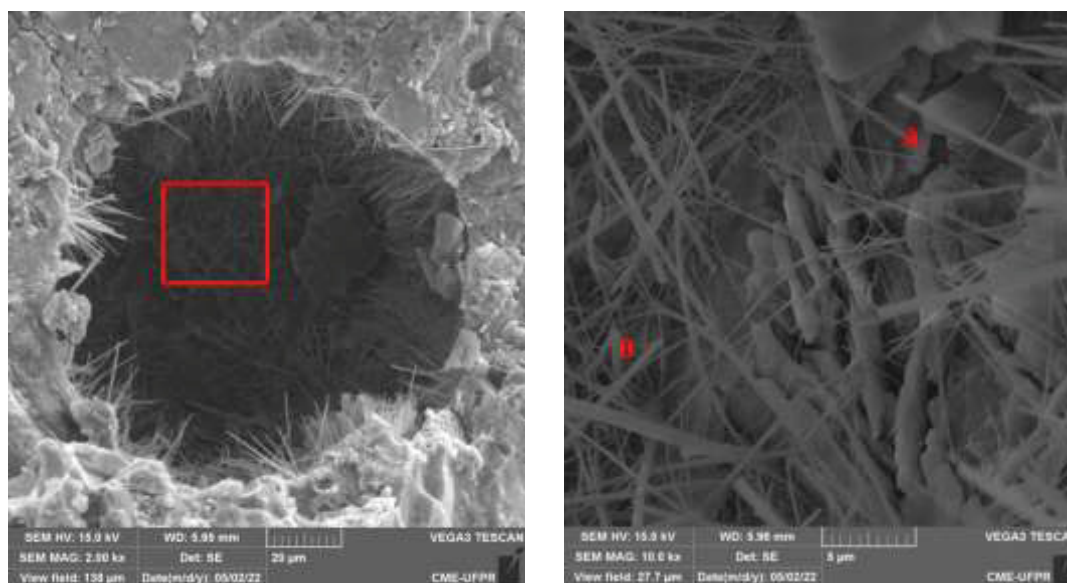
Para a imagem (d) da Figura 46 é possível notar um poro preenchido com algumas estruturas. Levanta-se a hipótese de que a estrutura assinalada com a letra “P” seja uma placa de portlandita enquanto a letra “E” esteja posicionada em agulhas de etringita.

A etringita é formada a partir da reação de hidratação do aluminato tricálcico (C_3A) e a gipsita (TAYLOR, 1997). Similar ao encontrado na imagem (d) da Figura 46, os autores Lourenci, Folgueras e Camargo (2004) também observaram a presença de etringita similar à encontrada nesse trabalho.

Foi possível observar a presença de estruturas condizentes com portlandita (ponto assinalado com letra “A” na Figura 47 b) e etringita (ponto assinalado com letra “B” na Figura 47 b) em um poro do traço C1_A (Figura 47), que possui consumo de cimento de 283 kg/m^3 . Já em um poro do traço C2_F, que apresenta consumo de

cimento de 173 kg/m^3 não é possível observar estruturas em forma de agulha (Figura 48).

Figura 47 - MEV poro traço C1_A: (a) poro (escala de $20\mu\text{m}$) e (b) aproximação (escala de $5\mu\text{m}$) poro no local demarcado em (a)

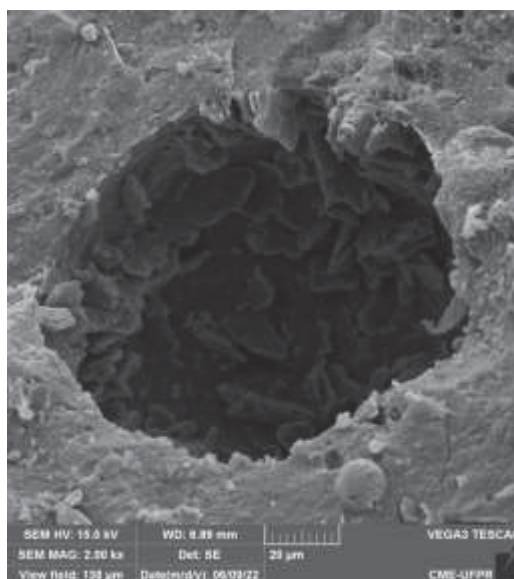


(a)

(b)

FONTE: A autora

Figura 48 - MEV poro traço C2_F (escala de $20\mu\text{m}$)

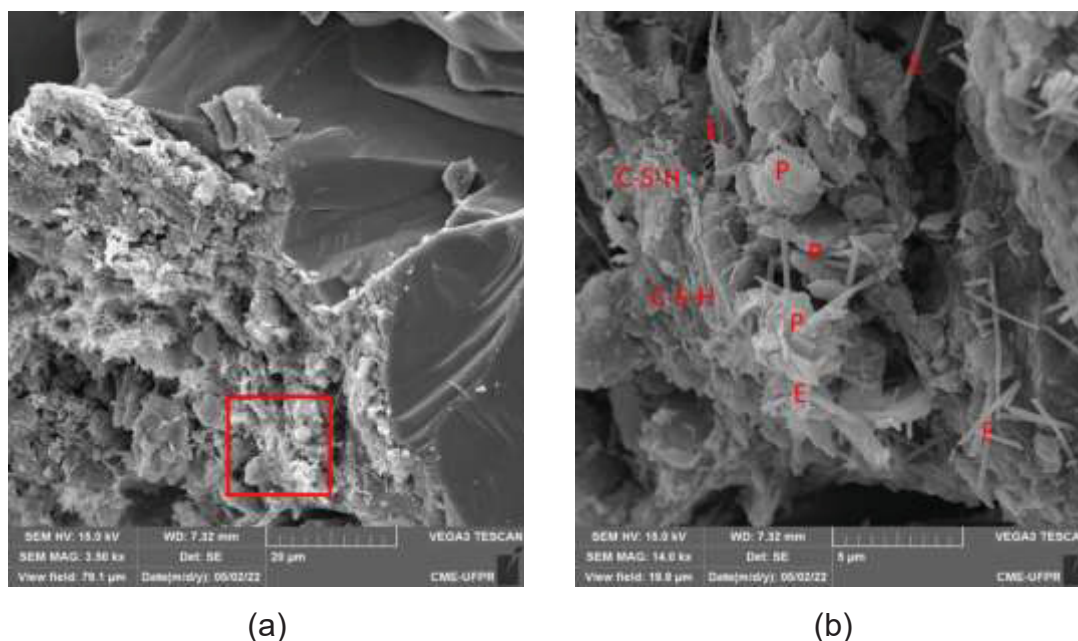


FONTE: A autora

Além de poros, estruturas tradicionais decorrentes das reações de hidratação do cimento são encontradas na zona de transição (ZT), conforme encontrado pelos

autores Trigo e Liborio (2014). Para o traço C2 foi obtida imagem da zona de transição conforme apresentado na Figura 49.

Figura 49 - MEV zona de transição traço C2: (a) ZT (escala de 20 μ m) e (b) aproximação área (escala de 5 μ m) demarcada em (a)



FONTE: A autora

É possível assumir que a imagem de MEV apresentada na Figura 49 seja correspondente à zona de transição devido ao perfil pouco rugoso do canto superior direito. Levanta-se a hipótese de trata-se de um agregado. Os autores Evangelista *et. al.* (2013) encontram imagem similar em seu trabalho.

Ao observar a aproximação da parte demarcada na Figura 49 é possível observar que há similaridade com a imagem obtida por Medina *et. al.* (2019) no que diz respeito a presença aglomerada de estruturas características do produto de hidratação do cimento.

A partir do exposto levanta-se a hipótese de que na Figura 49 (b) observa-se agulhas de etringita (assinalado com a letra "E") e formação de gel C-S-H (assinalado como C-S-H).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseado no conteúdo exposto no Capítulo 2 e a partir da execução da metodologia apresentada no Capítulo 3 e dos resultados obtidos que foram detalhados no Capítulo 4, a seguir são apresentadas as conclusões dessa pesquisa e, na sequência, as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

- Dosagem por empacotamento de partículas

A dosagem por meio da utilização do modelo de Alfred para os concretos dessa pesquisa foi, inicialmente, de difícil execução devido ao número elevado de materiais granulares a serem combinados (seis materiais: cimento, filler calcário, cinza volante, areia e dois tipos de brita). Esse problema foi resolvido com sucesso pela utilização do código desenvolvido em Python.

A implementação do código possibilitou a testagem de um número elevado de possíveis combinações, três execuções de testagem de um milhão de possíveis proporções cada, que seria impossível de executar sem o auxílio computacional. Além disso, a utilização do código também permitiu a aplicação do Método de Monte Carlo e o método dos mínimos quadrados de forma eficiente. Finalmente, a implementação do código também forneceu de forma simples e rápida a combinação entre os materiais com o menor valor de resíduo (RSS) dentre todas as proporções testadas.

Já em relação à utilização do coeficiente de distribuição no valor de $q=0,25$, para os materiais dessa pesquisa, não foi eficaz. Apesar de promover uma mistura fluída, o traço oriundo do método (C1) apresentou características próximas à de um CAA, mas ainda sem ser capaz de fluir pelo funil-V. É importante ressaltar que a trabalhabilidade do concreto ao final obtido depende não só da composição granular, mas é também intimamente ligado ao teor de água e aditivo redutor de água.

Conforme anteriormente abordado, o valor do coeficiente de distribuição “q” sugerido na literatura para produção de um CAA é de até 0,25, sendo que, quanto menor o valor de q, maior o teor de finos. A partir disso e dos resultados obtidos nessa pesquisa, é possível concluir que o intervalo de valor de “q” recomendado pela

literatura para a produção de CAA deve ser reavaliado, reduzindo o valor máximo recomendado.

Apesar da baixa eficácia do coeficiente “q” no valor de 0,25 para os materiais dessa pesquisa, a utilização do modelo de Alfred para dosagem de concretos com baixo teor de clínquer e elevada fluidez foi eficiente. A aplicação da teoria de empacotamento de partículas possibilitou a redução do consumo de cimento com consequente redução do consumo de clínquer atendendo o limite máximo estipulado de consumo de cimento de 280 kg/m³.

- Adição de cal

De forma geral, foi observada influência da cal no estado endurecido. Devido à solubilidade da cal em água foi observada lixiviação durante o período de cura submersa. Conclui-se então que a adição de cal, para as condições dessa pesquisa, deixou o concreto mais suscetível à lixiviação.

Foi possível observar de forma mais pronunciada os efeitos da cal quando analisados a partir do método de dosagem utilizado. A adição de cal ao concreto em substituição à areia promoveu menor interferência na trabalhabilidade do concreto quando comparada à adição em substituição aos finos. No estado endurecido, em relação à resistência à compressão, a adição de cal em substituição à areia também se mostrou mais eficiente, mantendo ou aumentando a resistência à compressão dos concretos.

Analisando a adição de cal em substituição aos finos, o desempenho em relação à durabilidade frente à deterioração por carbonatação foi superior ao dos traços em que a cal foi adicionada em substituição à areia.

- Carbonatação

A redução da porosidade a partir da aplicação de um método de empacotamento de partículas permitiu obter um concreto durável frente à deterioração por carbonatação, mesmo com consumo de cimento reduzido, isso é, inferior a 280 kg/m³.

O uso de sílica ativa reduziu o desempenho do concreto frente à deterioração pela carbonatação. A adição de cal em substituição à areia também foi negativa frente à carbonatação.

A partir da combinação da dosagem por empacotamento de partículas, adições pozolânicas e uso da cal em substituição aos finos do traço foi possível obter dois concretos com consumo de cimento de 211 kg/m³ e 172 kg/m³ que não apresentaram frente de carbonatação após 100 dias de exposição (C1_F e C2_F respectivamente). Sem a adição de cal e com consumo de cimento de 283 kg/m³ foi possível obter o mesmo desempenho frente à carbonatação (C1).

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Determinar a quantidade de portlandita teórica da hidratação do cimento, a partir do ensaio de FRX e cálculo estequiométrico, para estipular limites de consumo das adições pozolânicas. Outra abordagem possível a essa questão é a análise química direta, através do ensaio de termogravimetria do cimento;
2. Testar outros teores de reposição de portlandita pela cal. Sugere-se adicionar a cal em substituição aos finos devido ao desempenho superior na durabilidade quando comparada à substituição à areia. Recomenda-se ainda cautela em relação ao estado fresco devido à redução de trabalhabilidade observada nesse trabalho;
3. Em relação à dosagem pelo modelo de Alfred, sugere-se para trabalhos futuros redução do valor de “q” e dosagem da água em relação ao traço obtido pelo modelo (não um traço modificado do modelo, como feito nesse trabalho);
4. A influência negativa da cal na trabalhabilidade dos concretos seria minimizada caso a quantidade utilizada fosse menor. Para tanto, considerando a reposição de 100% do consumo de portlandita por parte das adições (calculado pelo Chapelle), a redução da quantidade de cal necessária seria possível com para cales com maior teor de portlandita em sua composição. Assim sendo, sugere-se para trabalhos futuros a utilização de cal do tipo CHI;
5. Expandir a avaliação da durabilidade utilizando métodos de previsão da vida útil e degradação por exposição à carbonatação natural;

6. Em complemento aos experimentos de absorção sugere-se também a realização do ensaio de micro CT e/ou porosimetria por intrusão de mercúrio para análise quantitativa da porosidade dos concretos.

REFERÊNCIAS

ADORNO, C. S.; LANGARO, E. A.; MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A. Teste acelerado de argamassas e a combinação de adições minerais ativas com agregado potencialmente reativo. **Journal of Urban Technology and Sustainability**, v. 3, p. 36-50, 2020.

ALONSO, M, C.; ANGUST, U; SANCHEZ, M.; ANN, K.Y. Onset of chloride induced reinforcement corrosion. In: **Handbook of concrete durability**, Kim, S-H.; Ann, K. Y. Eds. Korea: Middleton Publishing Inc, 2010. p 1-48.

ALENCAR, RICARDO DOS SANTOS ARNALDO DE. **Dosagem do concreto auto adensável: produção de pré-fabricados**. Dissertação (Mestrado). São Paulo : Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia de construção civil, 2008.

ALEXANDRE, E.; LUZ, C. A. Substituição parcial do cimento CPV-ARI por lodo de estação de tratamento de água (ETA). **Revista Matéria**, v. 25, n. 1, 2020.

ANDREASEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). **Kolloid-Zeitschrift**, v. 50, p. 217-228, 1930.

ANTUNES, D.; MARTINS, R.; CARMO, R.; COSTA, H.; JÚLIO, E. A solution with low-cement-lightweight concrete and high durability for applications in prefabrication. **Construction and Building Materials**, v. 275, 2021.

ASHISH, D. K.; VERMA, S. K. An overview on mixture design of self-compacting concrete. **Structural Concrete**, p. 1–25, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.

_____. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. ABNT NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003c.

_____. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003d.

_____. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.

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

_____. NBR 9833: Concreto fresco — Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009c.

_____. NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

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

_____. NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 15823-2: Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017a.

_____. NBR 15823-3: Concreto autoadensável Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2017b.

_____. NBR 15823-1: Concreto autoadensável - Parte 5: Concreto autoadensável Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017c.

_____. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017d.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014a.

_____. NBR 12653: Materiais pozolanicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2014b.

_____. NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 11768: Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2019.

BARTOS, P.J.M and SÖDERLIND, L., Environment and ergonomics. In: **Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete**. Task 8.5, p.1-31, 2000.

BERNSTEIN, L.; ROY, J.; DELHOTAL, K. C.; HARNISCH, J.; MATSUHASHI, R.; PRICE, L.; *et. al.* **Climate change 2007: mitigation. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge (United Kingdom and New York): Cambridge University Press; IPCC report, [chapter 7] p. 447–496, 2007.

BILLBERG, P.; PETERSSON, O.; OSTERBER, T. Full scale casting of bridges with self-compacting concrete. **Proceedings of the 1st International RILEM symposium on self-compacting concrete**, p. 639–50, 1999.

BROUWERS, H. J. H.; RADIX, H. J. Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 2116 – 2136, 2005.

BUI, V. K.; AKKAYA, Y.; SHAH, S. P. Rheological model for self-consolidating concrete. . **ACI Materials Journal**, vol. 99, n 6, 2002.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (CEF). **Manual de metodologias e conceitos – SINAPI**; Versão 004 – Vigência 09/2020. www.caixa.gov.br

CASAGRANDE, C. A.; MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; JOCHEM, L. F. Efeito da Substituição do Cimento por Cinza Volante em Concretos Autoadensáveis de Alto Desempenho. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR-ISSN 2358-5420–Edição Especial– Setembro de 2019**.

CAMPOS, H. F. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: Estudo experimental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CASCUDO, O. **Controle da Corrosão de Armaduras em concreto: inspeções e técnicas eletroquímicas**. 1 ed. São Paulo: PINI, 1997.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Consumo de cimento no brasil**. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/busca/?q=cimento>. Acesso em 30 de outubro de 2020.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18-32, 2009.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V. M. Cal na construção civil. In: Geraldo C Isaia. (Org.). **Materiais de Construção Civil em Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1ed.São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 695 – 726, .2007.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO NP EN 12390-3 – Concreto – Resistência à compressão dos corpos de prova de ensaio (CEN, 2003)

CORINALDESI, V., MORICONI, G. Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions. **Cement and Concrete Composites**, v. 33(5), p. 596–601, 2011.

COSTA, A. C. S de S. **Análise comparativa do uso do concreto autoadensável e do concreto convencional em obras verticais**. 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

CORDEIRO, G. C. “Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-deaçúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.” **Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ**, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

COSTA, A. C. S. de S.; CABRAL, A. E. B. Estudo comparativo entre o concreto autoadensável e o concreto convencional vibrado em obra vertical. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 4, p. 289-301, out./dez, 2019.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. **Mineral admixtures in mortars. Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration**. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, Issue 4, p. 719 – 730, April 2005.

DAL MOLIN, D. C. C.; OLIVEIRA, A. P. M. Estudo de concretos com adição de sílica ativa (microsílica) frente ao ataque de agentes agressivos para empregos em pisos especiais. s. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1., 1996, Florianópolis. **Proceedings**.. Florianópolis: UFSC, 1996. p. 590-598

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 555–562, 2010.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning — a scientific approach**, Modern Concrete Technology Series, vol. 9, E & FN Spon, London, 1999.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1699–1704, 2002.

DAL MOLIN, D. C. C. Capítulo 8: Adições minerais. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo. 1 v. 2011.

DIEDERICH, P.; MOURET, M.; PONCHON, F. Simple tools for achieving self-compacting ability of concrete according to the nature of the limestone filler. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 840–852, 2013.

DINAKAR, P.; SETHY, K. P.; SAHOO, U. C. Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag. **Materials and Design**, v. 43, p.161–169, 2013.

DOMONE P. Proportioning of self-compacting concrete—The UCL method. **ULC Library**, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College London, 2009.

EDAMATSU, Y.; NISHIDA, N.; OUCHI, N. A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles. **Proceedings of the 1st International RILEM symposium on self-compacting concrete**, p. 309–320, 1999.

European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC). **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use**, 2005.

ESMAEILKHANIAN, B.; KHAYAT, K. H.; WALLEVIK, O. H. Mix design approach for low-powder self-consolidating concrete: Eco-SCC—content optimization and performance. **Materials and Structures**, v. 50, 2017.

EVANGELISTA, L., GUEDES, M., FERRO, A. C., & DE BRITO, J. Microstructure of concrete prepared with construction recycled aggregates. **Microscopy and Microanalysis**, v. 19(S4), p. 147–148, 2013.

FELEKOĞLU, B.; TÜRKEK, S.; BARADAN B. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Building and Environment**, v. 42, p. 1795–1802, 2007.

FELIX, E.F., **Modelagem da Deformação do Concreto Armado Devido à Formação dos Produtos de Corrosão**, Dissertação de M.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

FENNIS, S. A. A. M. **Design of ecological concrete by particle packing optimization**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Delft University of Technology, Holanda, 2012.

FENNIS, S. A. A. M; WALRAVEN, J. C.; UIJL, J. A. D. The use of particle packing models to design ecological concrete. **HERON**. Vol. 54, No. 2/3, 2009.

FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. R. Corrosão das armaduras das estruturas de concreto. **Boletim técnico – ALCONPAT Internacional**, n. 6, 2013.

FIGUEIREDO, C. R.; NEPOMUCENO, A. A. **Uso do concreto aparente em Brasília: uma abordagem segundo o fenômeno da carbonatação**. Paranoá Eletrônico, Brasília, v. 9, 2007.

FLOWER, D. J. M.; SANJAYAN, J. G. Green house gas emissions due to concrete manufacture, **Int. J. Life Cycle Assess**, v. 12, p. 282–288, 2007.

FREIRE, K. R. R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto**. 192p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2005.

FONSECA, T. V.; ANJOS, M. A. S.; FERREIRA, R. L. S.; BRANCO, F. G.; PEREIRA, L. Evaluation of self-compacting concretes produced with ternary and quaternary blends of different SCM and hydrated-lime. **Construction and Building Materials**, Volume 320, 2022.

FU, X.; WANG, Z.; TAO, W.; YANG, C.; HOU, W.; DONG, Y.; WU, X. **Studies on blended cement with a large amount of fly ash**. Cement and Concrete Research, Vol. 32, Issue 7, p. 1153 - 1159, 2002.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Computer Modelling of Particle Packing Phenomena. Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions. **Springer**, Boston, MA, 1994.

GALLAS, F. **Efeitos nas Propriedades Volumétricas e Mecânicas Devido à Incorporação de Cal Em Pré-Misturado a Frio Utilizando Material Fresado**. Monografia (bacharelado em engenharia civil), Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, Rio Grande do Sul, 2018.

GARBOCZI, E. G., BENTZ, D. P. The Effect of the Interfacial Transition Zone on Concrete Properties: The Dilute Limit. **American Society of Civil Engineers, Proceedings of the Fourth Materials Conference**, November, 1996.

GHAZI, F. K.; JADIRIAL, R. S. New Method for Proportioning Self-Consolidating Concrete Based on Compressive Strength Requirements. **ACI Materials Journal**, vol. 17, n 5, 2010.

GOBBI, A. **Atividade Pozolânica de Adições Mineraias Pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: Uma Análise Crítica a Partir de Métodos Complementares**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2014.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. D. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: PINI, 172, 2009.

GOODIER, C. I. **Development of self-compacting concrete**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 156(4), 405-414, 2003.

GOOGLE. **Google Colaboratory**. Disponível em: < https://colab.research.google.com/?utm_source=scs-index >. Acesso em 18 jan. 22.

GHEZAL, A.; KHAYAT, K. H. Optimising self consolidating concrete with limestone filler by using statistical factorial design methods. **ACI Materials Journal**, v. 3, p. 264–272, 2002.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003. 341p.

GHODDOUSI, P.; JAVID, A. A. S.; SOBHANI, J. Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 102-109, 2014.

GOODIER, C. I. Development of self-compacting concrete. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 156, p. 405-414, 2003.

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

HARRISSON, A. M. Constitution and Specification of Portland Cement in **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 87–155, doi:10.1016/b978-0-08-100773-0.00004-6, 2019.

HELENE, P. R. L. **A Nova NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In: Seminário de Patologia das Construções, 2004, Porto Alegre. Proceedings. Porto Alegre: Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, LEME, UFRGS, 2004. v. 1. p. 1-30.

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

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

HOPPE FILHO, J.; CINCOTTO, M. A. Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, Departamento de Engenharia de Construção Civil, *BT/PCC/503*, 2008.

HOPPE FILHO, J.; RODRIGUES, C. S.; RIBEIRO, L. S. O. P.; MEDEIROS, M. H. F. Evaluation of sample drying methods to determine the apparent porosity and estimation of degree of hydration of portland cement pastes. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, 2021.

HOPPE FILHO, J.; SOUZA, J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; PORTELLA, F. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores, **Cerâmica**, v. 61, 2015.

HUNGER, M.; BROUWERS, H.J.H. Flow analysis of water-powder mixtures: Application to specific surface area and shape factor. **Cement & Concrete Composites**, Vol. 31, pp. 39-59, 2009

HUMEHARA, H.; HAMADA, D.; YAMAMURO, H.; OKA, S. Development and usage of self-compacting concrete in precast field. **Proceedings of the 1st International RILEM symposium on self-compacting concrete**, p. 705–717, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD)**. Disponível em:

<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html>. Acesso em 18 de março de 2021.

JIAO, D.; SHI, C.; YUAN, Q.; AN, X.; LIU, Y. Mixture design of concrete using simplex centroid design method. **Cement & Concrete Composites**, v. 89, p 76-88, 2018.

JOSA, I; AGUADO, A. Infrastructures and society: from a literature review to a conceptual Framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, p. 117741, 2019.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**, 78, 71e80, 2015

KANADASAN, J.; RAZAK, H. A. Mix design for self-compacting palm oil clinker concrete based on particle packing. **Materials and Design**, v. 56, p. 9-19, 2014.

KANTRO, D. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste - A Miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, p. 95–102, 1980.

KHALEEL, O. R.; RAZAK, H. A. Mix design method for self-compacting metakaolin concrete with different properties of coarse aggregate. **Materials and Design**, v. 53, p. 691 – 700, 2014.

KHAYAT, K. H.; GHEZAL, A.; HADRICHE, M. S. Factorial design model for proportioning self-consolidating concrete. **Materials and Structures**, v. 32, p. 679 – 686, 1999.

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

KIBERT, C. J. **Sustainable construction: green building design and delivery**. John Wiley & Sons, 2016.

KLEIN, N. S.; **El rol físico del agua en mezclas de cemento Portland**. Tese (Doutorado) - Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2012.

KORPA, A.; KOWALD, T.; TRETTIN, R. Phase development in normal and ultra high performance cementitious systems by quantitative X-ray analysis and thermoanalytical methods. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 69-76, 2009.

KRAUTH, W. **Statistical mechanics: algorithms and computations**, Oxford University Press, Oxford, 2006.

KUMAR, S.; SANTHANAM, M. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. **Indian Concrete Journal**, 77(9), 1324-1331, 2003.

KWAN, A. K. H.; CHAN, K. W.; WONG, V. A 3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect. **Powder Technology**, v. 237, p. 172–179, 2013.

KWAN, A.K.H; LI, L.G.; FUNG, W.W.S. Wet packing of blended fine and coarse aggregate. **Materials and Structures** v. 45, p. 817–828, 2012.

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F. Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles. **Magazine of Concrete Research**, v. 53, No. 2, p. 91-100, 2001.

LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 997-1009, 1994.

LI, G. L.; KWAN; A. K. H. Concrete mix design based on water film thickness and paste film thickness. **Cement & Concrete Composites**, v. 39, p 33-42, 2013.

Li, L. G.; Huang, Z.H.; Tan, Y.P.; Kwan, A.K.H.; Liu, F. Use of marble dust as paste replacement for recycling waste and improving durability and dimensional stability of mortar. **Construction and Building Materials**, V. 166, P. 423–432, 2018a.

Li, L. G.; Lin, C.J.; Chen, G.M.; Kwan, A.K.H. Jian, T. Effects of packing on compressive behaviour of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 757–777, 2017.

Li, L. G.; Wanga, Y. M.; Tana, Y. P.; Kwan, A. K. H.; Li, L. J. Adding granite dust as paste replacement to improve durability and dimensional stability of mortar. **Powder Technology**, V. 333, P. 269–276, 2018b.

LE, H. T.; KRAUS, M.; SIEWERT, K.; LUDWIG, H. M. Effect of macro-mesoporous rice husk ash on rheological properties of mortar formulated from selfcompacting high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 80, p. 225–235, 2015

LONDERO, C. **Dosagem de concreto ecológico com base em estudo de empacotamento de partículas**. Dissertação (Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

LONDERO, C.; LENZ, L. A.; SANTOS, Í.; KLEIN, N. S. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Cerâmica**, 63(365), 22-33, 2017.

LONG, W. J.; GU, Y.; LIAO, J.; XING, F. Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 317-325, 2017.

LONG, W. J.; KHAYAT, K. H.; LEMIEUX, G.; XING, F.; WANG, W. L. Factorial Design Approach in Proportioning Prestressed Self-Compacting Concrete. **Materials**, v. 8, p. 1089-1107, 2015.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. Tese de Doutorado (Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

MA, K.; FENG, J.; LONG, G.; XIE, Y.; CHEN, X. Improved mix design method of self-compacting concrete based on coarse aggregate average diameter and slump flow. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 566-573, 2017.

MA, X.; MA, H.; JIANG, X.; JIANG, Z. Preparation of magnesium hydroxide nanoflowers from boron mud via anti-drop precipitation method. **Materials Research Bulletin**, v. 56, p. 113-118, 2014.

MAIA, Alessandra Tourinho. **Proposição de um método de dosagem racional de concretos de ultra-alto desempenho**. 2021. 271 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; PRUDÊNCIO JR, L. R. Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 941–955, 2019.

McGEARY, R. K. Mechanical packing of spherical particles. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 44, p. 513-522, 1961.

MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; GROENWOLD, J. A.; HELENE, P. Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, 66(1), 59-65, 2013.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos com Proteção Superficial Frente à Ação de Íons Cloretos**. 2008. 218 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEDEIROS, M. H. F.; 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** (Online), v. 17, p. 125–139, 2017.

MEDINA, C., SÁNCHEZ, J., SÁEZ DEL BOSQUE, I. F., FRÍAS, M., & SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I. Meso-structural modelling in recycled aggregate concrete. **New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete**, p. 453–476, 2019

MÉDUCIN, F.; BRESSON, B.; LEQUEUX, N.; NOIRFONTAINE, M-N.; ZANNI, H.; Calcium silicate hydrates investigated by solid-state high resolution 1H and 29Si nuclear magnetic resonance, **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 631-638, 2007.

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Understanding the role of particle packing characteristics in rheophysical properties of cementitious suspensions: A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 340–353, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Ed. 2. São Paulo: Pini, 2014.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, diagnóstico e prevenção**. 1 ed. João Pessoa: IFPB, 2017.

MIRANDA, L. R. M. **Carbonatação em Concretos Autoadensáveis com Substituições de Cimento Portland por Adições Minerais**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2018.

MIZOBUCHI, T.; YANIA, S.; TAKADA, K.; SAKATA, N.; NOBUTA, Y. Field applications of self-compacting concrete with advantageous performances. **Proceedings of the 1st International RILEM symposium on self-compacting concrete**, p. 605–16, 1999.

MONTEMOR, M. F.; SIMÕES, A.M.P.; FERREIRA, M.G.S. Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 45-53, 2002.

NANTHAGOPALAN, P.; SANTHANAM, M. An empirical approach for the optimisation of aggregate combinations for self-compacting concrete. **Materials and Structures**, v. 45, p. 1167–1179, 2012.

NEPOMUCENO, M. C. S; PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; LOPES, S. M. R.; FRANCO, R. M. C. Maximum coarse aggregate's volume fraction in self-compacting concrete for different flow restrictions. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 851-856, 2016.

NGUYEN, H. A.; CHANG, T. P.; SHIH, J. Y.; DJAYAPRABHA, H. S. Enhancement of low-cement self-compacting concrete with dolomite powder. **Construction and Building Materials**, V. 161, P. 539–546, 2018.

NIELSEN, C. V.; GLAVIND, M. Danish experience with a decade of green concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 5, p.3–12, 2007.

NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável: tecnologia e propriedades**. Dissertação (mestrado). Porto: Faculdades de Engenharia da Universidade de Porto, 2001.

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

NumPy. Disponível em: < <https://numpy.org/about/> >. Acesso em 18 jan. 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação**, 2019. Disponível em:

<https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701#:~:text=Segundo%20a%20ONU%2C%20atualmente%2055,aumente%20para%2070%25%20at%C3%A9%202050.>

Acesso em 18 de março de 2021.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. Development, present use and future. **First International RILEM symposium on self-compacting concrete**. Rilem Publications. p. 3–14, 1999.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, p. 5-15, 2003.

OLIVEIRA, F. S.; PERUZZI, A. P. **Análise e estudo da influência da adição de cal no concreto com ar incorporado tendo em vista a redução da frente de carbonatação**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

OLIVEIRA, I.R. STUART, A.R. PILEGGI, R.G. PANDOLFELLI, V.C. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.

OLIVEIRA, V. C. H.; DAMINELI, B. L.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos**. *Ambiente construído*, v. 14 (4), Dez 2014.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, p 2109–2135, 2015.

Pandas. Disponível em: < <https://pandas.pydata.org/about/> >. Acesso em 18 jan. 2022.

PAULETTI, C. **Análise Comparativa de Procedimentos para Ensaios Acelerados de Carbonatação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.

PELISSER, F.; VIEIRA, A.; BERNARDIN, A. M. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 324-332, 2018.

PEREIRA, B. C. G.; NASCIMENTO, R. S.; JOFFILY, I. A. L. Os efeitos de diferentes aditivos cristalizantes nas propriedades do concreto nas primeiras idades: abatimento do tronco de cone, tempo de início de pega, teor de ar no estado fresco. **Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2017.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. 2010. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese de Doutorado (Doutorado em engenharia). Escola de engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, URGs, Porto Alegre, 2010.

PRADHAN, S.; KUMAR, S.; BARAI, S.V. Recycled aggregate concrete: Particle Packing Method (PPM) of mix design approach. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 269–284, 2017.

PROSKE, T.; HAINER, S.; REZVANI, M.; GRAUBNER, C. A Eco-friendly concretes with reduced water and cement content – Mix design principles and application in practice. **Construction and Building Materials**, V. 67, p. 413–421, 2014.

PROSKE, T.; HAINER, S.; REZVANI, M.; GRAUBNER, C. A. Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents — Mix design principles and laboratory tests. **Cement and Concrete Research**, V. 51, p. 38–46, 2013.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python**. Disponível em: < <https://www.python.org> >. Acesso em 18 jan. 2022.

QUEIROZ, I. S. O. **Desenvolvimento de Concretos de Ultra-Alta Resistência com Uso de Materiais Disponíveis na Região do Norte de Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. 2018.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. 2011. 211 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2011.

RÉUS, G. C. **Elevação da Alcalinidade do Concreto e Restauração da Camada de Passivação do Aço Por Meio da Realcalinização Química**. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPR, 2022.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C. DE; et al. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria Controle e Métodos de Análise**. 1 a ed. Elsevier, 2014.

ROSSIGNOLO, J.A. Avaliação da zona de transição interfacial pasta-agregado leve em concretos com sílica ativa e látex SBR. **Revista Matéria**, v. 12, n. 3, pp. 532 – 540, 2007.

ROUSSEL, N. A theoretical frame to study stability of fresh concrete, **Materials and Structures**, v. 39 p. 81–91, 2006.

ROZIÈRE, E.; LOUKILI, A.; CUSSIGH, F. A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 190-199, 2009.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. New methodology for designing selfcompacting concrete. **ACI Materials Journal**, v. 98, p. 429-439, 2001.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental Universidade de Brasília, Brasília, 2006. 161p.

SBIA, L. A.; PEYVANDI, A.; SOROUSHIAN, P.; BALACHANDRA, A. M. Evaluation of modified-graphite nanomaterials in concrete nanocomposite based on packing density principles. **Construction and Buildings Materials**. n. 76, p. 413-422. 2015.

SEBAIBI, N.; BENZERZOUR, M.; SEBAIBI, Y.; ABRIAK, N. E. Composition of self-compacting concrete (SCC) using the compressible packing model, the Chinese method and the European standard. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 382-388, 2013.

SEDRAN, T.; DE LARRARD, F. Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. **1st International RILEM symposium on self-compacting concrete**, p. 321 – 332, 1999.

SHI, C.; WU, Y. Mixture Proportioning and Properties of Self-Consolidating Lightweight Concrete Containing Glass Powder. **ACI MATERIALS JOURNAL**, p. 335-363, 2005.

SHI, C.; WU, Z.; LV, K.; WU, L. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 387-398, 2015.

SHI, H. S.; XU, B. W.; ZHOU, X. C. Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1980-1985, 2009.

SINGH, M. Coal bottom ash in Waste and Supplementary **Cementitious Materials in Concrete**, 3–50. doi:10.1016/b978-0-08-102156-9.00001-8, 2018.

SOLDADO, E.; ANTUNES, A.; COSTA, H.; CARMO, R.; JÚLIO, E. Durability of mortar matrices of low-cement concrete with specific additions. **Construction and Building Materials**, V. 309, 2021.

SOHAIL, M. G.; WANG, B.; JAIN, A.; KAHRAMAN, R.; OZERKAN, N. G.; GENCTURK, B.; BELARBI, A. Advancements in Concrete Mix Designs: High-Performance and Ultrahigh-Performance Concretes from 1970 to 2016. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 30(3), 2018.

SONEBI, M. Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: modelling using factorial experimental plans. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1199–1208, 2004

SONEBI, M.; BAHADORI-JAHROMI, A.; BARTOS, P. J. M. Development and optimisation of medium strength self-compacting concrete by using pulverised fuel ash. **Proceedings of the Third RILEM International Symposium on Self-compacting Concrete**, p. 514–524, 2003.

STOVALL, T.; DE LARRARD, F.; BUIL, M. Linear Packing Density Model of Grain Mixtures. **Powder Technology**, v. 48, p. 1 – 12, 1986.

SU, N.; HSU, K. C.; CHAI, H. W. A simple mix design method for self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1799–1807, 2001.

SUKUMAR, B., NAGAMANI, K., & SRINIVASA RAGHAVAN, R. Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 22(7), p. 1394–1401, 2008.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. Thomas Telford Publishing, London, 1997.

TEIXEIRA, E. R.; CAMÕES, A.; BRANCO, F. G.; AGUIAR, J. B.; FANGUEIRO, R. Recycling of biomass and coal fly ash as cement replacement material and its effect on hydration and carbonation of concrete. **Waste Management**, v. 94, 2019.

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

TRIGO, A. P. M.; LIBORIO, J. B. L. Doping technique in the interfacial transition zone between paste and lateritic aggregate for the production of structural concretes. **Mat. Res.**, v. 17 (1), 2014.

TOUTOU, Z.; ROUSSEL, N. Multi scale experimental study of concrete rheology: from water scale to gravel scale. **Materials and Structures**, v. 39, p. 189–199, 2006.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosage de concretos auto-adensáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil UFRGS, Porto Alegre, 149p., 2004.

TUTIKIAN, B. F. et al. Viabilidade Técnica e Econômica do Concreto Auto-Adensável em Empresas de Pré-Moldado. **Concreto & Construções**, v. 34, n. 43, p. 30-35, jun./ago, 2006.

UEDA, T.; TAKEWAKA, K. Performance-based Standard Specifications for Maintenance and Repair of Concrete Structures in Japan. **Structural Engineering International**, v. 17, n. 4, p. 359–366, 2007.

VALCUENDE, M.; PARRA, C. Natural carbonation of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, V. 24, P. 848–853, 2010.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**, Tese Doutorado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de S. Carlos, Universidade de S. Paulo, S. Carlos, SP (2004).

VEDALAKSHMI, R.; RAJ, A. S.; SRINIVASAN, S.; BABU, K. G. **Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and OTA technique**. *Thermochimica Acta*, Vol. 407, Issues 1 - 2, p. 49 - 60, 2003.

VOGT, C. Ultrafine particles in concrete - **Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design**. PhD thesis. School of Architecture and the Built Environment, Civil and Architectural Engineering, Concrete Structures. 2010.

WANG, X.; WANG, K.; TAYLOR, P.; MORCOUS, G. Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 439–452, 2014.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo, EPUSP/PMT, 1987.

WONG, V.; CHAN, K.W.; KWAN, A. K. H. Applying theories of particle packing and rheology to concrete for sustainable development. **Org. Technol. Manag. Constr.** n. 5, p. 844-851. 2013.

WONG, H.H.C.; KWAN, A.K.W. Packing density of cementitious materials: part 1 – measurement using a wet packing method. **Materials and Structures**, v. 41, p. 689 - 701, 2008.

WU, Q.; AN, X. Development of a mix design method for SCC based on the rheological characteristics of paste. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 642-651, 2014.

WU, Z.; ZHANG, Y.; ZHENG, J.; DING, Y. An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2092–2092, 2009.

YAMMINE, J.; CHAOUICHE, M.; GUERINET, M.; MORANVILLE, M.; ROUSSEL, N. From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 890-896, 2008.

YANG, R.; YU, R.; SHUI, Z.; GAO, X.; XIAO, X.; ZHANG, X.; WANG, Y.; HE, Y. Low carbon design of an Ultra-High Performance Concrete (UHPC) incorporating phosphorous slag. *Journal of Cleaner Production*, V. 240, P. 118-157, 2019.

YAZICI, H. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22(4), p. 456–462, 2008.

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

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

YU, R. SPIESZ, P. BROUWERS, H.J.H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 383–394, 2015.

YUAN, Q.; LIU, Z.; ZHENG, K.; MA, C. Inorganic cementing materials in Civil Engineering Materials - From Theory to Practice. **Elsevier**, p. 17 – 57, 2021.

ZHANG, X.; ZHOU, X.; ZHOU, H.; GAO, K.; WANG, Z. Studies on forecasting of carbonation depth of slag high performance concrete considering gas permeability. **Applied Clay Science**, v. 79, 2013.

ZHANG, Y. M.; SUN, W.; YAN, H. D. **Hydration of high-volume fly ash cement pastes**. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 22, Issue 6, p. 445 - 452, December 2000.

APÊNDICE 1 – *METHODI ORDINATIO*

A formulação da revisão bibliográfica apresentada nos capítulos 2, 3 e 4 teve como base um método de revisão sistemática da literatura, o *Methodi Ordinatio* de Paganini, Kovaleski e Resende (2015). O método consiste em uma sequência de nove passos para a formação de um portfólio de artigos que irão compor a revisão bibliográfica do trabalho.

O primeiro passo é a definição do tema da pesquisa, assim como sua divisão em eixos. Foi definido como tema dessa dissertação a dosagem de CAA a partir de técnicas de empacotamento de partículas, buscando reduzir o consumo de cimento e então avaliar os efeitos da carbonatação sobre os concretos produzidos. Este tema foi dividido em três eixos.

O eixo 1 engloba conceitos gerais associados à dosagem do CAA, o eixo 2 aborda a dosagem do CAA especificamente pelas técnicas de empacotamento de partículas e o eixo 3 trata sobre o comportamento do CAA dosado por técnicas de empacotamento de partículas ou baixo teor de cimento frente à carbonatação.

O segundo passo consiste em realizar uma busca preliminar, de caráter exploratório, em diversas bases de dados com diferentes palavras-chave a fim de obter um panorama geral sobre termos pertinentes à pesquisa e combinações que proporcionem resultados satisfatórios. Esse passo também permite filtrar quais bases de dados fornecem melhores resultados dentro do tema da pesquisa.

A partir das observações do passo anterior deve-se seguir para o terceiro passo, que consiste em definir as palavras chave e bases a serem utilizadas na busca final. Para essa dissertação, foram escolhidas as palavras chave (com operadores booleanos) e bases apresentadas na tabela 2. São ainda apresentados o número de artigos obtido em cada pesquisa assim como a respectiva data em que foram realizadas as buscas, separados por eixo de pesquisa. Vale ressaltar que foram efetuados dois tipos de busca, a geral em que a busca pelas palavras-chave ocorre em todo o documento e por TAK (do inglês, Title, Abstract and Keywords) em que a busca ocorre apenas no título, resumo e nas palavras-chaves do artigo.

Tabela 18 - Palavras-chave e base de dados utilizadas na pesquisa bibliográfica, considerando a separação de três eixos de pesquisa

Eixo	Tipo de busca	Palavras – chave	N° de artigos encontrados nas bases de dados			Data da pesquisa
			Science Direct	Scopus	Web of Science	
1	TAK	("design method") AND ("self-compacting concrete" OR "SCC") AND NOT ("fibers" OR "fiber" OR "reinforced concrete")	37	84	68	11/02/2020
2	TAK	("particle packing" OR "packing density") AND ("design" OR "composition") AND ("self-compacting concrete" OR "SCC")	17	35	59	06/02/2020
3	TAK	("particle packing" OR "packing density") AND ("carbonation" OR "carbonatation")	7	29	19	06/02/2020
3	Geral	("particle packing" OR "packing density" OR "low cement") AND ("carbonation" OR "carbonatation") AND ("self-compacting concrete" OR "SCC")	135	100	4	21/01/2020

FONTE: A autora

LEGENDA: TAK – Busca de palavras-chave no título, resumo e palavras-chave
Geral – Busca de palavras-chave em todo o documento

Na sequência, o quarto passo consiste em baixar dados sobre cada artigo (título, resumo e palavras-chave) a fim de possibilitar o desenvolvimento da etapa seguinte, de filtragem. A finalização desse passo se dá pela organização dos títulos em um gerenciador de referência, resultando em um portfólio preliminar de artigos. Para essa dissertação, dois softwares gerenciadores de referências foram utilizados, o Mendeley, versão 1.19.4 e o JabRaf versão 4.3.1.

O quinto passo da revisão sistemática é a filtragem dos artigos. O procedimento dessa etapa compreende a análise dos dados de cada artigo (obtido no passo anterior) de forma a excluir duplicatas, materiais científicos que não sejam artigos e títulos que fujam ao assunto da pesquisa. Essa etapa resulta em um portfólio final. Nessa dissertação, o critério utilizado em todos os eixos foi a exclusão de títulos de outras áreas de conhecimento (medicina, engenharia mecânica e etc.), assim como os de abordagem voltada para a análise estrutural, concreto reforçado com fibras e concreto constituído de agregado reciclado.

Como critério específico, no eixo 1 o processo de filtragem também excluiu artigos voltados para dosagem de concretos por técnicas de empacotamento de partículas (dado que estes foram avaliados de forma específica no eixo 2), dosagem de concreto convencionais (não auto adensáveis) assim como os de dosagem específicas de adições não disponíveis na região da pesquisa, como a escória de alto forno. Para o eixo 2 foram excluídos os títulos que tratavam de dosagens não baseadas nos métodos de empacotamento de partículas e dosagens de concreto convencionais. Já para a constituição do eixo 3, o processo de filtragem excluiu títulos que abordavam outras reações deletérias que não a carbonatação, assim como os estudos acerca de concretos dosados com teores médios a altos de cimento.

O sexto passo compreende a identificação de dados acerca do artigo e do respectivo periódico onde foi publicado. São eles fator de impacto do periódico, ano de publicação do artigo e número de citações do artigo.

O sétimo passo consiste em aplicar a Equação 1, proposta pelos autores Paganini, Kovalski e Resende (2015), a cada um dos títulos do portfólio final obtido no quinto passo, a partir dos dados coletados no sexto passo.

$$\text{InOrdinatio}=(\text{IF}/1000)+\alpha[10-(\text{RY}-\text{PY})]+(\sum\text{Ci}) \quad (1)$$

Onde:

IF – Fator de impacto;

α – Fator de ponderação atribuído pelo pesquisador (1 a 10);

RY – Ano de desenvolvimento da pesquisa bibliográfica, no caso o ano de 2020;

PY – Ano de publicação dos artigos selecionados;

$\sum\text{Ci}$ – Número de citações do artigo.

A aplicação da equação 1 resulta numa atribuição de valor (InOrdinatio) para cada artigo, seguida por uma classificação dos artigos de maior para menor valor numérico. Para o desenvolvimento dessa dissertação foi escolhido atribuir valor 5 (cinco) para α , valor intermediário no intervalo definido pelos autores do método. Esse fator pondera a importância do ano de publicação para relevância do artigo.

Após determinação do InOrdinatio de cada um dos títulos prossegue-se com o desenvolvimento da revisão com o passo oito, baixar os artigos.

A finalização do Methodi Ordinatio consiste na leitura dos artigos selecionados, sendo que a seleção pode englobar todo o portfólio ou um número

determinado pelo pesquisador, baseado no valor de InOrdinatio ou quantidade de artigos. A lista final dos artigos (portfólio) com respectivos valores de InOrdinatio de cada título, dos três eixos, é apresentada no Apêndice 2.

Durante a elaboração da revisão bibliográfica decidiu-se ainda por acrescentar alguns artigos de autores renomados nos temas dos três eixos que não apareceram ao longo do processo de revisão sistemática da literatura pelo Methodi Ordinatio por não estarem disponíveis nas bases de dados utilizadas.

Cabe ainda ressaltar que, além dos artigos provenientes do método de revisão sistemática, foram também utilizados livros, dissertações e teses para a elaboração dessa pesquisa.

APÊNDICE 2 – LISTA ARTIGOS RESULTANTES DO *METHODI* *ORDINATIO*

Tabela 19 - Lista artigos revisão sistemática

Eixo 1						
Autores	Título	Periódico	Fator de impacto (FI)	N° citações	Ano	InOrdinatio
Su, N., Hsu, K.-C. and Chai, H.-W.	A simple mix design method for self-	Cement and Concrete Research	5618	704	2001	700,618
Felekoğlu, B., Türkel, S.S., Baradan, B.B., Felekoglu, B., Turkel, S., Baradan, B.B., Felekoğlu, B., Türkel, S.S., Baradan, B.B., Felekoğlu, B., Türkel,	Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete	Building and Environment	4820	318	2007	319,82
Shi, C., Wu, Z., Lv, K. and Wu, L.	A review on mixture design methods for self-	Construction and Building Materials	4685	124	2015	133,685
Wu, Q. and An, X.	Development of a mix design method for SCC based on the rheological	Construction and Building Materials	4685	46	2014	54,685
Khaleel, O.R. and Razak, H.A.	Mix design method for self compacting metakaolin concrete with different properties	MATERIALS & DESIGN	5770	33	2014	42,77
Ma, K., Feng, J., Long, G., Xie, Y. and Chen, X.	Improved mix design method of self-compacting concrete based on coarse	Construction and Building Materials	4685	16	2017	27,685
Nepomuceno, M.C.S., Pereira-de-Oliveira, L.A., Lopes, S.M.R. and Franco, R.M.C.	Maximum coarse aggregate's volume fraction in self-compacting concrete for	Construction and Building Materials	4685	16	2016	26,685
Silva, P., de Brito, J. and Costa, J.	Viability of Two New Mixture Design Methodologies for Self-	ACI MATERIALS JOURNAL (JCR 2018)	1,453	25	2011	26,001453
Abo Dhaheer, M.S., Al-Rubaye, M.M., Alyhya, W.S., Karihaloo, B.L. and Kulasegaram, S.	Proportioning of self-compacting concrete mixes based on target plastic viscosity and compressive strength: Part I - mix design procedure	Journal of Sustainable Cement-Based Materials (não encontrado)	0	20	2016	26
Esmailkhanian, B., Khayat, K.H. and Wallevik, O.H.	Mix design approach for low-powder self-consolidating concrete: Eco-SCC-content optimization and performance	MATERIALS AND STRUCTURES	2607	15	2017	24,607

Eixo 1						
Autores	Título	Periódico	Fator de impacto (FI)	N° citações	Ano	InOrdinatio
Habibi, A. and Ghomashi, J.	Development of an optimum mix design method for self-compacting concrete based on experimental results	Construction and Building Materials	4685	7	2018	19,685
Ashish, D.K. and Verma, S.K.	An overview on mixture design of self-compacting concrete	Structural Concrete	1885	7	2019	17,885
de Matos, P.R., Sakata, R.D. and Prudêncio L.R., J.	Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes	Construction and Building Materials	4685	3	2019	16,685
Zhang, J., An, X., Yu, Y. and Nie, D.	Effects of coarse aggregate content on the paste rheological	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	4685	3	2019	16,685
de Sensale, G.R., Viacava, I.R. and Aguado, A.	Simple and rational methodology for the formulation of self-	Journal of Materials in Civil Engineering	1984	8	2016	15,984
Kumar, P.	Self-compacting concrete: Methods of testing and design	Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering	0	19	2006	15
Ashish, D.K. and Verma, S.K.	Determination of optimum mixture design method for self-compacting concrete:	Construction and Building Materials	4685	1	2019	14,685
Li, P., Zhang, T., An, X. and Zhang, J.	An enhanced mix design method of self-compacting concrete with fly ash content based on paste	Construction and Building Materials	4685	0	2020	14,685
Zhang, J., An, X. and Li, P.	Research on a mix design method of self-compacting concrete based on a paste	Construction and Building Materials	4685	0	2020	14,685
Urban, M.	The new conception of self-compacting concrete composition design: theoretical background, evaluation,	Materials and Structures/Materials and Constructions	2548	3	2015	10,548
Juradin, S. and Radović, T.	Comparison of methods of dosage and effect of the composition on the properties of fresh and	Solid State Phenomena	0,4	1	2016	7,0004

Eixo 2						
Autores	Título	Periódico	Fator de impacto (FI)	N° citações	Ano	InOrdinatio
de Larrard, F. and Sedran, T.	Mixture-proportioning of high-performance	Cement and Concrete Research	5618	262	2002	259,618
Shi, C., Wu, Z., Lv, K. and Wu, L.	A review on mixture design methods for self-	CONSTRUCTION AND BUILDING	4685	124	2015	133,685
Li, L.G. and Kwan, A.K.H.	Concrete mix design based on water film	CEMENT & CONCRETE	5172	72	2013	80,172
Kanadasan, J. and Razak, H.A.	Mix design for self-compacting palm oil clinker concrete based	Materials & Design (1980-2015)	4364	70	2014	78,364
Ghoddousi, P., Javid, A.A.S. and Sobhani, J.	Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	4685	45	2014	53,685
Sebaibi, N., Benzerzour, M., Sebaibi, Y. and Abriak, N.-E.	Composition of self compacting concrete (SCC) using the compressible packing	Construction and Building Materials	4685	40	2013	47,685
Wang, X., Wang, K., Taylor, P. and Morcou, G.	Assessing particle packing based self-consolidating concrete	Construction and Building Materials	4685	39	2014	47,685
Nanthagopalan, P. and Santhanam, M.	Experimental investigations on the influence of paste composition and	Construction and Building Materials	4685	37	2009	40,685
Mehdipour, I. and Khayat, K.H.	Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	4685	25	2018	37,685

Eixo 2						
Autores	Título	Periódico	Fator de impacto (FI)	N° citações	Ano	InOrdinatio
Diederich, P., Mouret, M. and Ponchon, F.	Simple tools for achieving self-compacting ability of concrete according to	Construction and Building Materials	4685	26	2013	33,685
Skarendahl, A., Billberg, P., Beitzel, H., Dehousse, E., Dieryck, V., Fadela, A., Gib, I., Gibbs, J.J., Khrapko, M., Leemann, A., Luco, L.F., Osterberg, T., Revuelta, D., De Schutter, G., Sonebi,	Final report of RILEM TC 188-CSC 'Casting of self compacting concrete'	MATERIALS AND STRUCTURES	2607	33	2006	31,607
Long, W.-J., Gu, Y., Liao, J. and Xing, F.	Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-	Journal of Cleaner Production	6395	18	2017	31,395
Lowke, D.	Thixotropy of SCC—A model describing the effect of particle packing and superplasticizer adsorption on thixotropic structural	Cement and Concrete Research	5618	15	2018	28,618
Pelisser, F., Vieira, A. and Bernardin, A.	Efficient self-compacting concrete with low	Journal of Cleaner Production	6395	12	2018	26,395
Li, L.G., Chen, J.-J. and Kwan, A.K.H.	Roles of packing density and water film thickness in strength and	MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH	2026	16	2017	25,026
Zuo, W., Liu, J., Tian, Q., Xu, W., She, W., Feng, P. and Miao, C.	Optimum design of low-binder Self-Compacting Concrete based on	Construction and Building Materials	4685	10	2018	22,685
Sun, Y., Wang, Z., Gao, Q. and Liu, C.	A new mixture design methodology based on the Packing Density Theory for high	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	4685	9	2018	21,685
Nanthagopalan, P. and Santhanam, M.	An empirical approach for the optimisation of aggregate combinations for self-compacting	Materials and Structures/Materials and Structures	2607	17	2012	21,607

Eixo 2						
Autores	Título	Periódico	Fator de impacto (FI)	N° citações	Ano	InOrdinatio
Ashish, D.K. and Verma, S.K.	An overview on mixture design of self-	STRUCTURAL CONCRETE	1885	7	2019	17,885
Basheerudeen, A. and Sivakumar, A.	Particle packing approach for designing the mortar phase of self	Engineering Journal	4568	9	2014	17,568
Mehdipour, I. and Khayat, K.H.	Elucidating how particle packing controls rheology and strength development of dense	CEMENT & CONCRETE COMPOSITES	5172	0	2019	14,172
Sameer, S.K., Chakravarti, B.J. and Ramesh, V.	A quantitative approach in designing self compacting concrete	Indian Concrete Journal	0,25	7	2017	14,00025
Gil, A.M., Khayat, K.H. and Tutikian, B.F.	An experimental approach to design self-	Construction and Building Materials	4685	0	2019	13,685
Bucher, R., Diederich, P., Mouret, M., Escadeillas, G. and Cyr,	Self-compacting concrete using flash-metakaolin: design	MATERIALS AND STRUCTURES	2607	4	2015	11,607
Urban, M.	The new conception of self-compacting concrete composition design: theoretical background, evaluation,	MATERIALS AND STRUCTURES	2607	3	2015	10,607
Chand, M.S.R., Ratna, P.S.N., Radhika, K.L., Kumar, P.R. and Yedukondalu, C.	Optimization of mix proportioning for self compacting concretes using particle packing	Indian Concrete Journal	0,25	1	2017	8,00025
Shen, J., Yurtdas, I., Diagana, C. and Li, A.	Mix-design method of self-compacting	CANADIAN JOURNAL OF CIVIL	0,869	8	2009	7,000869

Eixo 3						
Autores	Título	Periódico	Fator de impacto (FI)	N° citações	Ano	InOrdinatio
de Larrard, F. and Sedran, T.	Mixture-proportioning of high-performance	Cement and Concrete Research	5618	262	2002	259,618
Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M. and Graubner, C.-A.	Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents - Mix	Cement and Concrete Research	5618	84	2013	92,618
Valcuende, M. and Parra, C.	Natural carbonation of self-compacting	Construction and Building Materials	4685	86	2010	90,685
Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M. and Graubner, C.-A.	Eco-friendly concretes with reduced water and cement content - Mix design principles and	Construction and Building Materials	4685	37	2014	45,685
Li, L., Zhu, J., Huang, Z., Kwan, A. and Li, L.	Combined effects of micro-silica and nano-	Construction and Building Materials	4685	29	2017	40,685
Li, Y. and Kwan, A.	Ternary blending of cement with fly ash microsphere and condensed silica fume to	Cement and Concrete Composites	5172	25	2014	34,172
Li, L., Huang, Z., Tan, Y., Kwan, A. and Liu, F.	Use of marble dust as paste replacement for recycling waste and improving durability and	Construction and Building Materials	4685	20	2018	32,685
Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., León, N. and Sánchez-Espinosa, E.	Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-	Construction and Building Materials	4685	19	2018	31,685
Jiao, D., Shi, C., Yuan, Q., An, X. and Liu, Y.	Mixture design of concrete using simplex	Cement and Concrete	5172	17	2018	30,172
Zhang, R. and Panesar, D.	New approach to calculate water film thickness and the correlation to the	Construction and Building Materials	4685	18	2017	29,685

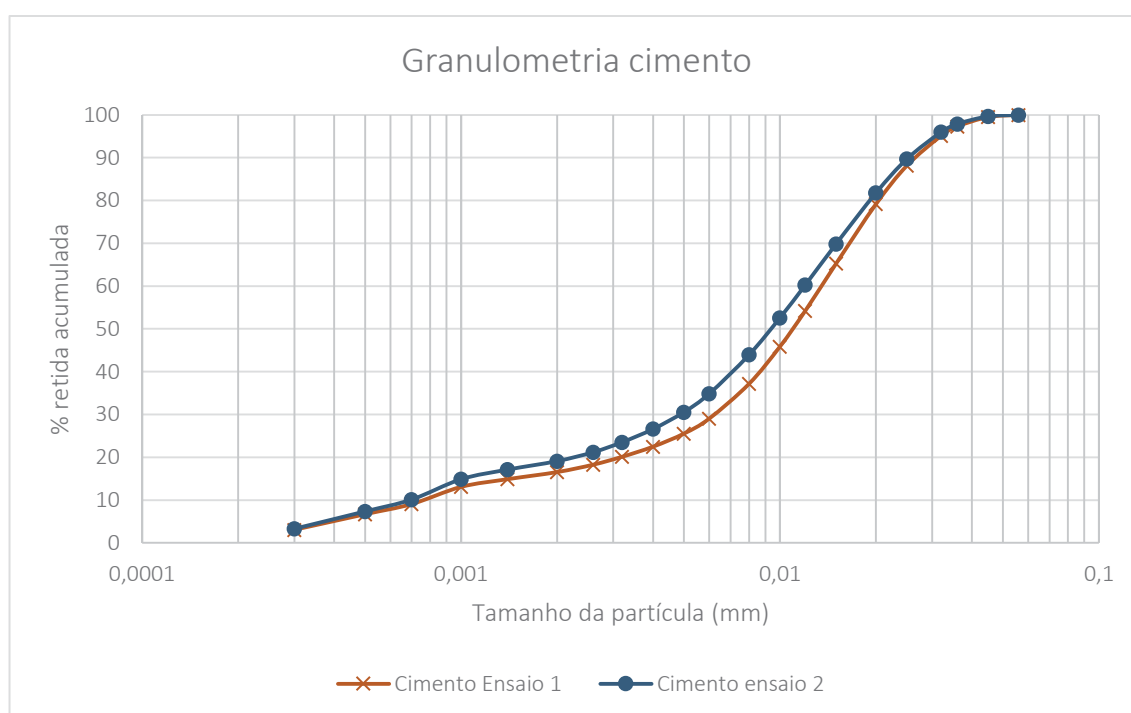
Eixo 3						
Autores	Título	Periódico	Fator de impacto (FI)	N° citações	Ano	InOrdinatio
Santos, A., Veiga, M., Santos Silva, A., de Brito, J. and Álvarez, J.	Evolution of the microstructure of lime based mortars and influence on the	Construction and Building Materials	4685	16	2018	28,685
John, V., Damineli, B., Quattrone, M. and Pileggi, R.	Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and	Cement and Concrete Research	5618	15	2018	28,618
Bicer, A.	Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of	Thermal Science and Engineering Progress	1094	19	2018	28,094
Pelisser, F., Vieira, A. and Bernardin, A.	Efficient self-compacting concrete with low	Journal of Cleaner Production	6395	12	2018	26,395
Li, L., Wang, Y., Tan, Y., Kwan, A. and Li, L.	Adding granite dust as paste replacement to improve durability and	Powder Technology	3413	13	2018	24,413
Aïssoun, B., Khayat, K. and Gallias, J.-L.	Variations of sorptivity with rheological properties of concrete	Construction and Building Materials	4685	13	2016	23,685
Shanahan, N., Tran, V., Williams, A. and Zayed, A.	Effect of SCM combinations on paste rheology and its	Construction and Building Materials	4685	12	2016	22,685
Wetzel, A. and Middendorf, B.	Influence of silica fume on properties of fresh and hardened ultra-high performance concrete	Cement and Concrete Composites	5172	6	2019	20,172
Nguyen, H.-A., Chang, T.-P., Shih, J.-Y. and Suryadi Djayaprabha,	Enhancement of low-cement self-compacting concrete with dolomite	Construction and Building Materials	4685	7	2018	19,685
Hendi, A., Behravan, A., Mostofinejad, D., Sedaghatdoost, A. and Amini, M.	A step towards green concrete: Effect of waste silica powder usage under HCl attack	Journal of Cleaner Production	6395	4	2018	18,395

Eixo 3						
Autores	Título	Periódico	Fator de impacto (FI)	N° citações	Ano	InOrdinatio
Farokhzad, R., Mahdikhani, M., Bagheri, A. and	Representing a logical grading zone for self-consolidating concrete	Construction and Building Materials	4685	7	2016	17,685
Yang, R., Yu, R., Shui, Z., Gao, X., Xiao, X., Zhang, X., Wang, Y.	Low carbon design of an Ultra-High Performance Concrete (UHPC)	Journal of Cleaner Production	6395	2	2019	17,395
de Matos, P., Sakata, R. and Prudêncio, L.	Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes	Construction and Building Materials	4685	3	2019	16,685
Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Jia, H., Zeng, R., Wu, Y. and Lao, L.	A quantitative study on physical and chemical effects of limestone powder on properties of	Construction and Building Materials	4685	3	2019	16,685
Chabi, E., Lecomte, A., Adjovi, E., Dieye, A. and Merlin, A.	Mix design method for plant aggregates concrete: Example of the	Construction and Building Materials	4685	1	2018	13,685
Singh, M., Srivastava, A. and Bhunia, D.	Analytical and experimental investigations on using	Journal of Materials in Civil Engineering	1984	2	2019	12,984
Knop, Y. and Peled, A.	Sustainable Blended Cements-Influences of Packing Density on	MATERIALS	2728	2	2018	12,728
Al-Mansour, A., Chow, C., Feo, L., Penna, R. and Lau, D.	Green concrete: By-products utilization and advanced approaches	Sustainability (Switzerland)	2075	0	2019	11,075
Zhang, H.-P., Bai, P.-K., Wang, J.-H. and Dong, Y.-L.	Preparation of Rapid-Hardening, Early-Strengthening, High-Density Composite	Arabian Journal for Science and Engineering	1518	0	2019	10,518

APÊNDICE 3 – CARACTERIZAÇÃO CIMENTO E ADIÇÕES

A seguir são apresentados os dois ensaios de granulometria a laser realizados para o cimento. Para o desenvolvimento da pesquisa optou-se por utilizar a curva referente ao segundo ensaio.

Figura 50 - Repetição granulometria a laser cimento



Fonte: própria

Na Tabela 19 é apresentada a composição granulométrica do cimento, cal, cinza volante e filer calcário.

Tabela 20 - Granulometria cimento, cal, cinza volante e filer calcário

Composição granulométrica					
% retida acumulada					
micrômetro	Abertura	% retida acumulada			
	mm	Cimento	Cal	Cinza volante	Filer calcário
400	0,4	100	100	100	100
315	0,315	100	100	99,98	100
280	0,28	100	100	99,65	100
224	0,224	100	100	97,58	100
180	0,18	100	100	93,46	100
140	0,14	100	100	86,62	99,59
112	0,112	100	99,52	78,53	97,34
90	0,09	100	97,12	69,68	92,83
63	0,063	100	87,99	55,95	81,88
56	0,056	100	83,83	51,82	77,65
45	0,045	99,5	75,31	44,9	69,91
36	0,036	97,3	66,49	38,86	62,53
32	0,032	95,11	61,84	36,01	58,87
25	0,025	88,14	52,19	30,63	51,77
20	0,02	79,16	44,06	26,36	46,24
15	0,015	65,27	35	21,58	40,32
12	0,012	54,21	29,16	18,35	36,44
10	0,01	45,87	25,05	15,95	33,57
8	0,008	37,17	20,68	13,24	30,29
6	0,006	29,04	15,83	10,14	26,34
5	0,005	25,54	13,17	8,47	23,98
4	0,004	22,48	10,34	6,76	21,15
3,2	0,0032	20,12	7,98	5,39	18,25
2,6	0,0026	18,28	6,19	4,36	15,47
2	0,002	16,54	4,49	3,39	12,1
1,4	0,0014	14,88	3,16	2,63	8,46
1	0,001	13,08	2,2	2,51	6,19
0,7	0,0007	9,07	1,5	1,87	4,42
0,5	0,0005	6,69	1	1,49	3,12
0,3	0,0003	3,05	0,38	0,75	1,31

APÊNDICE 4 – CARACTERIZAÇÃO AGREGADOS

A seguir são apresentados os resultados detalhados da granulometria dos agregados.

Tabela 21 - Granulometria agregados

Composição granulométrica (ABNT NM 248)				
Média % retida acumulada (todos agregados)				
Peneira		Porcentagem retida acumulada (%)		
Nº	mm	Brita	Pedrisco	Areia
3"	75	0,000	0,000	0,000
2.1/2"	63	0,000	0,000	0,000
2"	50	0,000	0,000	0,000
1.1/2"	37,5	0,000	0,000	0,000
1.1/4"	31,5	0,000	0,000	0,000
1"	25	0,000	0,000	0,000
3/4"	19	0,305	0,000	0,000
1/2"	12,5	45,671	0,170	0,000
3/8"	9,5	85,033	2,849	0,000
1/4"	6,3	98,712	45,250	0,256
Nº 4	4,75	99,323	75,168	1,510
Nº 8	2,36	99,465	96,817	13,010
Nº 16	1,18	99,496	98,177	31,565
Nº 30	0,6	99,516	98,630	49,889
Nº 50	0,3	99,530	98,845	73,802
Nº 100	0,15	99,547	99,041	94,608
Fundo	-	99,683	99,967	99,984

APÊNDICE 5 – CÓDIGO EM PYTHON

```

# Importando bibliotecas
import pandas as pd
import numpy
import random

"""### Importante os CSVs"""

dt =
pd.read_csv('https://www.dropbox.com/s/oraamt2nev97k1/Dados_CSV_dosagem.csv?dl=1', sep=';')

dt[0:3]

type(dt['dimetro(mm)'].values)

# Pode mudar o expoente aqui:
q = 0.25

dimetro      = dt['dimetro(mm)'].values
areianatural = dt['Areia Natural'].values
brita0natural = dt['Brita #0 Natural'].values
brita1natural = dt['Brita #1 Natural'].values
cimento      = dt['Cimento'].values
cv           = dt['Cinza Volante'].values
filler       = dt['Filler'].values
cal          = dt['Cal'].values

"""### Mistura de Agregados Reciclados e Cimento"""

numpy.random.uniform(0,1.0,size=5)

#Criação da lista vazia que irá receber os valores do looping
l_p_ci = []
l_p_arNAT = []
l_p_br0NAT = []
l_p_br1NAT = []
l_p_cv = []
l_p_filler = []

#Massa específica (ME)
ME_cimento = 3.14
ME_areia_natural = 2.51

```

```

ME_brita0_natural = 2.63
ME_brita1_natural = 2.7
ME_cinza_volante = 2.05
ME_filler = 2.77

n = 0
while n < 1_000_000:
    proporcoes = numpy.random.uniform(0,1.0,size=5)

    if proporcoes.sum()<1.0:
        #n += 1
        proporcoes_lista = list(proporcoes)
        proporcoes_lista.append(1-proporcoes.sum())
        prop = numpy.array(proporcoes_lista)

        #Condições relacionada às proporções em massa
        if (proporcoes_lista[0] * ME_cimento) >= ((proporcoes_lista[4]
* ME_cinza_volante) + (proporcoes_lista[5] * ME_filler)) and
(proporcoes_lista[5] * ME_filler) <= (proporcoes_lista[4] *
ME_cinza_volante):
            n += 1

            # cimento
            l_p_ci.append(proporcoes_lista[0])

            # areia Natural
            l_p_arNAT.append(proporcoes_lista[1])

            # brita 0 Natural
            l_p_br0NAT.append(proporcoes_lista[2])

            # brita 1 Natural
            l_p_br1NAT.append(proporcoes_lista[3])

            # Cinza Volante
            l_p_cv.append(proporcoes_lista[4])

            # Filler
            l_p_filler.append(proporcoes_lista[5])

"""### Simulação Monte Carlo - Mistura de 5 materiais"""

l_soma_rss = []

for n in range(1):

```

```

soma_rss_menor = 100.0

for k in range(1_000_000):

    conjunto = ((cimento*l_p_ci[k]) + (areianatural*l_p_arNAT[k]) +
(brita0natural*l_p_br0NAT[k]) + (brita1natural*l_p_br1NAT[k]) +
                (cv*l_p_cv[k]) + (filler*l_p_filler[k]))

    alfred = 100*(((diametro**q)-
(numpy.min(diametro)**q)/((numpy.max(diametro)**q)-
(numpy.min(diametro)**q))))

    rss = ((conjunto/100)-(alfred/100))**2

    soma_rss = numpy.sum(rss)

    l_soma_rss.append(soma_rss)

posicao = numpy.where(numpy.array(l_soma_rss) == numpy.min(l_soma_rss))
#Define a posição do menor rss
pos = posicao[0][0]

print("O menor somatório RSS é: ", l_soma_rss[pos])
print(" ")
print("Proporção cimento: ", l_p_ci[pos])
print("Proporção areia natural: ", l_p_arNAT[pos])
print("Proporção brita 0 natural: ", l_p_br0NAT[pos])
print("Proporção brita 1 natural: ", l_p_br1NAT[pos])
print("Proporção cinza volante: ", l_p_cv[pos])
print("Proporção filler: ", l_p_filler[pos])

```


APÊNDICE 6 – RESULTADOS BRUTOS ESTADO ENDURECIDO

Tabela 22 - Dados brutos resistência à compressão

Compressão 91 dias							
C1							
C1-29		C1-16		C1-31		C1-02	
Altura (mm)	94	Altura (mm)	95	Altura (mm)	92	Altura (mm)	92
Lado 1 (mm)	95	Lado 1 (mm)	95	Lado 1 (mm)	94	Lado 1 (mm)	96
Lado 2 (mm)	97	Lado 2 (mm)	97	Lado 2 (mm)	96	Lado 2 (mm)	95
Carga (KN)	257,6	Carga (KN)	365,36	Carga (KN)	355,04	Carga (KN)	366
Área (mm ²)	9215	Área (mm ²)	9215	Área (mm ²)	9024	Área (mm ²)	9120
Tensão (MPa)	27,95	Tensão (MPa)	39,65	Tensão (MPa)	39,34	Tensão (MPa)	40,13
Compressão 91 dias							
C1_F							
C1_F-20		C1_F-35		C1_F-24		C1_F-31	
Altura (mm)	95	Altura (mm)	94	Altura (mm)	94	Altura (mm)	93
Lado 1 (mm)	96	Lado 1 (mm)	95	Lado 1 (mm)	97	Lado 1 (mm)	97
Lado 2 (mm)	95	Lado 2 (mm)	97	Lado 2 (mm)	96	Lado 2 (mm)	96
Carga (KN)	224,32	Carga (KN)	328,16	Carga (KN)	216,88	Carga (KN)	239,36
Área (mm ²)	9120	Área (mm ²)	9215	Área (mm ²)	9312	Área (mm ²)	9312
Tensão (MPa)	24,60	Tensão (MPa)	35,61	Tensão (MPa)	23,29	Tensão (MPa)	25,70
Compressão 91 dias							
C1_A							
C1_A-20		C1_A-1		C1_A-31		C1_A-26	
Altura (mm)	93	Altura (mm)	93	Altura (mm)	95	Altura (mm)	94
Lado 1 (mm)	97	Lado 1 (mm)	97	Lado 1 (mm)	96	Lado 1 (mm)	96
Lado 2 (mm)	98	Lado 2 (mm)	95	Lado 2 (mm)	95	Lado 2 (mm)	96
Carga (KN)	276,64	Carga (KN)	383,2	Carga (KN)	199,12	Carga (KN)	332,24
Área (mm ²)	9506	Área (mm ²)	9215	Área (mm ²)	9120	Área (mm ²)	9216
Tensão (MPa)	29,10	Tensão (MPa)	41,58	Tensão (MPa)	21,83	Tensão (MPa)	36,05
Compressão 91 dias							
C2							
C2-26		C2-22		C2-38		C2-15	
Altura (mm)	91	Altura (mm)	92	Altura (mm)	93	Altura (mm)	92
Lado 1 (mm)	97	Lado 1 (mm)	94	Lado 1 (mm)	97	Lado 1 (mm)	96
Lado 2 (mm)	93	Lado 2 (mm)	97	Lado 2 (mm)	96	Lado 2 (mm)	93
Carga (KN)	228,16	Carga (KN)	349,6	Carga (KN)	354,4	Carga (KN)	253,2
Área (mm ²)	9021	Área (mm ²)	9118	Área (mm ²)	9312	Área (mm ²)	8928
Tensão (MPa)	25,29	Tensão (MPa)	38,34	Tensão (MPa)	38,06	Tensão (MPa)	28,36
Compressão 91 dias							
C2_F							
C2_F-10		C2_F-34		C2_F-28		C2_F-9	
Altura (mm)	94	Altura (mm)	89	Altura (mm)	95	Altura (mm)	91
Lado 1 (mm)	96	Lado 1 (mm)	95	Lado 1 (mm)	96	Lado 1 (mm)	98
Lado 2 (mm)	97	Lado 2 (mm)	97	Lado 2 (mm)	98	Lado 2 (mm)	94
Carga (KN)	280,08	Carga (KN)	350,96	Carga (KN)	276,4	Carga (KN)	255,12
Área (mm ²)	9312	Área (mm ²)	9215	Área (mm ²)	9408	Área (mm ²)	9212
Tensão (MPa)	30,08	Tensão (MPa)	38,09	Tensão (MPa)	29,38	Tensão (MPa)	27,69
Compressão 91 dias							
C2_A							
C2_A-27		C2_A-11		C2_A-40		C2_A-38	
Altura (mm)	94	Altura (mm)	95	Altura (mm)	94	Altura (mm)	94
Lado 1 (mm)	97	Lado 1 (mm)	99	Lado 1 (mm)	98	Lado 1 (mm)	96
Lado 2 (mm)	96	Lado 2 (mm)	96	Lado 2 (mm)	93	Lado 2 (mm)	95
Carga (KN)	406,72	Carga (KN)	519,68	Carga (KN)	446,72	Carga (KN)	369,2
Área (mm ²)	9312	Área (mm ²)	9504	Área (mm ²)	9114	Área (mm ²)	9120
Tensão (MPa)	43,68	Tensão (MPa)	54,68	Tensão (MPa)	49,01	Tensão (MPa)	40,48

Tabela 23 - Dados brutos capilaridade

Capilaridade 91 dias									
C1									
Sazonamento	C1-04		Δ	C1-05		Δ	C1-09		Δ
	Pesagem 1			Pesagem 1			Pesagem 1		
	Pesagem 2	2384,66		Pesagem 2	2389,24		Pesagem 2	2370,19	
	Pesagem 3	2384,22		Pesagem 3	2388,61		Pesagem 3	2369,63	
	Diferença de massa	-0,02%		Diferença de massa	-0,03%		Diferença de massa	-0,02%	
Ensaio	Lado 1 (cm)	9,65	Lado 1 (cm)	9,55	Lado 1 (cm)	9,1			
	Lado 2 (cm)	9,7	Lado 2 (cm)	9,2	Lado 2 (cm)	9,65			
	Área seção transversal (cm ²)	93,605	Área seção transversal (cm ²)	87,8,6	Área seção transversal (cm ²)	87,815			
	Massa seca após resfriamento(g)	2385,87	Massa seca após resfriamento(g)	2390,56	Massa seca após resfriamento(g)	2371,97			
	Massa saturada 3h (g)	2391,02	5,15	Massa saturada 3h (g)	2394,92	4,36	Massa saturada 3h (g)	2375,94	3,97
	Massa saturada 6h (g)	2392,96	7,09	Massa saturada 6h (g)	2396,4	5,84	Massa saturada 6h (g)	2377,44	5,47
	Massa saturada 24h (g)	2399,59	13,72	Massa saturada 24h (g)	2402,12	11,56	Massa saturada 24h (g)	2383,59	11,62
	Massa saturada 48h (g)	2403,2	17,33	Massa saturada 48h (g)	2405,73	15,17	Massa saturada 48h (g)	2387,4	15,43
	Massa saturada 72h (g)	2405	19,13	Massa saturada 72h (g)	2407,74	17,18	Massa saturada 72h (g)	2389,21	17,24
	Altura da ascensão capilar máxima (cm)	8		Altura da ascensão capilar máxima (cm)	8,8		Altura da ascensão capilar máxima (cm)	8,45	

Capilaridade 91 dias									
C1_F									
Sazonamento	C1_F-12		Δ	C1_F-17		Δ	C1_F-34		Δ
	Pesagem 1			Pesagem 1			Pesagem 1		
	Pesagem 2	2390,45		Pesagem 2	2194,69		Pesagem 2	2366,72	
	Pesagem 3	2389,9		Pesagem 3	2194,12		Pesagem 3	2366,29	
	Diferença de massa	-0,02%		Diferença de massa	-0,03%		Diferença de massa	-0,02%	
Ensaio	Lado 1 (cm)	9,2	Lado 1 (cm)	9,7	Lado 1 (cm)	9,7			
	Lado 2 (cm)	9,7	Lado 2 (cm)	8,5	Lado 2 (cm)	9,25			
	Área seção transversal (cm ²)	89,24	Área seção transversal (cm ²)	82,45	Área seção transversal (cm ²)	89,725			
	Massa seca após resfriamento(g)	2390,84	Massa seca após resfriamento(g)	2194,94	Massa seca após resfriamento(g)	2367,02			
	Massa saturada 3h (g)	2393,28	2,44	Massa saturada 3h (g)	2195,75	0,81	Massa saturada 3h (g)	2368,5	1,48
	Massa saturada 6h (g)	2394,12	3,28	Massa saturada 6h (g)	2196,08	1,14	Massa saturada 6h (g)	2368,86	1,84
	Massa saturada 24h (g)	2397,34	6,5	Massa saturada 24h (g)	2197,39	2,45	Massa saturada 24h (g)	2370,93	3,91
	Massa saturada 48h (g)	2399,78	8,94	Massa saturada 48h (g)	2198,42	3,48	Massa saturada 48h (g)	2372,1	5,08
	Massa saturada 72h (g)	2401,11	10,27	Massa saturada 72h (g)	2199,02	4,08	Massa saturada 72h (g)	2372,76	5,74
	Altura da ascensão capilar máxima (cm)	8,95		Altura da ascensão capilar máxima (cm)	8		Altura da ascensão capilar máxima (cm)	8,65	

Capilaridade 91 dias									
C1_A									
Sazonamento	C1_A-02		Δ	C1_A-30		Δ	C1_A-36		
	Pesagem 1			Pesagem 1			Pesagem 1		
	Pesagem 2	2277,2		Pesagem 2	2276,36		Pesagem 2	2265,85	
	Pesagem 3	2276,74		Pesagem 3	2275,51		Pesagem 3	2265,49	
Diferença de massa		-0,02%	Diferença de massa		-0,04%	Diferença de massa		-0,02%	
Ensaio	Lado 1 (cm)	9,7	Lado 1 (cm)	9,1	Lado 1 (cm)	9,6			
	Lado 2 (cm)	9,4	Lado 2 (cm)	9,2	Lado 2 (cm)	9,3			
	Área seção transversal (cm ²)	91,18	Área seção transversal (cm ²)	83,72	Área seção transversal (cm ²)	89,28			
	Massa seca após resfriamento(g)	2278,76	Massa seca após resfriamento(g)	2278,54	Massa seca após resfriamento(g)	2268,32			
	Massa saturada 3h (g)	2286,87	8,11	Massa saturada 3h (g)	2286,26	7,72	Massa saturada 3h (g)	2275,55	7,23
	Massa saturada 6h (g)	2289,57	10,81	Massa saturada 6h (g)	2288,75	10,21	Massa saturada 6h (g)	2273,95	5,63
	Massa saturada 24h (g)	2297,9	19,14	Massa saturada 24h (g)	2296,43	17,89	Massa saturada 24h (g)	2279,16	10,84
	Massa saturada 48h (g)	2303,44	24,68	Massa saturada 48h (g)	2301,25	22,71	Massa saturada 48h (g)	2282,37	14,05
	Massa saturada 72h (g)	2306,3	27,54	Massa saturada 72h (g)	2303,9	25,36	Massa saturada 72h (g)	2284,24	15,92
	Altura da ascensão capilar máxima (cm)	8,8	Altura da ascensão capilar máxima (cm)	7,45	Altura da ascensão capilar máxima (cm)	8,45			

Capilaridade 91 dias									
C2									
Sazonamento	C2-13		Δ	C2-10		Δ	C2-20		
	Pesagem 1	2315,36		Pesagem 1	2500,4		Pesagem 1	2361,91	
	Pesagem 2	2292,63		Pesagem 2	2471,19		Pesagem 2	2340,41	
	Pesagem 3	2291,77		Pesagem 3	2470,49		Pesagem 3	2339,76	
Diferença de massa		-0,04%	Diferença de massa		-0,03%	Diferença de massa		-0,03%	
Ensaio	Lado 1 (cm)	9,1	Lado 1 (cm)	9,3	Lado 1 (cm)	9,2			
	Lado 2 (cm)	9,7	Lado 2 (cm)	9,7	Lado 2 (cm)	9,6			
	Área seção transversal (cm ²)	88,27	Área seção transversal (cm ²)	90,21	Área seção transversal (cm ²)	88,32			
	Massa seca após resfriamento(g)	2293,39	Massa seca após resfriamento(g)	2472,24	Massa seca após resfriamento(g)	2341,45			
	Massa saturada 3h (g)	2300,26	6,87	Massa saturada 3h (g)	2474,91	2,67	Massa saturada 3h (g)	2345,6	4,15
	Massa saturada 6h (g)	2302,38	8,99	Massa saturada 6h (g)	2476,04	3,8	Massa saturada 6h (g)	2346,99	5,54
	Massa saturada 24h (g)	2308,22	14,83	Massa saturada 24h (g)	2480	7,76	Massa saturada 24h (g)	2351,5	10,05
	Massa saturada 48h (g)	2310,76	17,37	Massa saturada 48h (g)	2482,27	10,03	Massa saturada 48h (g)	2353,71	12,26
	Massa saturada 72h (g)	2312,25	18,86	Massa saturada 72h (g)	2483,63	11,39	Massa saturada 72h (g)	2355,1	13,65
	Altura da ascensão capilar máxima (cm)	8,45	Altura da ascensão capilar máxima (cm)	9,6	Altura da ascensão capilar máxima (cm)	9,05			

Capilaridade 91 dias									
C2_F									
Sazonamento	C2_F-17		Δ	C2_F-30		Δ	C2_F-11		
	Pesagem 1	2367,66		Pesagem 1	2475,86		Pesagem 1	2489,36	
	Pesagem 2	2339,12		Pesagem 2	2448,53		Pesagem 2	2464,26	
	Pesagem 3	2338,53		Pesagem 3	2447,59		Pesagem 3	2463,39	
Diferença de massa		-0,03%	Diferença de massa		-0,04%	Diferença de massa		-0,04%	
Ensaio	Lado 1 (cm)	9,3	Lado 1 (cm)	9,6	Lado 1 (cm)	9,7			
	Lado 2 (cm)	9,7	Lado 2 (cm)	9,6	Lado 2 (cm)	9,5			
	Área seção transversal (cm ²)	90,21	Área seção transversal (cm ²)	92,16	Área seção transversal (cm ²)	92,15			
	Massa seca após resfriamento(g)	2339,67	Massa seca após resfriamento(g)	2448,5	Massa seca após resfriamento(g)	2464,35			
	Massa saturada 3h (g)	2345,66	5,99	Massa saturada 3h (g)	2451,39	2,89	Massa saturada 3h (g)	2471,2	6,85
	Massa saturada 6h (g)	2347,53	7,86	Massa saturada 6h (g)	2452,41	3,91	Massa saturada 6h (g)	2473,22	8,87
	Massa saturada 24h (g)	2352,4	12,73	Massa saturada 24h (g)	2455,76	7,26	Massa saturada 24h (g)	2478,21	13,86
	Massa saturada 48h (g)	2354,62	14,95	Massa saturada 48h (g)	2457,51	9,01	Massa saturada 48h (g)	2480,31	15,96
	Massa saturada 72h (g)	2356,18	16,51	Massa saturada 72h (g)	2458,53	10,03	Massa saturada 72h (g)	2481,39	17,04
	Altura da ascensão capilar máxima (cm)	8	Altura da ascensão capilar máxima (cm)	9,1	Altura da ascensão capilar máxima (cm)	9,15			

Capilaridade 91 dias									
C2_A									
Sazonamento	C2_A-36		Δ	C2_A-24		Δ	C2_A-04		Δ
	Pesagem 1	2250,67		Pesagem 1	2282,72		Pesagem 1	2178,15	
	Pesagem 2	2212,36		Pesagem 2	2252,08		Pesagem 2	2143,43	
	Pesagem 3	2211,24		Pesagem 3	2251,24		Pesagem 3	2142,51	
	Diferença de massa	-0,05%		Diferença de massa	-0,04%		Diferença de massa	-0,04%	
Ensaio	Lado 1 (cm)	9,6		Lado 1 (cm)	9,4		Lado 1 (cm)	9,4	
	Lado 2 (cm)	9,3		Lado 2 (cm)	9,7		Lado 2 (cm)	9,6	
	Área seção transversal (cm ²)	89,28		Área seção transversal (cm ²)	91,18		Área seção transversal (cm ²)	90,24	
	Massa seca após resfriamento(g)	2212,86		Massa seca após resfriamento(g)	2252,42		Massa seca após resfriamento(g)	2143,86	
	Massa saturada 3h (g)	2219,65	6,79	Massa saturada 3h (g)	2254,06	1,64	Massa saturada 3h (g)	2153,97	10,11
	Massa saturada 6h (g)	2221,88	9,02	Massa saturada 6h (g)	2254,69	2,27	Massa saturada 6h (g)	2156,99	13,13
	Massa saturada 24h (g)	2226,7	13,84	Massa saturada 24h (g)	2257,86	5,44	Massa saturada 24h (g)	2163,75	19,89
	Massa saturada 48h (g)	2228,83	15,97	Massa saturada 48h (g)	2259,46	7,04	Massa saturada 48h (g)	2166,7	22,84
	Massa saturada 72h (g)	2230,37	17,51	Massa saturada 72h (g)	2260,5	8,08	Massa saturada 72h (g)	2168,34	24,48
	Altura da ascensão capilar máxima (cm)	8,55		Altura da ascensão capilar máxima (cm)	8,2		Altura da ascensão capilar máxima (cm)	7,85	

Tabela 24 - Dados brutos imersão

Imersão 91 dias						
C1						
Sazonamento	C1-11		C1-17		C1-13	
	Pesagem 1	2376,13	Pesagem 1	2358,5	Pesagem 1	2350,28
	Pesagem 2	2375,57	Pesagem 2	2358,02	Pesagem 2	2349,89
	Diferença de massa	-0,02%	Diferença de massa	-0,02%	Diferença de massa	0%
Ensaio	Massa seca após resfriamento(g)	2376,69	Massa seca após resfriamento(g)	2360,39	Massa seca após resfriamento(g)	2352,8
	Massa saturada (g)	2449,33	Massa saturada (g)	2423,15	Massa saturada (g)	2430,04
	Absorção	0,03056	Absorção	0,02659	Absorção	0,03283
Imersão 91 dias						
C1_F						
Sazonamento	C1_F-06		C1_F-19		C1_F-30	
	Pesagem 1	2345,5	Pesagem 1	2362,05	Pesagem 1	2399,78
	Pesagem 2	2341,99	Pesagem 2	2361,65	Pesagem 2	2399,28
	Diferença de massa	-0,15%	Diferença de massa	-0,02%	Diferença de massa	-0,02%
Ensaio	Massa seca após resfriamento(g)	2343,17	Massa seca após resfriamento(g)	2362,69	Massa seca após resfriamento(g)	2399,93
	Massa saturada (g)	2386,26	Massa saturada (g)	2403,4	Massa saturada (g)	2420,94
	Absorção	0,01839	Absorção	0,01723	Absorção	0,00875
Imersão 91 dias						
C1_A						
Sazonamento	C1_A-23		C1_A-34		C1_A-24	
	Pesagem 1	2157,53	Pesagem 1	2297,82	Pesagem 1	2112,73
	Pesagem 2	2157,08	Pesagem 2	2297,56	Pesagem 2	2112,14
	Diferença de massa	-0,02%	Diferença de massa	-0,01%	Diferença de massa	-0,03%
Ensaio	Massa seca após resfriamento(g)	2167,37	Massa seca após resfriamento(g)	2301,09	Massa seca após resfriamento(g)	2114,53
	Massa saturada (g)	2252,25	Massa saturada (g)	2396,52	Massa saturada (g)	2209,89
	Absorção	0,03916	Absorção	0,04147	Absorção	0,0451
Imersão 91 dias						
C2						
Sazonamento	C2-04		C2-05		C2-16	
	Pesagem 1	2476,9	Pesagem 1	2437,69	Pesagem 1	2248,73
	Pesagem 2	2476,48	Pesagem 2	2437,31	Pesagem 2	2248,61
	Diferença de massa	-0,02%	Diferença de massa	-0,02%	Diferença de massa	-0,01%
Ensaio	Massa seca após resfriamento(g)	2478,88	Massa seca após resfriamento(g)	2440,02	Massa seca após resfriamento(g)	2250,86
	Massa saturada (g)	2533,5	Massa saturada (g)	2490,88	Massa saturada (g)	2296,22
	Absorção	0,02203	Absorção	0,02084	Absorção	0,02015
Imersão 91 dias						
C2_F						
Sazonamento	C2_F-01		C2_F-27		C2_F-39	
	Pesagem 1	2359,95	Pesagem 1	2406,25	Pesagem 1	2327,04
	Pesagem 2	2359,8	Pesagem 2	2405,66	Pesagem 2	2326,52
	Diferença de massa	-0,01%	Diferença de massa	-0,02%	Diferença de massa	-0,02%
Ensaio	Massa seca após resfriamento(g)	2360,75	Massa seca após resfriamento(g)	2407,06	Massa seca após resfriamento(g)	2327,65
	Massa saturada (g)	2427,05	Massa saturada (g)	2470,06	Massa saturada (g)	2382,09
	Absorção	0,02808	Absorção	0,02617	Absorção	0,02339
Imersão 91 dias						
C2_A						
Sazonamento	C2_A-16		C2_A-21		C2_A-30	
	Pesagem 1	2354,95	Pesagem 1	2134,99	Pesagem 1	2176,51
	Pesagem 2	2354,16	Pesagem 2	2134,43	Pesagem 2	2175,52
	Diferença de massa	-0,03%	Diferença de massa	-0,03%	Diferença de massa	-0,05%
Ensaio	Massa seca após resfriamento(g)	2355,82	Massa seca após resfriamento(g)	2136,15	Massa seca após resfriamento(g)	2177,82
	Massa saturada (g)	2428,73	Massa saturada (g)	2193,96	Massa saturada (g)	2290,52
	Absorção	0,03095	Absorção	0,02706	Absorção	0,05175

Tabela 25 - Dados brutos carbonatação

Carbonatação 100d				
C1_A				
CP - 14				
	Lado 1	Lado 2	Lado 3	Lado 4
Medida 1	4,12	3,81	3,17	3,11
Medida 2	4,41	2,86	2,67	3,1
Medida 3	2,9	2,92	2,77	2,99
Medida 4	3,33	2,93	3,51	3,24
CP - 33				
	Lado 1	Lado 2	Lado 3	Lado 4
Medida 1	3,2	5,33	0	0
Medida 2	2,93	3,65	0	0
Medida 3	2,51	3,73	0	0
Medida 4	3,14	5,22	0	0
CP - 25				
	Lado 1	Lado 2	Lado 3	Lado 4
Medida 1	3,15	3,75	3,61	3,95
Medida 2	3,14	4,1	4,69	5,6
Medida 3	2,92	5,13	3,63	4,41
Medida 4	3,64	3,09	6,86	6,25

Carbonatação 100d				
C2_A				
CP - 18				
	Lado 1	Lado 2	Lado 3	Lado 4
Medida 1	2,5	5,35	4,9	4,48
Medida 2	4,45	4,56	5,26	4,63
Medida 3	3,9	4,9	4,44	5,15
Medida 4	3,62	5,28	4,32	4,54
CP - 22				
	Lado 1	Lado 2	Lado 3	Lado 4
Medida 1	6,62	15,42	4,38	4,22
Medida 2	4,16	4,26	10,08	8,83
Medida 3	4,19	3,51	5,55	5,8
Medida 4	4,83	4	5,78	5,01
CP - 32				
	Lado 1	Lado 2	Lado 3	Lado 4
Medida 1	4,96	5,61	4,26	4,49
Medida 2	4,51	5,16	4,08	3,88
Medida 3	3,86	4,31	4,08	2,95
Medida 4	3,73	3,11	3,56	4,85

Carbonatação 100d				
C2				
CP - 30				
	Lado 1	Lado 2	Lado 3	Lado 4
Medida 1	3,5	3,5	3,58	3,43
Medida 2	3,5	3,5	2,7	3,54
Medida 3	2,67	3,2	3,02	2,69
Medida 4	2,05	2,64	2,64	3,8
CP - 24				
	Lado 1	Lado 2	Lado 3	Lado 4
Medida 1	4,05	3,26	2,96	7,61
Medida 2	3,62	4,52	2,76	4,99
Medida 3	4,09	5,61	3,24	3,25
Medida 4	3,17	4,57	3,42	4,27
CP - 28				
	Lado 1	Lado 2	Lado 3	Lado 4
Medida 1	3,4	4,21	3,68	4,2
Medida 2	3,45	4,08	3,37	3,23
Medida 3	7,01	6,95	4,74	7,39
Medida 4	3,83	3,29	4,3	3,81

APÊNDICE 7 – ANÁLISE ESTATÍSTICA (ANOVA E TUKEY)

Compressão 91 dias C1, C1_F e C1_A						
Anova: fator único (GRUPO 1)				TUCKEY - nível de confiança 95%		
RESUMO				QMR	4,56	
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	n° de tratamentos	3
C1	3	119,124	39,708	0,158	n° de repetições	3
C1_F	3	73,591	24,530	1,460	graus de liberdade	6
C1_A	3	97,728	32,576	12,071	q (tabelado)	4,34
					dms	5,35
ANOVA				ANÁLISE: TODOS OS TRAÇOS SÃO ESTATISTICAMENTE DIFERENTES		
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupc	345,954	2	172,977	37,908	0,000	5,143
Dentro dos	27,378	6	4,563			
Total	373,332	8				
Análise: Estatisticamente diferentes						
Compressão 91 dias C2, C2_F e C2_A						
Anova: fator único (GRUPO 2)				TUCKEY - nível de confiança 95%		
RESUMO				QMR	13,64	
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	n° de tratamentos	3
C2	3	104,760	34,920	32,294	n° de repetições	3
C2_F	3	87,151	29,050	1,501	graus de liberdade	6
C2_A	3	139,038	46,346	7,123	q (tabelado)	4,34
					dms	9,25
ANOVA				ANÁLISE: C2 e C2_F são estatisticamente iguais		
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupc	464,138	2	232,069	17,015	0,003	5,143
Dentro dos	81,836	6	13,639			
Total	545,974	8				
Análise: Estatisticamente diferentes				C2 e C2_A são estatisticamente diferentes C2_F e C2_A são estatisticamente diferentes		

Compressão 91 dias Traços correspondentes															
Anova: fator único (C1 e C2)				Anova: fator único (C1_A e C2_A)											
RESUMO				RESUMO											
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>						
C1	3	119,1239	39,70798	0,157744	C1_A	3	98	32,57598	12,0712						
C2	3	104,7604	34,92013	32,29438	C2_A	3	139	46,34584	7,122832						
ANOVA				ANOVA											
<i>Fonte da</i>	<i>variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Fonte da</i>	<i>variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos		34,38538	1	34,38538	2,119145	0,219174	7,708647	Entre grupos		284,4134	1	284,4134	29,6356	0,005529	7,708647
Dentro dos grupos		64,90426	4	16,22606				Dentro dos grupos		38,38807	4	9,597017			
Total		99,28963	5					Total		322,8015	5				
Análise: Estatisticamente iguais				Análise: Estatisticamente diferentes											
Anova: fator único (C1_F e C2_F)															
RESUMO															
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>											
C2_F	3	87,15088	29,05029	1,500841											
C1_F	3	73,59134	24,53045	1,460228											
ANOVA															
<i>Fonte da</i>	<i>variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>								
Entre grupos		30,64355	1	30,64355	20,69762	0,010422	7,708647								
Dentro dos grupos		5,922139	4	1,480535											
Total		36,56569	5												
Análise: Estatisticamente diferentes															

Capilaridade 91 dias						
ANOVA GRUPO 2						
24H	C2	C2_F	C2_A			
	0,114	0,150	0,220			
	0,086	0,141	0,155			
	Média	0,100	0,146	0,188		
Anova: fator único (GRUPO 2)						
RESUMO						
	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
	C2	3	0,3678195	0,1226065	0,0017387	
	C2_F	2	0,2915221	0,1457611	4,317E-05	
	C2_A	3	0,4350924	0,1450308	0,0065349	
ANOVA						
<i>Fonte da varia:</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grup	0,0009682	2	0,0004841	0,1458976	0,867796	5,786135
Dentro dos:	0,0165905	5	0,0033181			
Total	0,0175587	7				
<i>Análise:</i>	Estatisticamente iguais					
48H	C2	C2_F	C2_A			
	0,139	0,173	0,253			
	0,111	0,166	0,179			
	Média	0,125	0,169	0,216		
Anova: fator único						
RESUMO						
	<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
	C2	2	0,2499984	0,1249992	0,0003817	
	C2_F	2	0,3389203	0,1694601	2,791E-05	
	C2_A	2	0,4319783	0,2159891	0,0027549	
ANOVA						
<i>Fonte da varia:</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grup	0,0082806	2	0,0041403	3,9251613	0,145384	9,552094
Dentro dos:	0,0031644	3	0,0010548			
Total	0,011445	5				
<i>Análise:</i>	Estatisticamente iguais					

72H	C2	C2_F	C2_A
	0,155	0,185	0,271
	0,126	0,183	0,196
Média	0,140	0,184	0,234

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
C2	2	0,2808126	0,1404063	0,0004002
C2_F	2	0,3679333	0,1839667	1,802E-06
C2_A	2	0,4674011	0,2337006	0,0028239

ANOVA

Fonte da variac	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,0087165	2	0,0043583	4,05307	0,14039	9,552094
Dentro dos	0,0032259	3	0,0010753			
Total	0,0119424	5				

Análise: **Estatisticamente iguais**

Capilaridade 91 dias						
Anova: fator único (C1 e C2)						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
C1	2	0,39186017	0,19593008	3,069E-07		
C2	2	0,28081258	0,14040629	0,00040018		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupo	0,00308289	1	0,00308289	15,3956656	0,05924029	18,512821
Dentro dos grupos	0,00040049	2	0,00020024			
Total	0,00348338	3				
Análise: Estatisticamente iguais						

Anova: fator único (C1_F e C2_F)						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
C1_F	2	0,11345779	0,05672889	0,00010496		
C2_F	2	0,3679333	0,18396665	1,8021E-06		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupo	0,01618945	1	0,01618945	303,276586	0,0032811	18,512821
Dentro dos grupos	0,00010676	2	5,3382E-05			
Total	0,01629621	3				
Análise: Estatisticamente diferentes						

Anova: fator único (C1_A e C2_A)						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
C1_A	2	0,6049544	0,3024772	3,8242E-07		
C2_A	2	0,46740115	0,23370057	0,00282391		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupo	0,00473022	1	0,00473022	3,34966451	0,20870689	18,512821
Dentro dos grupos	0,0028243	2	0,00141215			
Total	0,00755452	3				
Análise: Estatisticamente iguais						

Imersão 91 dias

ANOVA (GRUPO 2)

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
C2_A	3,000	0,087	0,029	0,000
C2_F	3,000	0,078	0,026	0,000
C2	3,000	0,063	0,021	0,000

ANOVA

Fonte da varia	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grup	0,000	2	0,000	14,246	0,005	5,143
Dentro do	0,000	6	0,000			

Total 0,000 8

Análise: Estatisticamente diferentes

TUCKEY (GRUPO 2)

QMR 0,000
 n° de trata 3
 n° de repe 3
 graus de lil 6
 q (tabelad 4,34
 dms 0,00

	C2	C2_F	C2_A
C2		0,005	0,008
C2_F	0,005		0,003
C2_A	0,008	0,003	

ANÁLISE: C2_F e C2_A são iguais

ANOVA (GRUPO 1)

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
C1_A	3	0,126	0,042	0,000
C1_F	3	0,053	0,018	0,000
C1	3	0,090	0,030	0,000

ANOVA

Fonte da varia	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grup	0,001	2	0,000	67,843	0,000	5,143
Dentro do	0,000	6	0,000			

Total 0,001 8

Análise: Estatisticamente diferentes

TUCKEY (GRUPO 1)

QMR 0,000
 n° de trata 3
 n° de repe 3
 graus de lil 6
 q (tabelad 4,34
 dms 0,01

	C1	C1_F	C1_A
C1		0,012	0,012
C1_F	0,012		0,024
C1_A	0,012	0,024	

ANÁLISE: TODOS OS TRAÇOS DO GRUPO 1 são diferentes

Imersão 91 dias

Anova: fator único (C1 E c2)

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
C1	3	0,089981	0,029994	9,98E-06
C2	3	0,063031	0,02101	9,06E-07

ANOVA

Fonte da varia	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grup	0,000121	1	0,000121	22,24435	0,009196	7,708647
Dentro do	2,18E-05	4	5,44E-06			
Total	0,000143	5				

Análise: Estatisticamente diferentes

Anova: fator único (C1_A e C2_A)

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
C1_A	3	0,125732	0,041911	8,95E-06
C2_A	3	0,087017	0,029006	3,78E-06

ANOVA

Fonte da varia	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grup	0,00025	1	0,00025	39,25954	0,00331	7,708647
Dentro do	2,55E-05	4	6,36E-06			
Total	0,000275	5				

Análise: Estatisticamente diferentes

Anova: fator único (C1_F e C2_F)

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
C1_F	3	0,05343	0,01781	3,36E-07
C2_F	3	0,077646	0,025882	5,58E-06

ANOVA

Fonte da varia	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grup	9,77E-05	1	9,77E-05	33,06059	0,004536	7,708647
Dentro do	1,18E-05	4	2,96E-06			
Total	0,00011	5				

Análise: Estatisticamente diferentes

