

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

TESE DE DOUTORADO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS METÁLICOS
NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL - CAA**

FERNANDO BATISTA PINTO

Itajubá, 2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

FERNANDO BATISTA PINTO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS METÁLICOS
NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL - CAA**

**Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: Projeto, Materiais e Processos

Orientadora: Profa. Dra. Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo

Coorientadora: Profa. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz

Itajubá, dezembro de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDO BATISTA PINTO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS METÁLICOS
NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL - CAA

Tese submetida ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para conferir ao autor o *Título de Doutor em Engenharia Mecânica*.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo (orientadora)

Profa. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz (coorientadora)

Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez

Profa. Dra. Luísa Andreia Gachet Barbosa

Profa. Dra. Regina Mambeli Barros

Prof. Dr. Vander Alkmin dos Santos Ribeiro

Itajubá

2019



QUADRO DEMONSTRATIVO DE APURAÇÃO

Defesa de Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica

Título do trabalho: "Análise da Influência da Adição de Resíduos Metálicos nas Propriedades do Concreto Auto Adensável - CAA"

Autor(a): Fernando Batista Pinto

JULGAMENTO (PRESENCIAL)

| Examinador(a) | Nome Completo | Conceito |
|--------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 ^a (a) | Vander Alkmin dos Santos Ribeiro | (A) <i>alk-ribeiro</i> |
| 2 ^a (a) | Luisa Andreia Gachet Barbosa | (A) <i>Luisa gachet</i> |
| 3 ^a (a) | Rosa Cristina Cecche Lintz | (A) <i>Rosa Cecche</i> |
| 4 ^a (a) | Regina Mambeli Barros | (A) <i>Regina Mambeli Barros</i> |
| 5 ^a (a) | Carlos Barreira Martinez | (A) <i>Carlos Barreira Martinez</i> |
| 6 ^a (a) | Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo | <i>mmmmelo</i> |

Conforme Art. 57, da Norma de Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal de Itajubá:

- (1) O trabalho será considerado aprovado se todos os examinadores atribuírem conceito "A";
 - (2) O trabalho será considerado reprovado se for atribuído pelo menos dois conceitos "R";
 - (3) O trabalho será considerado insuficiente (I) se for atribuído um único conceito "R".
- No caso (3), a Comissão Examinadora definirá como avaliar a nova versão da dissertação, que deverá ser submetida novamente num período de até 3 (três) meses.

Resultado Final: A

*Responder com "A", "R" ou "I".

Conceito Final: Aprovado

*Responder com "Aprovado", "Reprovado" ou "Insuficiente".

Observações:

Itajubá, 11 de dezembro de 2019.

Vander Alkmin dos Santos Ribeiro

1^a(a) Examinador(a) - FEPI

Dedicatória

*Aos meus saudosos pais Francisco e Antônia,
À minha querida esposa e companheira Robélia e
aos meus preciosos e amados filhos Juliana e Daniel,
que seguramente são:
meu princípio, meu presente e meu futuro.*

Agradecimentos

A gratidão é um dom, uma dádiva, mas acima de tudo um exercício de alma.

Agradeço primeiramente a Deus, que se revelou a mim na adolescência e nunca mais deixou de me fazer experimentar seu amor. Seu cuidado comigo é constante. Até mesmo nos momentos mais difíceis que vivi senti sua mão protetora. Meu Senhor e meu Deus, Eu O amo!

Aos meus queridos e saudosos pais Francisco Sales Pinto e Antônia Batista Pinto pelo exemplo de vida e de fé. Agradeço pelo exemplo de integridade e de dedicação à família, pelo exemplo de humildade e de temor a Deus. Daí de onde vocês estão continuam me abençoando.

Especial agradecimento à Robélia, minha tão querida esposa e eterna companheira. Mulher forte e íntegra, exemplo de vida familiar e profissional. Seu apoio foi fundamental para enfrentar esta longa jornada. Amo-te e estaremos juntos para sempre!

Aos meus filhos queridos, Juliana e Daniel, presentes de Deus! Obrigado pelo apoio e incentivo para enfrentar este desafio. Obrigado por acreditarem em mim.

Ao Prof. Fredmarck Gonçalves Leão, querido e admirado por todos que o conhecem, e que durante sua vida plantou muitas sementes que hoje dão frutos, meus agradecimentos pelo exemplo de humildade e pelas lições de vida dedicada a engenharia e à educação.

Quero agradecer a todos os meus irmãos, irmãs, sobrinhos e sobrinhas que torceram por mim e rezaram pelo sucesso deste trabalho. Amo cada um de vocês. “Família, é nós!”

À Profa. Dra. Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo, minha orientadora mas, antes de tudo uma amiga querida de tantos anos, pelo apoio, orientação e otimismo de sempre. “Tudo vai dar certo!”

À Profa. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz agradeço por aceitar participar da coorientação deste trabalho.

Aos doutores que gentilmente aceitaram participar da minha banca, pelas contribuições que deram para que este trabalho fosse aprimorado: Vander Alkmin dos Santos Ribeiro, Luísa Andreia Gachet Barbosa, Paulo Cesar Gonçalves e Carlos Barreira Martinez.

Aos queridos professores e amigos Gilbert Silva, Regina Mambeli Barros e Valquíria Claret dos Santos pelo apoio e incentivo neste trabalho.

Aos Professores Fernando Barca e Marcos Dias pelo acolhimento, gentileza e presteza em ajudar neste trabalho.

Aos queridos colegas Maria Auxiliadora de Barros e Demarcus Werdine pela parceria constante nos estudos e trabalhos de laboratório, sem vocês este trabalho não seria o mesmo. “Tamus juntos!”

Ao amigo Claudiney Sales pela ajuda imprescindível na revisão das referências e formatação deste trabalho. Agradeço ao meu ex-aluno e agora colega Lucas Ramon pelo apoio nas formatações de gráficos e tabelas.

Aos amigos e colegas que passaram pelo grupo de estudo do CAA agradeço pela troca de experiências.

Aos técnicos dos diversos laboratórios que nos auxiliaram nas tarefas (Fabiano, Osvaldinho, Jorge, João Vitor, Mateus). Deus lhes pague.

Às empresas, Mahle, Aditibras, Minas Tubo, BMW Mármore e Marmoraria Imperial que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Centro Universitário de Itajubá - FEPI, pelo apoio e incentivo na participação deste doutorado, pela cessão de uso do laboratório de materiais e ao prof. Luciano Barbosa pela ajuda nos ensaios.

À UNIFEI pela oportunidade de realizar este sonho e a Capes pela bolsa de estudo concedida.

Por fim, nestes quatro anos de trabalho, recebi muitos e valiosos apoios. Certamente não consegui registrar o nome de todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta tese, mas deixo aqui meus agradecimentos a todos. Deus lhes pague e vos abençoe sempre.

“Combati um bom combate e terminei a corrida”

1 Timóteo 6,12

“Tudo posso naquele que me conforta!”

Filipenses 4,13

Resumo

Este trabalho propôs analisar a influência nas propriedades mecânicas, reológicas e de durabilidade de um Concreto Autoadensável (CAA) que teve substituição de diferentes porcentagens de areia por cavaco metálico e o uso simultâneo de resíduo pó de mármore como filler. Para tanto, foi desenvolvido um traço referência de CAA, que atendeu a todos os parâmetros da ABNT NBR 15823:2017. Este CAA-REF foi alterado com inclusão de quatro proporções crescentes de cavaco metálico (25, 37,5, 50 e 75%) e então, estes novos concretos foram ensaiados e suas propriedades, tanto no estado fresco quanto no endurecido foram comparadas. A elaboração do traço partiu do princípio de empacotamento de partículas e otimização da pasta. O traço do CAA-REF teve o fator (a/c) água/cimento=0,35, (SA/c) sílica ativa/cimento=0,06, (SP/C) superplastificante/cimento=0,008. Foi adotada nesta pesquisa uma nova sequência de mistura dos componentes do concreto na betoneira que se mostrou muito eficiente. Os ensaios de pasta e argamassa do CAA-REF demonstraram as características de alta fluidez e moderada viscosidade. O CAA-REF atingiu todos os parâmetros de um concreto autoadensável no estado fresco e no estado endurecido em que apresentou excelentes resultados para os parâmetros de resistência e durabilidade. Para produção dos traços com cavacos metálicos houve necessidade de pequenas correções de SA/c e a/c para algumas substituições. Os traços de CAA-CM atingiram todos os parâmetros de um CAA no estado fresco com exceção do CAA-CM 75 que não alcançou os parâmetros da caixa L. Comparando os resultados de todos os concretos pode-se concluir que a substituição de areia pelo cavaco metálico é muito viável e com substituição de até 50% não se altera significativamente nenhuma das propriedades registradas pelo CAA-REF tanto no estado fresco como no endurecido. Segundo a ABNT NBR 8953:2015 todos os concretos atingiram resistência à compressão que os classificam como estrutural e de alto desempenho. A resistência à tração de todos os concretos se encontra em torno de 10% das suas resistências à compressão. Os valores do módulo de elasticidade decresceram com o aumento da substituição. O CAA-CM 75 apresentou módulo de elasticidade 20% menor que do REF. A dureza superficial dos concretos cresce com até 37,5% de substituição, acima deste valor decresce, mas mantendo valor equiparado ao do CAA-REF. A absorção A% e índice de vazios Iv% dos concretos cresceram com o aumento da substituição, mas seus índices baixos os enquadram como concretos duráveis. Apenas O CAA-CM 75 é classificado como deficiente. Todos os concretos apresentaram baixos valores de absorção capilar. Todos os concretos apresentaram resistividade elétrica aos 28 dias entre 100 e 200 Ω .m, significando baixa probabilidade de corrosão. Já o CAA-CM75 apresentou alta probabilidade de corrosão.

Palavras Chave: Concreto autoadensável, resíduos metálicos, resistência, durabilidade.

Pinto, F.B. (2019), Analysis of the influence of the addition of metal waste on self-compacting concrete properties - SCC.155 p. Thesis (PhD in Mechanical Engineering) - Institute of Mechanical Engineering, UNIFEI - Federal University of Itajubá, Itajubá, 2019

ABSTRACT

This work aimed to analyze the influence on the mechanical, rheological and durability properties of a Self Compacting Concrete - SCC that had different percentages of sand replaced by metal slag and the simultaneous use of marble powder residue as a filler. To this end, a SCC Mix Reference was developed to meet all parameters of the ABNT NBR 15823: 2017. This SCC-REF was changed with the inclusion of four increasing proportions of metal slag (MS) (25, 37.5, 50 and 75%), then these new concretes were tested, and its properties, both fresh and hardened, were compared. The elaboration of the mix control assumed the principle of particle packing and paste optimization. The SCC-REF had the factor water/cement $a / c = 0.35$, silica fume SF / cement = 0.06, superplasticized/cement SP / c = 0.008. A new sequence of mixing concrete components in the concrete mixer was adopted in this research, which proved to be very efficient. The paste and mortar tests of the SCC-REF demonstrated the characteristics of a high flowability and moderate viscosity. The SCC-REF achieved all parameters of a fresh and hardened self-compacting concrete where it presented excellent results for parameters such as strength and durability. For the production of the mixtures with metal chips, small corrections of SF / c and a / c were necessary in some substitutions. Every SCC -MS mix reached all parameters of a fresh state SCC, with the exception of the SCC -MS 75, which did not reach the parameters of the L box. Comparing the results of all concretes, it can be concluded that the replacement of sand by MS is very viable and with replacement up to 50% does not significantly change any of the properties registered by the SCC-REF in both fresh and hardened state. According to the ABNT NBR 8953:2015 all concretes have achieved resistance to a compressive that classify them as structural and high performance. The splitting tensile strength of every concrete is around 10% of its compressive strengths. The values of the module of elasticity decreased with the increment of the substitution. The SCC -MS 75 presented a module of elasticity 20% lower than the mix REF. The surface hardness of concrete grows up to 37.5 substitution, above this value, it decreases, but maintains a value equivalent to the SCC -REF. The Absorption A% and void index Iv% of concretes increased with the enhance of the substitution, but their low values indicate a durable concrete. Only the SCC -CM 75 is classified as inefficient. All concretes presented low capillary absorption values. Every concrete presented electrical resistivity at 28 days between 100 and 200 $\Omega.m$. Meaning low probability of corrosion. The SCC -CM75 had a high probability of corrosion.

Keywords: Self-compacting concrete, metal slag, resistance, durability

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Desempenho de uma estrutura durante a sua vida útil..... | 26 |
| Figura 2.2: Descrição esquemática das características do concreto | 29 |
| Figura 2.3: Classificação da estrutura porosa do concreto (FREIRE, 2005) | 30 |
| Figura 2.4: Deformação de um elemento de fluido..... | 36 |
| Figura 2.5: Caixas de trabalhabilidade para diferentes tipos de CAA. Onde: Região 1: CAA de baixa viscosidade e alto rendimento; Região 2: CAA de baixa viscosidade; Região 3: Região Fácil compactação para o concreto convencional..... | 38 |
| Figura 2.6: Desenho esquemático do efeito da modificação da composição básica da mistura do concreto nas propriedades reológicas..... | 39 |
| Figura 2.7: Métodos para se obter uma alta compactabilidade em concretos auto adensáveis..... | 42 |
| Figura 2.8: Cilindro em corte, com os anéis de pistão..... | 55 |
| Figura 2.9: Operação de Retificação de topo para a fabricação de anel de pistão | 56 |
| Figura 2.10: Retífica de anéis de pistão com rebolo vertical (Grupo Mahle)..... | 57 |
| Figura 2.11: (a) Retificadora de perfil (b) Face de trabalho | 57 |
| Figura 2.12: Diagrama que descreve o método de dosagem proposto por Gomes e Barros..... | 61 |
| Figura 2.13: Ensaio da pasta -Miniabatimento proposto por Kantro..... | 63 |
| Figura 2.14: Ensaio de fluidez- Cone de Marsh..... | 64 |
| Figura 2.15: Ensaios característicos para argamassa: a) Cone de consistência; b) Funil-V | 65 |
| Figura 2.16: Cone de Abrams – Slump Flow test (dimensões em mm) | 67 |
| Figura 2.17: Figura do funil V (dimensões em mm) | 69 |
| Figura 2.18: Caixa L..... | 70 |
| Figura 2.19: Ensaio de Segregação: Coluna de segregação..... | 71 |
| Figura 3.1: Fluxograma do processo de produção do concreto autoadensável..... | 75 |
| Figura 3.2: Seleção da proporção dos componentes do CAA-REF e a curva gerada..... | 77 |
| Figura 3.3: Seleção da proporção dos componentes do CAA-CM 25 e a curva gerada..... | 78 |
| Figura 3.4: Seleção da proporção dos componentes do CAA-CM 37,5 e a curva gerada..... | 79 |
| Figura 3.5: Seleção da proporção dos componentes do CAA-CM 50 e a curva gerada..... | 80 |
| Figura 3.6: Seleção da proporção dos componentes do CAA-CM 75 e a curva gerada..... | 81 |
| Figura 3.7: Planilha de cálculo de traço de CAA adaptada ao Método do Gomes..... | 83 |
| Figura 3.8: Planilha de cálculo para correção do traço de CAA, em função da umidade da areia..... | 84 |

| | |
|---|------------|
| Figura 3.9: Planilha de cálculo de traço de CAA adaptada ao Método do Gomes - Inclusão de outros materiais | 85 |
| Figura 3.10: Planilha de cálculo do volume de pasta e argamassa..... | 86 |
| Figura 3.11: Ensaio para medição da massa específica..... | 92 |
| Figura 3.12.a: Corpos de prova moldados. Figura 3.12.b: Corpos de prova desmoldados e identificado | 93 |
| Figura 3.13: Ensaio de (a) miniabatimento (Kantro) (esquerda), (b) Pasta(direita), (c) de fluidez com o Cone de Marsh (inferior)..... | 94 |
| Figura 3.14: Realização do ensaio da argamassa | 94 |
| Figura 3.15: Ensaio no estado fresco CAA-REF e CAA-CM. Medida do espalhamento pelo método de cone de Abrams (a e b), medida da habilidade passante pela caixa L (c), medida da viscosidade pelo método do funil V (d). | 95 |
| Figura 3.16: Ensaio compressão | 96 |
| Figura 3.17: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral | 97 |
| Figura 3.18: Corpo de prova preparado para o ensaio do módulo dinâmico de elasticidade..... | 98 |
| Figura 3.19: Esclerômetro 58-C0181/N da marca Controls..... | 99 |
| Figura 3.20: Corpo de prova no ensaio de esclerômetro..... | 99 |
| Figura 3.21: Secagem em estufa, ensaio Capilaridade e ensaio de Imersão..... | 101 |
| Figura 3.22.a: Máquina de corte. Figura 3.22.b. Corpo de prova para ensaio da resistividade elétrica..... | 104 |
| Figura 3.23: Dispositivo montado para a realização do ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica..... | 105 |
| Figura 4.1: Curva granulométrica para o tamanho de partículas do pó de mármore granito..... | 106 |
| Figura 4.2: Análise do pó de mármore utilizando MEV (EDS)..... | 107 |
| Figura 4.3: Análise do pó de mármore utilizando MEV | 108 |
| Figura 4.4: Análise das porcentagens retida e acumulada da areia natural..... | 110 |
| Figura 4.5: Análise das porcentagens retida e acumulada do cavaco metálico..... | 110 |
| Figura 4.6: Análise do Resíduo Cavaco Metálico pelo MEV..... | 112 |
| Figura 4.7: Análise do Resíduo Cavaco Metálico pelo MEV (EDS)..... | 113 |
| Figura 4.8: Análise das porcentagens de retida e acumulada da brita zero..... | 115 |
| Figura 4.9. Valores de Slump Flow para a mistura de CAA- REF e CAA- CM..... | 118 |
| Figura 4.10: Valores de Slump Flow T500 para a mistura de CAA- REF e CAA- CM..... | 118 |
| Figura 4.11: Valores de Caixa L (H_2/H_1) para a mistura de CAA- REF e CAA- CM..... | 119 |
| Figura 4.12: Valores do Funil V (s) para a mistura de CAA-REF e CAA-CM..... | 119 |
| Figura 4.13: Resultados do ensaio de compressão para o CAA REF e CAA CM nas idades de 7 e 28 dias..... | 121 |

| | |
|--|------------|
| Figura 4.14: Resultados do ensaio de tração por compressão para os concretos CAA REF e CAA CM nas idades de 7 e 28 dias..... | 123 |
| Figura 4.15: Valores do módulo de elasticidade dinâmico para os concretos CAA REF e CAA CM aos 35 dias de idade..... | 124 |
| Figura 4.16: Comparação dos Módulos de elasticidade estático (E_c) e dinâmico (E_d)..... | 126 |
| Figura 4.17: Índice esclerométrico efetivo..... | 127 |
| Figura 4.18: Resistência equivalente (Mpa) ao IEE..... | 128 |
| Figura 4.19: Comparação dos valores de resistência à compressão dos concretos dos ensaios de esclerometria, módulo de elasticidade dinâmico e compressão axial..... | 128 |
| Figura 4.20: Resultados do ensaio de absorção por imersão A (%) e índice de vazios I_v (%) dos concretos CAA-REF e CAA-CM..... | 129 |
| Figura 4.21: Massas específicas seca, saturada e real dos concretos estudados..... | 130 |
| Figura 4.22: Resultados do ensaio de ensaio de absorção de capilaridade (C) dos concretos CAA REF e CAA CM..... | 132 |
| Figura 4.23: Resultados do ensaio de absorção por capilaridade em % de massa dos concretos CAA REF e CAA CM..... | 132 |
| Figura 4.24: Valores de resistividade elétrica dos corpos de prova dos concretos CAA-REF e CAA-CM aos 28 dias..... | 135 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|------------|
| Tabela 2.1: Classe agressividade geral e classificação do tipo de ambiente para projeto..... | 27 |
| Tabela 2.2: Valores correspondentes a classe de agressividade e a qualidade do concreto (NBR6118:2014) | 28 |
| Tabela 2.3: Principais fatores e processos de degradação do Concreto (FERREIRA, 2000) | 32 |
| Tabela 2.4: Tipos de Aditivos para Concreto..... | 46 |
| Tabela 2.5: Parâmetros para ensaios de autoadensamento..... | 66 |
| Tabela 2.6: Normas de ensaio para CAA no estado fresco..... | 67 |
| Tabela 2.7: Ensaio do concreto auto adensável no estado endurecido e respectivas normas..... | 73 |
| Tabela 3.1: Características físicas, mecânicas e químicas do cimento CP V-ARI-PREMIUM. | 87 |
| Tabela 3.2: Características físicas e químicas da Sílica ativa..... | 88 |
| Tabela 3.3: Características físicas e químicas do aditivo | 90 |
| Tabela 3.4: Traços unitários dos concretos produzidos..... | 91 |
| Tabela 3.5: Teores de areia e cavaco metálico em cada traço de CAA produzido..... | 91 |
| Tabela 3.6: Ensaio para a caracterização do CAA REF e CAA CM..... | 96 |
| Tabela 3.7: Indicação de probabilidade de corrosão..... | 103 |
| Tabela 4.1: Características físicas e granulométricas da areia..... | 109 |
| Tabela 4.2: Características físicas e granulométricas do Resíduo Cavaco Metálico (RCM) | 111 |
| Tabela 4.3: Características físicas e granulométricas da Brita 0..... | 114 |
| Tabela 4.4: Resultado Ensaio de Pastas e Argamassa da CAA-REF e CAA-CM..... | 115 |
| Tabela 4.5: Características do concreto estudado..... | 116 |
| Tabela 4.6: Caracterização do concreto autoadensável no estado fresco..... | 117 |
| Tabela 4.7: Resultados dos ensaios de resistência a compressão, CAA REF e CAA CM..... | 121 |
| Tabela 4.8: Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos concretos CAA REF e CAA CM..... | 123 |
| Tabela 4.9: Valores do módulo de elasticidade dinâmico para os concretos CAA REF e CAA CM nas idades de 35 dias..... | 125 |
| Tabela 4.10: Módulo de Elasticidade Estático (Ec) em GPa..... | 125 |
| Tabela 4.11 Comparação dos Módulos de elasticidade estático (Ec) e dinâmico (Ed)..... | 126 |
| Tabela 4.12: Valores de IEe, da resistência cúbica, das resistências cilíndricas..... | 127 |
| Tabela 4.13: Ensaio de absorção por imersão para os concretos CAA-REF e CAA-CM..... | 129 |

| | |
|---|------------|
| Tabela 4.14: Critérios para avaliação da qualidade do concreto..... | 131 |
| Tabela 4.15: Ensaio de absorção por capilaridade dos concretos CAA REF e CAA CM..... | 131 |
| Tabela 4.16: Valores de resistividade elétrica..... | 133 |
| Tabela 4.17: Classificação de risco de probabilidade de corrosão..... | 134 |

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

a/c - Relação Água Cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ARI – Alta Resistência Inicial

ASTM= American Society for Testing and Materials

b/a= relações brita/agregados

B0 - Brita Nº 0

B1 – Brita Nº 1

C= absorção por capilaridade

CA- concreto armado

CAA- Concreto Auto Adensável

CAA CM = Concreto auto adensável com cavaco metálico

CAA CM 25= Concreto auto adensável com substituição de 25% cavaco metálico

CAA CM 37,5= Concreto auto adensável com substituição de 37,5% cavaco metálico

CAA CM 50= Concreto auto adensável com substituição de 50% cavaco metálico

CAA CM 75= Concreto auto adensável com substituição de 75% cavaco metálico

CAA REF =Concreto auto adensável referencia

CC- Concreto Convencional

CM = cavaco metálico

CNC -Torno com controle numérico computadorizado

CONAMA =CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE

COPASA= Companhia de Saneamento de Minas Gerais

CP- concreto protendido

CPFT (%)=porcentagem volumétrica de partículas menores

d_i=diâmetro médio da fração de agregados

DIN= (*Deutsches Institut für Normung e. V.*).

DRX – Difração de Raios-X

e = porosidade (V_e / V_t)

Easy-CC= Fácil compactação para o concreto

EDS – Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X

EFNARC - *European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*

EMMA= Elkem Materials Mixture Analyzer

f/c= relação filler/ cimento

fc28= Resistência à compressão do concreto aos 28 dias em Mpa

f_{ck} = compressão do concreto

FEPI – Fundação de Ensino e Pesquisa de Itajubá

GPa= Gigapascal

HY-SCC= CAA de alto rendimento

i =volume de água acumulado por unidade de área

IAR= Incorporador de Ar

IE: índice esclerométrico médio

IEe: Índice esclerométrico médio efetivo

INMETRO = Instituto nacional de metrologia, qualidade e tecnologia

I_v = índice de vazios

K: Coeficiente de correção do índice esclerométrico.

Kg/m^3 = Quilo por metro cúbico

LCE= Laboratório de Caracterização estrutural

LV-HY-SCC= CAA de baixa viscosidade de alto rendimento

LV-SCC= CAA de baixa viscosidade

MB= massa dos agregados graúdos da base

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

m_i =quantidade de massa da fração

MK= metacaulim

mm = Milímetro

MPa = Megapascal

m_s = massa seca em estufa

m_{sat} = massa saturada

MT= massa dos agregados graúdos do topo

NBR = Norma Brasileira

NBR =Norma brasileira

OPC = cimento Portland comum

P= Plastificante

PA= Plastificante Acelerador de Pega

PIM- porosimetria por intrusão de mercúrio

PL = habilidade passante

PR= Plastificante Retardador

q =coeficiente de distribuição

R= Retardador de Pega

RBMG = Resíduo de beneficiamento de mármore e granito.

RCM = Resíduo cavaco metálico

s/a= relações areia/agregados

S= Área da seção transversal

SF = ensaio de espalhamento

SiO₂ = Dióxido de silício

sp/ c= fator superplastificante- cimento

SP= superplastificante

SPA =Superplastificante Acelerador de Pega

SPR = Superplastificante Retardador de Pega

t = o tempo avaliado.

T₅₀₀= Tempo para atingir o diâmetro de 500 mm, ensaio slump-flow.

TEI = Técnica de Excitação por Impulso

U = tensão aplicada

UNIFEI = Universidade Federal de Itajubá

V_e = volume de vazios;

V_s = volume de sólidos;

VSI= Indicador visual de estabilidade

V_t = volume total

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento

η = viscosidade aparente

κ = viscosidade volumétrica

μ = viscosidade plástica

ω_u = peso unitário da mistura

ρ_b = densidades secas da brita

ρ_{dm} = densidade da mistura seca

ρ_s = massa específica saturada

ρ_s = densidades secas da areia

ρ_v = é a resistividade elétrica-volumétrica do corpo de prova na idade de ensaio

ρ_v = massa específica seca

τ_0 = tensão de escoamento

v (%) = percentual do teor de vazios

dc/dL = gradiente de concentração

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| Resumo..... | 9 |
| Abstract..... | 10 |
| LISTA DE FIGURAS..... | 11 |
| LISTA DE TABELAS..... | 14 |
| LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS..... | 16 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 22 |
| 1.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 22 |
| 1.2.OBJETIVOS..... | 24 |
| 2.REVISÃO DA BIBLIOGRÁFICA..... | 25 |
| 2.1. DURABILIDADE DO CONCRETO..... | 25 |
| 2.2.POROSIDADE DO CONCRETO..... | 28 |
| 2.2.1. Estrutura e dimensões dos poros | 29 |
| 2.3 PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO | 31 |
| 2.4. MÉTODOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS..... | 32 |
| 2.5.REOLOGIA..... | 35 |
| 2.5.1. Características da reologia..... | 36 |
| 2.5.2. Caracterização das propriedades reológicas dos concretos..... | 37 |
| 2.6. CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA)..... | 40 |
| 2.6.1.Componentes e características do CAA | 42 |
| 2.6.2.Diferentes tipos de resíduos utilizados em CAA..... | 46 |
| 2.6.2.1.Concreto autoadensável com resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) | 48 |
| 2.6.2.2. Resíduos metálicos | 50 |
| 2.6.3. Produção de anéis de pistão..... | 54 |
| 2.7. PRODUÇÃO DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS-CAA..... | 57 |
| 2.7.1. Método de dosagem de Gomes, Gettu e Agulló | 60 |
| 2.7.2.Método de dosagem de Repette e Melo..... | 62 |
| 2.8. ENSAIOS PARA O CAA | 62 |
| 2.8.1.Ensaio auxiliares para estudo da pasta e da argamassa autoadensáveis..... | 63 |
| 2.8.1.1 Ensaio de pasta Miniabatimento (Kantro)..... | 63 |
| 2.8.1.2Ensaio de pasta - cone de Marsh..... | 64 |
| 2.8.1.3 Ensaio da argamassa – Mini Cone e Mini Funil..... | 64 |
| 2.8.2. Ensaio específicos para avaliação do CAA no estado fresco..... | 65 |
| 2.8.2.1Ensaio de Espalhamento -Slump flow – tronco de cone..... | 67 |
| 2.8.2.2 Ensaio de Viscosidade - Funil V..... | 68 |
| 2.8.2.3.Ensaio de capacidade de passagem- Caixa L..... | 69 |

| | |
|---|------------|
| 2.8.2.4. Ensaio da Estabilidade e Segregação - Método da Coluna..... | 71 |
| 2.8.3 Ensaio do CAA no estado endurecido..... | 72 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 74 |
| 3.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 74 |
| 3.2. PROCEDIMENTO UTILIZANDO O PROGRAMA EMMA PARA OBTENÇÃO DE MELHOR MISTURA DOS AGREGADOS PARA O CAA..... | 76 |
| 3.3. MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA..... | 87 |
| 3.3.1 Cimento..... | 87 |
| 3.3.2. Adições Minerais | 87 |
| 3.3.2.1. Sílica ativa..... | 88 |
| 3.3.2.2. Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG)..... | 88 |
| 3.3.3. Agregados Miúdo e Graúdo (Areia, Resíduo Cavaco Metálico e Brita)..... | 89 |
| 3.3.3.1. Areia..... | 89 |
| 3.3.3.2. Resíduo Cavaco Metálico..... | 89 |
| 3.3.3.3. Brita Zero (B0) | 89 |
| 3.3.4 Água..... | 90 |
| 3.3.5 Aditivo Superplastificante (SP)..... | 90 |
| 3.4. DOSAGEM DOS CONCRETOS..... | 91 |
| 3.5. ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO..... | 93 |
| 3.6. ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO..... | 95 |
| 3.6.1. Resistência à compressão (NBR 5739/2018) | 96 |
| 3.6.2. Resistência à Tração por compressão diametral (NBR 7222:2011) | 97 |
| 3.6.3 Ensaio de Módulo Dinâmico de Elasticidade por impulso de vibração (ASTM 1876-01)..... | 97 |
| 3.6.4. Ensaio Dureza de Esclerômetro de Reflexão (NBR 7584/2012) | 98 |
| 3.6.5. Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa Específica (NBR 9778/2005) | 100 |
| 3.6.6. Determinação da absorção de água por capilaridade (NBR 9779/2012) | 102 |
| 3.6.7. Ensaio Resistividade Elétrica Volumétrica (NBR 9204/2012) | 103 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 106 |
| 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PRECURSORES..... | 106 |
| 4.1.1 Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG)..... | 106 |
| 4.1.2 Agregados Miúdos e Graúdos (Areia, Resíduo Cavaco Metálico e Brita)..... | 108 |
| 4.1.2.1 Areia..... | 108 |
| 4.1.2.2 Resíduo Cavaco Metálico (RCM)..... | 110 |
| 4.1.2.3. Brita Zero (B0) | 114 |

| | |
|---|------------|
| 4.2. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO..... | 115 |
| 4.2.1 Ensaio da pasta e da argamassa..... | 115 |
| 4.2.2 Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico (ABNT NBR 9833:2009) | 116 |
| 4.2.3. Ensaio do concreto no estado fresco..... | 116 |
| 4.3. RESULTADOS PROVENIENTES DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO DO CAA | 120 |
| 4.3.1 Ensaio de resistência à compressão (NBR 5739:2018)..... | 120 |
| 4.3.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222:2011) | 122 |
| 4.3.3 Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico (ASTM 1876-01)..... | 124 |
| 4.3.4 Ensaio de avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão (NBR 7584:1995) | 127 |
| 4.3.5 Determinação da absorção de água por imersão-Índice de vazios e massa específica segundo a (NBR 9778:2009) | 129 |
| 4.3.6 Ensaio de Absorção por capilaridade (NBR 9779/2012)..... | 131 |
| 4.3.7 Ensaio de resistividade elétrica para os corpos de prova em câmara úmida e em ambiente de laboratório (NBR 9204/2012) | 133 |
| 5. CONCLUSÕES | 136 |
| 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 139 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 140 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A crescente preocupação com as questões ambientais impõe que cada parcela do setor produtivo dê a sua contribuição visando a diminuir os danos à natureza. A indústria da construção pode dar sua contribuição de diversas formas: produzindo estruturas mais duráveis, que necessite de menos recursos de manutenção e de intervenções ao longo do tempo, utilizando materiais mais resistentes. Por outro lado, a reciclagem de resíduos é uma promissora linha de pesquisa com respeito aos benefícios eco ambiental (SHEEN; LE; SUN, 2015).

Na indústria automobilística, na produção de anéis de pistão destinados aos motores de combustão interna, são utilizadas ligas metálicas com diversos tipos de composições químicas, tais como: ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular, aços inoxidáveis e aços carbono (MAHLE, 2016). Os processos de retificação e desbaste/acabamento das faces laterais dos anéis de pistão geram uma grande quantidade de resíduos metálicos ferrosos, provenientes do sobremetal removido da peça e do particulado do rebolo resinoide, gerado em função do desgaste que o rebolo apresenta. Este resíduo metálico apresenta diferentes granulometrias em função do ponto de descarte, desde cavacos com dimensões de agregados miúdos a pó com dimensões submicrométricas. Estes materiais, em função de suas características e visando um descarte ambientalmente adequado, tornam-se uma opção interessante na produção de Concreto Autoadensável (CAA) em substituição aos agregados miúdos.

A utilização de materiais descartados de outros processos produtivos ajuda a atingir dois objetivos: obtenção de matéria prima por custo mais baixo e atendimento ao apelo ambiental de reaproveitamento de resíduos, preservando o meio ambiente. A reciclagem é largamente utilizada em materiais metálicos. A redução da utilização dos recursos naturais aliado ao constante crescimento da demanda de produtos é de extrema necessidade para a sustentabilidade do planeta e das gerações futuras, pois além de reduzir o consumo de energia, minimiza o esgotamento dos recursos naturais disponíveis (CANAKCI; VAROL, 2015; ABRAHIM; LAJIS; ARIFFIN, 2015).

Visando à produção de concretos mais duráveis, teve início no Japão, em 1986 o desenvolvimento do CAA. Este material pode ser compactado em todos os cantos de um elemento estrutural, apenas por meio de seu próprio peso e sem a necessidade de compactação por vibração (OKAMURA; OUCHI, 2003). O CAA é um concreto especial com ênfase em

trabalhabilidade, resistência e durabilidade (SHEEN; LE; SUN, 2015). Além disto, com a substituição dos seus elementos constituintes por materiais que de outra forma, poderiam ser descartados no meio ambiente, apresentam benefício ambiental.

Para melhorar as propriedades do concreto pode ocorrer a adição de minerais, tais como pó de quartzo, materiais metálicos, escória granulada de alto forno, sílica ativa, metacaulim, aditivos, que promovam uma redução da permeabilidade do concreto e o conseqüente o aumento da durabilidade e resistência mecânica (LEITE; MOLIN, 2002; DAL MOLIN, 2005) e melhoram a resistência na zona de transição. No entanto, as diferenças nas características físicas e químicas desses materiais dificultam a escolha da melhor adição mineral e do teor adequado a ser empregado. Dessa forma, torna-se necessário conhecer melhor as características do material, bem como compreender as reações e alterações promovidas pelas adições minerais no concreto (CASTRO, 2003).

A substituição da areia por escória de ferro proporciona bons resultados de resistência e de características microestruturais. No entanto, o estudo sobre as propriedades de durabilidade em CAA, incorporando estas escórias como agregado fino é pouco estudada (SINGH; SIDDIQUE, 2016).

Em muitos estudos busca-se uma análise das propriedades de resistência mecânica do concreto, mas, também se deve analisar, as propriedades deste material em relação à durabilidade. Neste sentido, características como: baixa porosidade, melhor desempenho em relação à carbonatação e transporte de íons e maior estabilidade química, são alguns atributos considerados fundamentais para o estudo das propriedades de durabilidade do concreto. Como exemplo, são realizados alguns estudos de resistência mecânica em concretos que ocorre substituição de areia por escórias de ferro na produção de CAA. No entanto, não se verifica na literatura muitos estudos sobre propriedades de durabilidade do CAA incorporando escória de ferro como agregados finos (SINGH; SIDDIQUE, 2015).

Neste trabalho foi estudada a influência nas propriedades mecânicas, reológicas e de durabilidade de um CAA que teve substituição de diferentes porcentagens de areia por cavaco metálico. Para tanto, foi desenvolvido um traço referência de CAA, que atendeu a todos os parâmetros da ABNT NBR 15823-1:2017, e então produzido novos CAAs com inclusão de diversas proporções de cavaco metálico e então comparou-se suas propriedades.

1.2. OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo analisar a influência da adição de resíduos metálicos, nas propriedades mecânicas, reológicas e de durabilidade do concreto autoadensável (CAA), tanto no estado fresco quanto no endurecido. Para tanto foi utilizado os resíduos de cavacos metálicos oriundos dos processos de retificação de anéis de pistão de uma empresa do município de Itajubá, Minas Gerais.

Para tanto alguns objetivos secundários foram estabelecidos:

- Encontrar o traço ideal do CAA-REF, incorporado de resíduo de beneficiamento de mármore e granito, como filler, por meio do método de empacotamento dos agregados e das adições minerais e da interação entre o aditivo superplastificante e os materiais cimentício;
- Baseado no traço ideal do CAA-REF, elaborar quatro traços CAA-CM com a substituição de porções de 25%, 37,5%, 50% e 75% de areia por cavaco metálico.
- Constatar se o resíduo sólido, cavaco metálico, que hoje é um resíduo e que tem um custo para o seu descarte, pode ser matéria prima utilizada no CAA;
- Analisar e comparar as propriedades reológicas dos concretos CAA-REF e dos CAA-CM no estado fresco pelos ensaios de: adensabilidade, viscosidade, espalhamento e resistência à segregação;
- Analisar e comparar as propriedades de resistência e de durabilidade dos concretos CAA-REF e dos CAA-CM no estado endurecido (aos 7 e 28 dias) pelos ensaios de: resistência à compressão e à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico, dureza superficial pelo esclerômetro, resistividade elétrica volumétrica e absorção por imersão e por capilaridade e índice de vazios.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DURABILIDADE DO CONCRETO

A durabilidade do concreto é a capacidade que ele tem de resistir a vários tipos de danos, mantendo sua resistência e integridade durante seu período de serviço e de exposição ao meio envolvente (GUO et al. 2018). É essencial que as estruturas de concreto tenham um bom desempenho não apenas dentro de suas exigências mecânicas especificadas, mas também dentro de suas expectativas de durabilidade. Muitas vezes, a questão da durabilidade está sendo negligenciada, pois os engenheiros fazem a suposição de que o concreto resistente também é durável (KANELLOPOULOS; PETROU, IOANNOU, 2012).

A durabilidade é uma propriedade fundamental para o concreto e em alguns estudos verificou-se que o uso de uma quantidade excessiva de cimento, e, portanto, água, resultou em alta permeabilidade, que tem um efeito negativo sobre a qualidade do concreto (AITCIN, 2003; FELEKOĞLU; TÜRKEL; BARADAN, 2007; CHEN; TUAN; HWANG, 2013). Uma maneira simples de aumentar a durabilidade é reduzir o teor de água e o conteúdo de cimento. Além disso, diminuir a quantidade de cimento usada reduzirá o calor de hidratação e volume da pasta (CHEN; TUAN; HWANG, 2013).

Ressalta-se que ao tratar de estruturas de concreto, deve-se diferenciar a durabilidade do concreto utilizado da durabilidade da estrutura. Segundo Collepari (1998), a durabilidade do concreto dependerá das manutenções das suas propriedades por determinado período de tempo, enquanto a durabilidade da estrutura depende do projeto e de sua execução, além da durabilidade do concreto utilizado (BARBOZA, 2018).

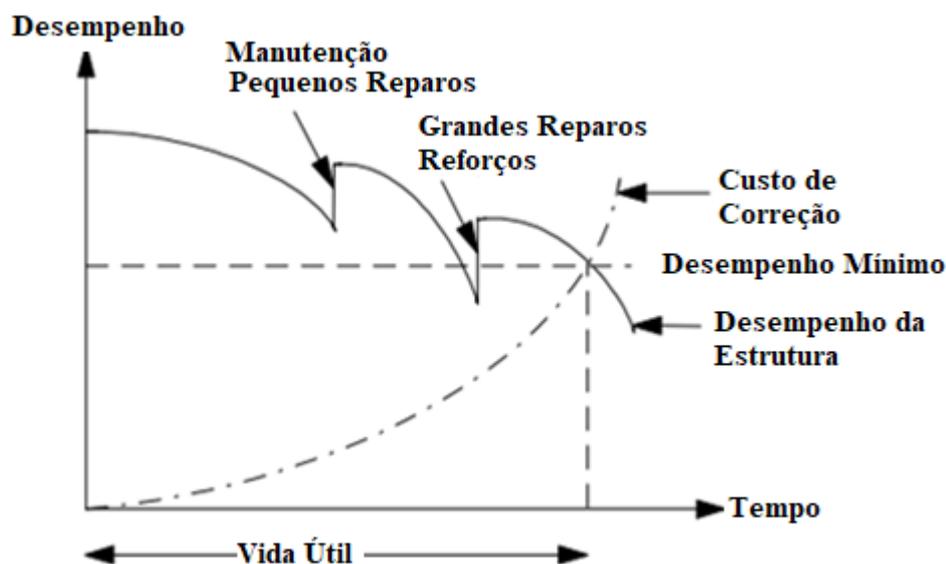
Segundo a NBR 6118 (ABNT,2014), uma estrutura de concreto ao ser projetada e construída deve conservar sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço, durante o período correspondente à vida útil da mesma, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e utilizada conforme preconizado. O conceito de durabilidade dos materiais está associado diretamente à vida útil. Este parâmetro refere-se às características dos materiais e/ou componentes, às condições de exposição e às condições de utilização impostas durante a vida útil da edificação (POSSAN, DEMOLINER, 2013).

Conforme supracitado, a durabilidade do concreto depende de fatores internos e externos, tais como, as características do concreto, assim como as ações que podem ser de origens físicas (temperaturas extremas), químicas externas (inserção de agentes agressivos, sulfatos, CO₂, O₂, líquidos e gases que podem ser naturais e industriais) químicas internas (reação álcali- sílica,

álcali- carbonato) ou podem ser mecânicas (impacto, processo de abrasão, erosão, cavitação) (PEREIRA, 2010).

O estudo do processo de durabilidade está relacionado com a vida útil de uma estrutura, sendo que esta característica pode ser representada pelo gráfico desempenho/tempo, como observado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Desempenho de uma estrutura durante a sua vida útil.



Fonte: ANDRADE (1997).

Na figura 2.1 são apresentados os critérios adotados, no momento de se projetar uma estrutura, que podem ser resumidos a um valor de desempenho mínimo. No projeto deve se ter uma definição tanto da vida útil exigida para a mesma, estando relacionado com as características do material, do meio ambiente, das condições de utilização, assim como dos critérios de desempenho para este período (ANDRADE, 1997).

O aumento do conhecimento dos mecanismos de transporte dos fluidos em meios porosos gerou uma evolução nos estudos de durabilidade das estruturas de concreto, permitindo associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente estes mecanismos.

Em relação às diretrizes para o processo de durabilidade, a NBR 6118 (ABNT,2014) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), foi a pioneira a tratar sobre este assunto. Nesta norma é apresentado um esquema com a classificação dos processos de agressividades ambientais que podem deteriorar o concreto. A Tabela 2.1 apresenta as condições mais importantes a serem observadas pelos projetistas e executores quanto à classe de agressividade ambiental, classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto e risco de deterioração do concreto.

Tabela 2.1: Classe agressividade geral e classificação do tipo de ambiente para projeto.

| Classe de agressividade ambiental | Agressividade | Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto | Risco de deterioração da estrutura |
|-----------------------------------|---------------|--|------------------------------------|
| I | Fraca | Rural | Insignificante |
| | | Submersa | |
| II | Moderada | Urbana ^{1,2} | Pequeno |
| III | Forte | Marinha ¹ | Grande |
| | | Industrial ^{1,2} | |
| IV | Muito forte | Industrial ^{1,3} | Elevado |
| | | Respingos de maré | |

Nota

1) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: (Tabela adaptada da NBR 6118:2014) - (Próprio autor)

Esta norma cita também, outros procedimentos que se devem observar para a obtenção da durabilidade, tais como cuidados com o processo de drenagem, os tipos de formas arquitetônicas, os detalhamentos das armaduras, o controle da fissuração. O documento ressalta a importância da elaboração de um manual de utilização, inspeção e manutenção preventiva.

Na Tabela 2.2 são apresentadas as exigências quanto à classe do concreto, relação água/cimento (a/c) e ao cobrimento nominal das armaduras. A durabilidade das estruturas é diretamente relacionada com a qualidade do concreto, e de acordo com a Norma NBR 6118 (ABNT,2014), os ensaios comprobatórios de desempenho da durabilidade da estrutura frente ao tipo e nível de agressividade previsto em projeto devem estabelecer os parâmetros mínimos a serem atendidos em um projeto. Porém, na ausência destes e devido à existência de uma forte correspondência entre a relação água/cimento, a resistência à compressão do concreto e sua durabilidade, esta norma recomenda que se adotem os requisitos mínimos expressos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Valores correspondentes a classe de agressividade e a qualidade do concreto (NBR 6118: 2014).

| Concreto | Tipo | Classe de Agressividade | | | |
|------------------------------------|------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | I | II | III | IV |
| Relação água/cimento em massa | CA | $\leq 0,65$ | $\leq 0,60$ | $\leq 0,55$ | $\leq 0,45$ |
| | CP | $\leq 0,60$ | $\leq 0,55$ | $\leq 0,50$ | $\leq 0,45$ |
| Classe de concreto (ABNT NBR 8953) | CA | $\geq C20$ | $\geq C25$ | $\geq C30$ | $\geq C40$ |
| | CP | $\geq C25$ | $\geq C30$ | $\geq C35$ | $\geq C40$ |

Notas:

- 1) O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655 (ABNT, 2015).
- 2) CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado
- 3) CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

2.2. POROSIDADE DO CONCRETO

A porosidade é um fator que tem grande influência nas propriedades de resistência e de durabilidade do concreto, assim alguns estudos devem ser realizados para que se promova uma diminuição da porosidade dos materiais.

Existe uma relação direta entre a durabilidade, absorção de água e porosidade. O aumento da porosidade do concreto levará a uma maior absorção de água, o que resultará na expansão do mesmo. Além disso, os poros da mistura atuam como uma rede de porosidade para a passagem de água e outros líquidos indesejáveis, como o ácido sulfúrico. Isso resultará na menor resistência das misturas e, ao mesmo tempo, diminuirá sua durabilidade também (GILL; SIDDIQUE, 2018).

A porosidade do concreto é principalmente composta de poros capilares e gel e canais conectando os poros. Os poros capilares e sua conectividade constitui a porosidade permeável de concreto. O volume, tamanho e continuidade de poros capilares têm efeitos consideráveis nas propriedades de transporte e, portanto, sobre a durabilidade de concreto. A porosidade também afeta a resistência à corrosão do concreto (SAFIUDDIN, WEST, SOUDKI, 2008).

A porosidade desempenha um papel importante nas propriedades de permeabilidade do concreto, pois o conteúdo efetivo de vazios afeta a resistência à compressão e a permeabilidade à água no concreto endurecido. Porosidade mais elevada acarreta um aumento da permeabilidade da água; no entanto, a resistência à compressão é diminuída (IBRAHIM et al., 2014).

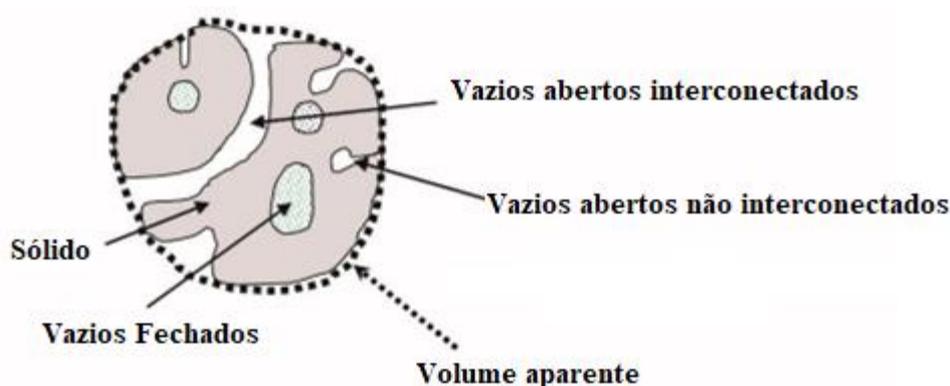
A durabilidade do concreto pode ser atribuída, em grande parte, à dificuldade de penetração dos agentes agressivos em sua rede de poros. Além disto, absorção de água, está

relacionada em grande parte com a durabilidade do concreto, já que a água funciona como um veículo de transporte para íons agressivos e como uma causa de processos químicos que causam a degradação física e mecânica de estruturas de concreto (LEVY; HELENE, 2004). O transporte de espécies agressivas pode seguir diferentes mecanismos, dependendo da estrutura de poros do concreto, das condições de exposição e das características das substâncias difusoras.

A interação do concreto com o meio externo está intimamente relacionada às características de sua estrutura porosa e também à natureza das fases presentes (íons ou dióxido de carbono, por exemplo). Por esta razão, faz-se necessário conhecer o seu arranjo poroso e as propriedades a ele associadas.

O concreto é constituído em nível macro por duas fases, a pasta de cimento e os agregados. Já em nível micro, o concreto é um material poroso composto por três fases, uma fase sólida constituída pelos agregados, pelos compostos hidratados e pelas fases anidras do cimento; uma fase líquida, composta pela solução intersticial, e uma fase gasosa, constituída por uma mistura de ar e vapor de água (MEHTA; MONTEIRO, 2014; OLLIVIER; TORRENTI; CARCASSÈS, 2012). Na Figura 2.2 são mostradas as características do concreto com as fases e os vazios.

Figura 2.2: Descrição esquemática das características do concreto.



Fonte: Almeida (2016).

A durabilidade dos concretos é associada, principalmente, à porosidade aberta interconectada (relação entre o volume dos poros abertos e interconectados e o volume aparente) do concreto, pois ela permite a entrada dos agentes agressivos externos para o seu interior (ALMEIDA, 2016).

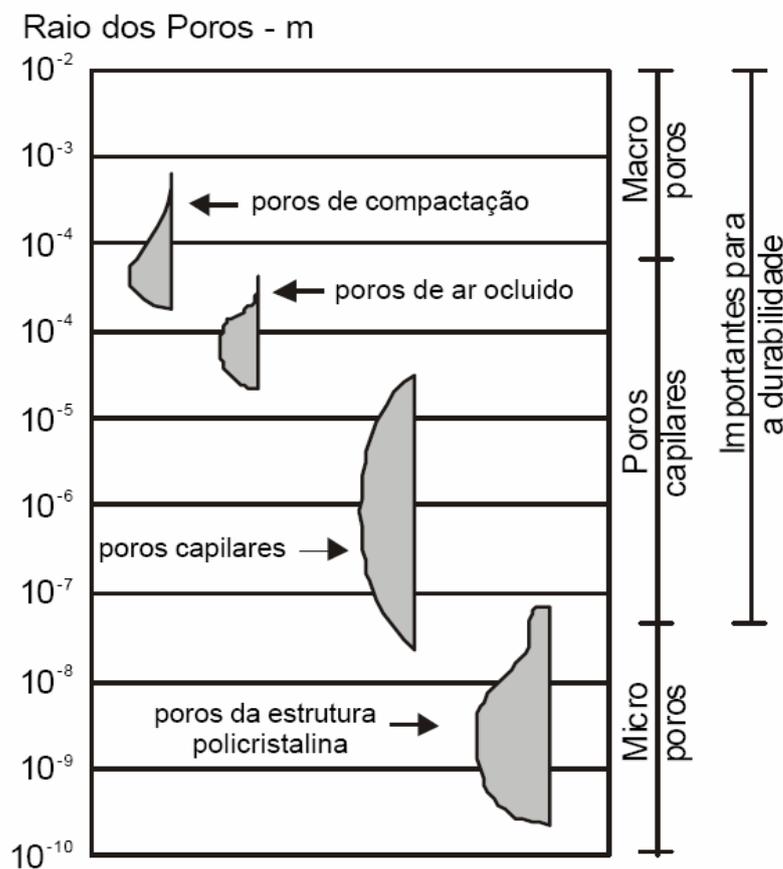
2.2.1. Estrutura e dimensões dos poros

Entre os fatores que mais influenciam os mecanismos de transporte de substâncias no concreto estão a estrutura e as dimensões dos poros, que são características gerais dos concretos,

uma vez que a concentração da substância, as condições ambientais e as microfissuras são condições particulares de cada caso. A determinação do teor total de vazios de ar (porosidade) não é suficiente, uma vez que a forma, o tamanho e a distribuição dos vazios podem afetar a resistência mecânica e a durabilidade do concreto (HILAL; THOM; DAWSON, 2015)

Além das características dos poros, a análise da conexão entre eles e a tortuosidade são também importantes para a definição de sua estrutura. Em relação à conexão entre os poros eles podem ser interconectados, ilhados, cerrados e poros cegos, sendo que, somente os interconectados participam do transporte das substâncias. Na Figura 2.3 é mostrada a classificação da estrutura porosa dos concretos. Na estrutura porosa, o transporte ocorre predominantemente nos macroporos e microporos. No entanto somente os poros que são interconectados participam do processo de transporte de substâncias (CAMPOS, 2017).

Figura 2.3: Classificação da estrutura porosa do concreto (FREIRE, 2005).



Fonte: Freire (2005).

A porosidade e a distribuição do tamanho dos poros são as características mais importantes do sistema de poros do concreto que influenciam o ingresso de substâncias estranhas no seu interior (KOU; POON; ETXEBERRIA, 2011). Por estrutura dos poros entendem-se o tipo, a quantidade de poros e a distribuição dos mesmos por tamanho. De acordo com sua origem

e características, os poros podem ser classificados em poros de compactação, poros de ar, poros capilares e poros de gel. Em termos gerais, a resistência do concreto em relação às características químicas e físicas pode ser reduzida com o aumento dos poros capilares. Pode-se adotar uma classificação mais geral em função do tamanho e da conexão entre eles, sendo mais prático classificá-los como macroporos, poros capilares e microporos. Além disso, os poros macroscópicos (>50 nm) contribuem para a permeabilidade e resistência, enquanto poros microscópicos (<50 nm) podem afetar a retração e fluência (MOKHTAR et al., 2017).

Calado et al. (2015) compararam dois tipos de concreto, um convencional (CC) e um CAA, e os resultados obtidos mostraram que o CAA apresenta uma resistividade elétrica média 11,4% maior que o CC; e também que a porosidade aberta média tem um valor de 55,6% menor que o CC. Também os autores (*op.cit.*) verificaram que geralmente, o CAA possui melhores propriedades de durabilidade do que o concreto convencionalmente vibrado. Na sequência serão detalhados os processos de deterioração do concreto, que podem ser gerados por causas biológicas, físicas ou químicas.

2.3. PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

A durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sua capacidade de resistir a ação de intemperismo, ataque químico, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração para manter sua forma original, qualidade e facilidade de manutenção quando exposto ao ambiente de serviço pretendido. Embora as deteriorações materiais não tenham um problema de segurança imediato, elas levarão progressivamente a danos estruturais, o que cria e potencializa um perigo às estruturas (TANG et al., 2015).

Uma melhor compreensão dos agentes causadores e do mecanismo de deterioração do concreto é importante para melhorar a prevenção e a remediação (VUPPUTURI et al., 2015). Para resolver os problemas de durabilidade, muitos pesquisadores realizaram estudos aprofundados sobre essas questões. (AITCIN, 2003; FELEKOĞLU; TÜRKEKEL; BARADAN, 2007; CHEN; TUAN; HWANG, 2013).

Na Tabela 2.3 são apresentados os principais fatores de degradação com os processos que afetam o desempenho do concreto e a degradação.

Tabela 2.3: Principais fatores e processos de degradação do Concreto (FERREIRA, 2000).

| Fator de Degradação | Processo | Degradação |
|--|--|---|
| Mecânicos | | |
| Carregamento estático | Deformação | Deflexão, fissuração, ruptura |
| Carregamento cíclico | Fadiga, deformação | Deflexão, fissuração, ruptura |
| Carregamento por impacto | Fadiga | Vibração, Deflexão, fissuração, ruptura |
| Biológicos | | |
| Microorganismos | Produção de ácido | Lixiviação |
| Bactéria | Produção de ácido | Lixiviação |
| Químicos | | |
| Água pura | Lixiviação | Desagregação do concreto |
| Ácido | Lixiviação | Desagregação do concreto |
| Ácido e gases ácidos | Neutralização | Despassivação do aço |
| Dióxido de carbono | Carbonatação | Despassivação do aço |
| Cloretos | Penetração, destruição da camada de passivação | Despassivação do aço |
| Despassivação do aço + H ₂ O + O ₂ | Corrosão | Expansão do aço, perda de aderência |
| Tensão + cloretos | Corrosão do aço | Ruptura dos tendões de pré-reforço |
| Sulfatos | Pressão dos cristais | Desagregação do concreto |
| Agregados (sílica) + álcalis | Reação da sílica | Expansão, desagregação |
| Agregados (carbonato) + álcalis | Reação do carbonato | Expansão, desagregação |
| Físicos | | |
| Variação da temperatura | Expansão / contração | Deformação restringida |
| Variação da umidade | Retração e expansão | Deformação restringida |
| Baixa temperatura + água | Formação do gelo | Desagregação do concreto |
| Gelo (mar) | Abrasão | Destacamento, fissuração |
| Trânsito | Abrasão | Desgaste e ruptura |
| Água corrente | Erosão | Danos superficiais |
| Água turbulenta | Cavitação | Cavidades |
| Eletromagnéticos | | |
| Eletricidade | Corrosão | Expansão do aço, perda de aderência |
| Magnetismo | Corrosão | Expansão do aço, perda de aderência |

Em relação aos processos químicos de deterioração pode-se mencionar o ataque por água, ácidos e sulfatos. Dentro dos processos que deterioram os componentes de concreto, destaca-se o processo de carbonatação, caracterizado pelas reações dos produtos do concreto, com os derivados do processo de CO₂ em H₂O, sendo o ácido carbônico o composto mais participativo do processo de carbonatação. As reações deletérias que ocorrem no processo e à matriz do cimento resultam em efeitos indesejáveis, como a diminuição da resistência mecânica e aumento da permeabilidade (DUGUID et al., 2011; LAGERBLAD, 2005; GLASSER et al., 2008).

No próximo item será apresentado o método de empacotamento de partículas, que será utilizado como base para elaboração dos traços e da dosagem do concreto autoadensável.

2.4. MÉTODOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Os materiais compósitos empregados na construção civil são compostos por partículas de diferentes formas e tamanhos. Toda essa variedade de grãos deve ser combinada de modo a ocupar o maior volume possível, para que o índice de vazios destes materiais seja sempre

reduzido, favorecendo a resistência mecânica e durabilidade do material final. Em concretos e argamassas, a pasta de cimento preenche os espaços vazios entre os agregados, conectando esses grãos no estado endurecido, garantindo assim, a integridade e propriedades mecânicas do material (LONDERO et al., 2017).

O método de empacotamento de partículas tem um efeito importante sobre a porosidade dos materiais, tanto na resistência mecânica e no módulo de elasticidade, quanto na permeabilidade (ROMANO; TORRES; PILEGGI, 2015; MACIEL et al., 2018).

Em misturas granulares, como é o caso do concreto, a densidade de empacotamento possui grande influência nas suas características físicas. É reconhecido que o empacotamento de material granular no concreto depende principalmente de três parâmetros: o tamanho, a forma das partículas e o método de empacotamento. O conceito básico relacionado ao método de empacotamento é a redução do índice de vazios ao estudar uma mistura ótima de agregados graúdos e finos, assim minimizando a quantidade de aglutinante e água necessários na mistura (MAZZUCCO et al., 2018).

De acordo com a teoria de empacotamento de partículas, o uso de frações de partículas de tamanhos diferentes - onde as menores preenchem os vazios gerados entre as partículas maiores, de forma sucessiva para tamanhos cada vez menores - pode gerar um sistema onde ocorra diminuição significativa destes vazios (DAMINELI et al., 2017).

Para uma unidade de volume preenchido com partículas granulares, a densidade de empacotamento é definida como o volume de sólidos em uma unidade de volume e também igual volume ocupado pelos vazios menos o fator 1. A densidade de empacotamento indica a eficácia do preenchimento de certo volume por partículas (SBIA et al., 2015; LENZ, 2016). A densidade de empacotamento pode ser expressa de acordo com a Equação 1:

$$\Phi = \frac{V_S}{V_T} = \frac{V_S}{(V_S + V_e)} = 1 - e \quad (1)$$

Em que: V_S = volume de sólidos;

V_e = volume de vazios;

V_t = volume total (volume de sólidos + volume de vazios);

e = porosidade (V_e / V_t)

A distribuição das esferas assume um arranjo aleatório, obtendo valores entre 0,6 e 0,64. No entanto, quando se misturam esferas de vários formatos e tamanhos, pode-se obter valores de empacotamento próximos de 1.

A utilização de cimento é um fator que encarece a produção do concreto, uma forma de reduzir o consumo deste material está atrelada a obtenção de um esqueleto granular compacto, que apresenta máxima densidade de empacotamento dos agregados, minimizando assim a porosidade, e assim, aumentando a resistência mecânica e a durabilidade do concreto (LONDERO, 2016). Assim, para se obter esqueletos granulares compactos é necessário fazer o uso de modelos de empacotamento de partículas que permitam estabelecer a proporção e tamanho adequados dos agregados, de modo a obter um conjunto com um baixo índice de vazios.

Para a obtenção das melhores propriedades de empacotamento, muitas pesquisas foram realizadas, entre eles destaca-se Füller e Thompson (1907), Andreasen e Andersen (1930) e Funk e Dinger (1980), os autores estudaram o efeito da distribuição granulométrica sobre o empacotamento de partículas, buscando encontrar uma curva granulométrica ideal para uso em concretos, que atualmente são bem difundidas no projeto de mistura de concreto (LONDERO et al., 2017; MADANI et al., 2017). A formulação utilizada para obtenção das curvas características são mostradas na Equação 2:

$$CPFT(\%) = 100 * \left(\frac{D}{D_{MAX}} \right)^q \quad (2)$$

Em que $CPFT(\%)$ é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (do inglês *cumulative percent finer than D*), D é diâmetro da partícula, D_{max} corresponde ao diâmetro da maior partícula do conjunto e q é o coeficiente de distribuição que deve ter os valores de 0,5 e 0,37 para Füller-Thompson e Andreasen-Andersen para as curvas de graduação, respectivamente.

É importante ressaltar que estes modelos não consideram a forma das partículas na determinação da curva granulométrica ideal, apenas seu diâmetro. Além disso, a Equação 2 não apresenta um limite mínimo para o tamanho de partículas, de modo que se admite partículas infinitamente pequenas, o que não condiz com uma situação real. Outras equações foram desenvolvidas ao longo do tempo para expressar a distribuição granulométrica ideal dos agregados. Esta necessidade foi observada por Funk e Dinger (1980) que, a partir do modelo de Andreasen e Andersen, adicionaram um limite inferior ao conjunto de partículas, como se pode observar por meio da Equação 3:

$$CPFT(\%) = 100 * \left(\frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{MAX}^q - D_{\min}^q} \right) \quad (3)$$

Para uma mistura apresentar boa capacidade de escoamento, o valor do coeficiente de distribuição deve ser menor que 0,30; assim, a consideração de q com valores próximos a 0,30 favorece a produção de concretos adensados sob vibração, enquanto que valores menores que 0,25 resultam em misturas autoadensáveis (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

O empacotamento das partículas, que está relacionado com o seu tamanho e distribuição, juntamente com as características de sua superfície são parâmetros que influenciam a reologia (ARORA et al; 2018), o item 2.5 irá apresentar o método de reologia, assim como os parâmetros reológicos.

2.5. REOLOGIA

Como os concretos são constituídos por cimento, água e agregados, podem ser caracterizados como uma suspensão de partículas sólidas (agregados) em um líquido que apresenta viscosidade (pasta de cimento). O concreto apresenta propriedades reológicas complexas que dependem de vários fatores incluindo forma e tamanho das partículas, composição do cimento, relação água/cimento, métodos de medição (VARSHNEY et al., 2017).

Para estudar o comportamento deste material no estado fresco, para uma análise da deformação e do processo de escoamento de um fluido sob a influência de tensões, busca-se analisar estas características por meio do estudo da reologia.

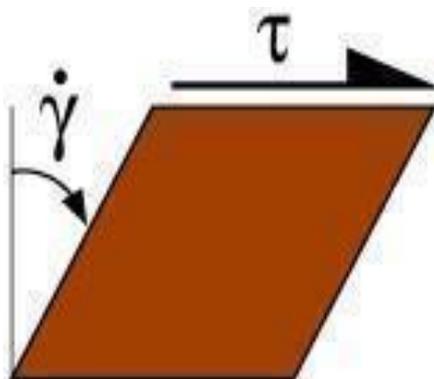
Em geral, a reologia dos concretos é afetada pelas características das misturas do concreto, incluindo a fração de volume do sistema de ligação, sua composição (por exemplo, presença de materiais cimentício suplementares) e atributos dos agregados (isto é, distribuição de tamanho de partículas e forma). Também podem ser utilizados aditivos como uma ferramenta eficaz para adequar a reologia. Superplastificantes, que atuam como dispersantes para diminuir a tensão de escoamento, e agentes modificadores de viscosidade, que aumentam a viscosidade, são usados regularmente em concretos para controlar a trabalhabilidade (MARCHON et al., 2018).

A reologia é utilizada para caracterizar e descrever o comportamento do fluxo, espessamento, perda de trabalhabilidade, estabilidade e até compactabilidade de uma suspensão de partículas à base de cimento fresco, tais como pasta de cimento, argamassa e concreto. Para aplicar essa ferramenta, é necessário avaliar e escolher os parâmetros de importância do material (por exemplo, tensão de escoamento τ_0 e viscosidade plástica μ) e obter informações sobre eles, por meio de testes (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011).

2.5.1. Características de reologia

Muitos métodos de ensaio tentam avaliar as propriedades do concreto fresco em termos de uma quantidade única, de maneira que todos eles compreendem a consideração implícita de que esse material se comporta da maneira mais simples possível, como um fluido newtoniano (DE CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011). O comportamento das propriedades reológicas dos materiais é normalmente descrito por meio de relações numéricas entre a tensão aplicada (τ) e sua respectiva deformação ou fluxo (γ); além disto, está relacionada com suas variações em relação ao tempo (MARIANO, 2017). Quando uma tensão de cisalhamento τ é aplicada a um elemento fluido (também conhecido como partícula de fluido), uma deformação resultará como mostrado na Figura 2.4.

Figura 2.4: Deformação de um elemento de fluido.



Fonte: WALLEVIK e WALLEVIK (2011).

A taxa de deformação é usualmente designada como taxa de cisalhamento sendo representada pelo símbolo $\dot{\gamma}$. A relação entre a tensão de cisalhamento τ que é aplicada em um elemento fluido e sua taxa de cisalhamento resultante $\dot{\gamma}$ é denominada de viscosidade aparente η . O termo η também é designado como viscosidade de cisalhamento, para melhor diferenciá-lo de outros tipos de viscosidade, como a viscosidade volumétrica κ (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011).

Quando a relação entre a tensão de cisalhamento τ e a taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}$ é constante, o material constitui um chamado fluido newtoniano, como observado na Equação 4.

$$\tau = [\text{constante}] \cdot \dot{\gamma} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (4)$$

Entretanto, para fluidos em geral, a viscosidade aparente não é uma constante, mas depende da taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}$. Quando este é o caso, o fluido é designado como não-newtoniano e a tensão de cisalhamento é dada pela Equação 5.

$$\tau = \eta(\gamma) \cdot \gamma \quad (5)$$

Para o concreto é necessário a imposição de uma força mínima ou uma tensão para que o processo inicie seu escoamento, indicando uma tensão de escoamento. Assim, para identificar a natureza reológica do material constituinte, qual a forma da curva de escoamento, é necessário desenvolver alguns experimentos nos quais as medidas são feitas para uma série de velocidades de escoamento distintas (CASTRO, 2007; DE CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

2.5.2. Caracterização das propriedades reológicas dos concretos

Uma primeira aproximação para as caracterizações das propriedades reológicas fundamentais para o material à base de cimento podem ser obtido em termos de tensão de escoamento τ_0 e viscosidade plástica μ (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011). Para a caracterização dos parâmetros reológicos dos materiais cimentícios, tais como viscosidade e tensão de escoamento, podem ser obtidos por testes empíricos, que podem ser o abatimento de tronco de cone, espalhamento, cone de Marsh, funil V e caixa L. Outros equipamentos, com mais sofisticação, como os reômetros, também podem ser utilizados para as medições dos parâmetros reométricos (CAMPOS, 2017).

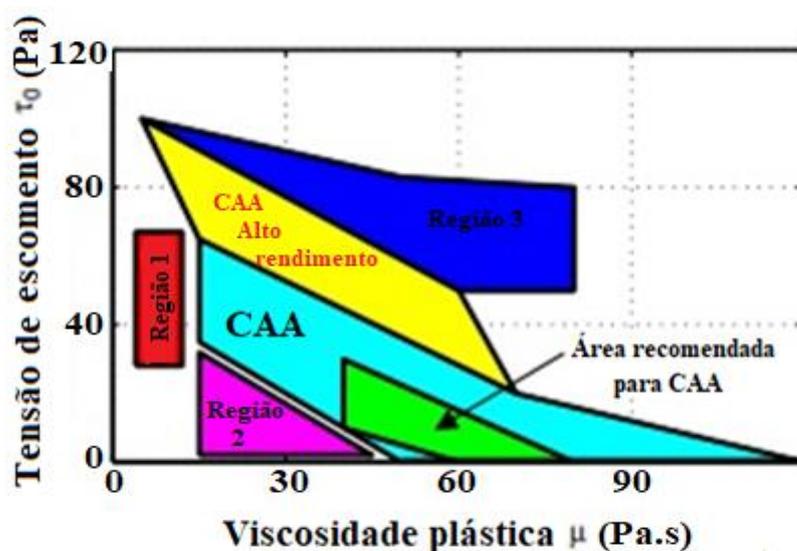
A maioria dos testes é capaz de medir apenas um parâmetro reológico, ou seja, a viscosidade ou tensão de escoamento. Dentre os ensaios, o abatimento de cone, espalhamento, é utilizado para a medição do parâmetro tensão de escoamento, pois, os mesmos medem a capacidade do concreto iniciar o escoamento. Enquanto, que os ensaios de cone de Marsh, caixa L, funil V medem a viscosidade plástica (CAMPOS, 2017).

Os testes de reômetros de concreto podem ser usados para analisar as propriedades intrínsecas do concreto fresco, como viscosidade e tensão de escoamento. Estes ensaios medem dois parâmetros reológicos (JAU; YANG, 2010), além dos ensaios de abatimento de tronco de cone modificado e do ensaio de dois pontos. Os reômetros mais utilizados são de placas paralelas, cilindros coaxiais e cone placa (CAMPOS, 2017).

Segundo Wallevik e Wallevik (2011), a reografia é uma ferramenta conveniente e essencial para comparar diferentes características do concreto e examinar o comportamento em relação aos constituintes modificados, quantidades de constituintes e/ou em relação a tempos diferentes da adição de água, de superplastificantes, entre outros. O estudo da reografia é definida como um gráfico da viscosidade plástica (μ) em função da tensão de escoamento (τ_0) (GHODDOUSI; SALEHI, 2017).

Uma forma de se comparar lotes de concretos e examinar o comportamento relativo à mudanças de constituintes, quantidades de constituintes e/ou relativos a diferentes adições de água (e assim por diante) é a utilização da reografia. Outro importante conceito é a caixa de trabalhabilidade como pode ser observado na Figura 2.5. Uma caixa de trabalhabilidade consiste em uma área dentro da reografia. Mais precisamente, tal caixa consiste em um certo domínio de tensão de escoamento τ_0 e viscosidade plástica μ .

Figura 2.5: Caixas de trabalhabilidade para diferentes tipos de CAA. Onde: **Região 1:** CAA de baixa viscosidade e alto rendimento; **Região 2:** CAA de baixa viscosidade; **Região 3:** Região Fácil compactação para o concreto convencional



Fonte: Wallevik e Wallevik (2011).

Uma única caixa de trabalhabilidade está associada a um tipo particular de concreto. Assim, várias caixas de trabalhabilidade podem ser representadas em um único reógrafo. Na Figura 2.5 são mostradas áreas (ou seja, caixas de trabalhabilidade) para diferentes tipos de CAA. Estes são CAA de Alto Rendimento, O CAA de Baixa Viscosidade e Alto Rendimento (“Região 1”) e CAA de Baixa Viscosidade (“Região 2”).

Neste contexto, o termo alto rendimento significa tensão de alto rendimento τ_0 . Da mesma forma, baixa viscosidade significa baixa viscosidade plástica μ . Nesta figura pode -se observar uma área designada como “Área recomendada para CAA”, que são regiões onde são obtidos os valores recomendados para que o concreto apresente as melhores propriedades de tensão e escoamento.

Também na Figura 2.5 é mostrada uma região denominada de Fácil Compactação para o Concreto Convencional (“Região 3”), que está fora do domínio para o concreto autoadensável. Como pode ser observado na Figura 2.5, se a viscosidade plástica μ apresentar um valor baixo,

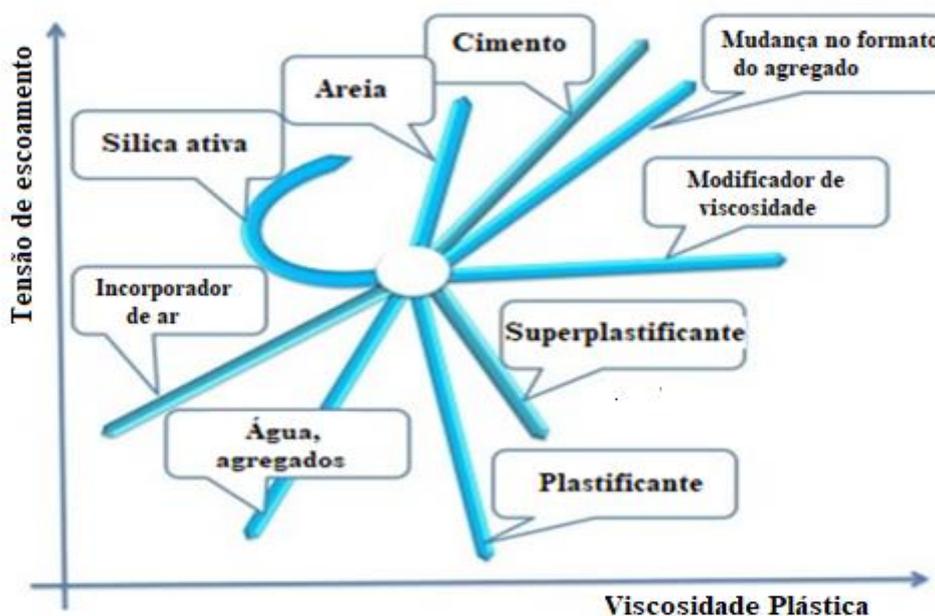
isto é, abaixo de 40 Pa.s, o CAA deve ter um valor relativamente alto para a tensão de escoamento τ_0 , para manter a estabilidade. Por outro lado, se o CAA for altamente viscoso, isto é, com uma viscosidade plástica superior a 80 Pa.s, a tensão de escoamento deve estar na faixa inferior, abaixo de 15 Pa, para manter a fluidez.

Como relatado anteriormente, a alteração das proporções de mistura do concreto influencia as propriedades reológicas, particularmente a tensão de escoamento e a viscosidade. Além disso, misturas minerais e químicas são geralmente usadas na produção de CAA. Dependendo da quantidade de dosagem do material, um aumento do teor de água de amassamento pode resultar em aumento do teor da trabalhabilidade do concreto, assim como uma redução da tensão de escoamento e também da viscosidade plástica da mistura.

Outro fator que pode alterar as propriedades reológicas do concreto é a influência dos agregados que compõe a mistura e a sua granulometria (CASTRO, 2007). No entanto, para melhores propriedades reológicas, a quantidade de agregado graúdo é reduzida, enquanto a quantidade de agregado fino é aumentada (REHMAN; IQBAL; ALI, 2018).

Na Figura 2.6 é apresentada a influência da variação da composição dos elementos constituintes do concreto nas propriedades reológicas do CAA.

Figura 2.6: Desenho esquemático do efeito da modificação da composição básica da mistura do concreto nas propriedades reológicas.



Fonte: Kostrzanowska-Siedlarz, Golaszewski (2016).

Flatt (2004) estudou os efeitos do superplastificante no comportamento reológico do concreto e foi revelado por esta pesquisa que a utilização de superplastificante, causou diminuição da tensão de escoamento. Além disso, a viscosidade do CAA pode ser aumentada de muitas maneiras, como a adição de materiais mais finos e a adição de um agente modificador da viscosidade, para manter a estabilidade do CAA (fluindo sob seu próprio peso, resistindo à segregação) (GÜNEYISI et al., 2016).

Ao aumentar o volume de areia no agregado na faixa de 35 a 55%, há uma tendência a reduzir a tensão de escoamento (aumentando o escoamento de concreto fresco) com um aumento simultâneo da viscosidade plástica. Ao aumentar a quantidade de cimento na mistura do concreto aumenta-se a tensão de escoamento. Isto é devido a um aumento nos contatos entre grãos afiados. O impacto do cimento na viscosidade é geralmente um pouco menor, porque, apesar de aumentar a taxa de massa, a relação de volume não aumenta significativamente (KOSTRZANOWSKA-SIEDLARZ, GOŁASZEWSKI, 2016).

A influência da sílica ativa nas propriedades reológicas é dependente da quantidade de constituintes. A revisão da literatura mostra a ambiguidade da influência da sílica ativa nas propriedades reológicas do concreto fresco. Em volume muito baixo (entre 3% e 5%) causa diminuição da tensão de escoamento e da viscosidade plástica.

No entanto, em volume entre 5% e 10%, resulta em um aumento tanto na tensão de escoamento como da viscosidade plástica. No entanto, a substituição de sílica ativa, em uma quantidade entre 10 a 15% ao cimento, resulta na redução da viscosidade plástica da mistura, e este efeito cresce com o incremento do aditivo (KOSTRZANOWSKA-SIEDLARZ, GOŁASZEWSKI, 2016)

2.6. CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA)

O conceito de CAA foi proposto em 1986 por Hajime Okamura, mas o protótipo foi desenvolvido pela primeira vez no Japão em 1988 por Ozawa (KAMAL et al., 2014). É um concreto de alta fluidez, capaz de preencher completamente as formas, sendo compactado apenas por seu próprio peso, sem a necessidade de qualquer vibrador (RATH et al., 2017, HESAMI, HIKOUEI, EMADI, 2016; NIKBIN et al., 2014).

Este material apresenta-se homogêneo e coeso, com habilidade de passagem entre obstáculos como barras de armaduras, sendo capaz de preencher pequenas intersecções nas formas (GÜNEYISI¹ et al., 2015). O CAA apresenta alta resistência à segregação durante a mistura, o transporte e a aplicação. Devido a estas propriedades o CAA inovou o mercado da construção civil.

O CAA tem muitas vantagens em relação ao concreto convencional, incluindo: (1) eliminar a necessidade de vibração; (2) diminuir o tempo de construção e o custo de mão-de-obra (SINGH; SIDDIQUE, 2016; IQBAL et al., 2015); (3) reduzir a poluição sonora; (4) melhorar a capacidade de enchimento de membros estruturais altamente congestionados; (5) melhorar a zona de transição entre pasta de cimento e agregado ou reforço; (6) diminuição da permeabilidade e melhoria da durabilidade do concreto, e (7) facilitação da construtibilidade e assegurando um bom desempenho estrutural (SHI et al., 2015). Por estas vantagens, o CAA foi utilizado na construção de importantes aplicações estruturais, como o Burj Khalifa (Dubai), o Museu Nacional das Artes do Século XXI (Itália), a Ponte do Dragão (Espanha), entre outros (SADEK; EL-ATTAR; ALIB, 2016).

As desvantagens são: a rápida perda de trabalhabilidade e maior sensibilidade à variação da temperatura e clima (CHEN; YANG, 2015). A adoção desse tipo de concreto minimiza os danos relacionados à audição no local de trabalho devido a não necessidade de vibração e reduz o tempo necessário para concretar grandes seções.

O fato do cimento consumir materiais naturais não renováveis, por contribuir com elevadas taxas de emissões de gases na atmosfera em sua produção, e devido à grande quantidade de cimento Portland utilizado na produção do concreto autoadensável (ZHAO et al., 2015) e no concreto convencional, tornam o concreto um problema ambiental que necessita de pesquisas para a otimização de sua produção (ALSUBARI; SHAFIGH; JUMAAT, 2016).

Os processos de fabricação de cimento contribuem com 7% da emissão global de CO₂, que são os maiores causadores do efeito estufa, e as emissões de CO₂ na produção do cimento Portland podem representar quase 10% do total de emissões de CO₂ no futuro próximo (HABERT et al., 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Na produção do concreto é possível absorver, na forma de material constituinte, uma vasta gama de resíduos originados na indústria e na agricultura, com isso colaborar diretamente para a recuperação e minimização de impacto de outros segmentos da produção e, indiretamente contribuir para a redução da poluição gerada em seu próprio processo produtivo (VISHWAKARMA; RAMACHANDRAN, 2018).

O uso de resíduos no CAA pode ser tanto em substituição parcial do cimento, dos agregados miúdos e/ou graúdos quanto como adições de finos visando a melhorar a viscosidade do concreto. Segundo Gomes e Barros (2009), o CAA é sustentável tanto na redução do consumo de recursos naturais não renováveis quanto na possibilidade de utilização de subprodutos industriais que prejudicam o meio ambiente.

As inúmeras vantagens e as diversas técnicas utilizadas na confecção do CAA fazem dele um grande desafio para os pesquisadores que buscam desenvolver novos materiais para atendimento às necessidades de desempenho, resistência, durabilidade e de aplicação. A seguir serão detalhados os componentes utilizados no CAA e quais são as características necessárias para que um concreto tenha as propriedades de auto adensabilidade.

2.6.1. Componentes e características do CAA

O CAA é constituído por cimento, agregados, água, adições minerais e aditivos, sendo indispensável o uso de aditivos superplastificantes o que assegura a sua alta fluidez. O CAA deve apresentar uma alta compactabilidade, que deve estar relacionada com a alta deformabilidade da pasta e argamassa, assim como a resistência à segregação entre os agregados e argamassa, ao fluir através da zona confinada entre as barras de reforço.

Okamura e Ozaka (1995) empregam o seguinte método para obter uma auto-compactabilidade, como pode ser observado na Figura 2.7, e são destacados três itens para obter melhor compactabilidade, de acordo com (OKAMURA; OUCHI, 2003):

- 1) Conteúdo limitado de agregados.
- 2) Baixa relação água-cimento.
- 3) Uso de superplastificantes.

Figura 2.7: Métodos para se obter uma alta compactabilidade em concretos auto adensáveis.



Fonte: OKAMURA; OUCHI (2003).

Diferentemente do concreto convencional, um CAA de qualidade deve ter três propriedades principais (SHI et al., 2015): (1) capacidade de preenchimento - a capacidade de fluir para a fôrma e preencher completamente todos os espaços sob seu próprio peso; (2) capacidade de passagem - a capacidade de fluir através e ao redor de espaços confinados entre barras de reforço de aço sem segregação ou bloqueio; (3) resistência à segregação - a capacidade de permanecer homogêneo durante o transporte, colocação e após a colocação. Além da boa auto-compactabilidade, o CAA projetado também deve atender aos requisitos de resistência, estabilidade de volume e durabilidade do concreto endurecido ao mesmo tempo (LIU et al., 2007; SHI et al., 2015).

Um dos parâmetros mais importantes que influenciam o comportamento do concreto é a relação água-cimento usada em uma mistura de concreto. Basicamente, o concreto feito com altas relações a/c terá propriedades baixas, como baixa resistência à compressão e baixa tensão de deformação (ALYAMAÇ; INCE, 2009). O módulo de finura do cimento é de grande importância para o CAA, pois quanto maior a área específica do cimento maior a viscosidade da mistura. O cimento puro e com baixo teor de aluminato tricálcico (C_3A) é o mais indicado (CHEN; YANG, 2015). Para a confecção do CAA, Gomes e Barros (2009) relatam que dependendo da utilização de adições ativas ou inertes, o consumo de cimento deve variar entre 200 e 450 kg/m³.

As propriedades mecânicas, reológicas e microestruturais do concreto, tanto no estado fresco quanto no endurecido sofrem grande influência das características físicas, químicas e mineralógicas dos seus materiais componentes, são diretamente afetadas pela composição das matérias-primas, relação água/ cimento, tipo e quantidade de aditivos químicos e minerais, agregados, densidade de empacotamento e métodos de mistura (DURGUN; ATAHAN, 2017; DE CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011). As propriedades dos agregados, tais como distribuição granulométrica, volume de vazios e viscosidade, influenciam o bom desempenho do CAA (CHEN; YANG, 2015).

As areias e as britas são classificadas como agregados, respectivamente, como agregados miúdos e graúdos e, geralmente, compõem de 60% a 80% da mistura. Os agregados miúdos devem atender às exigências normativas para concreto NBR 248 (ABNT,2003), variando de 0,150 mm a 4,75 mm. Okamura e Ouchi (2003) sugerem que estes contribuam com 40% a 50% do volume da argamassa. Os agregados menores que 0,125 mm devem ser considerados como parte dos finos ou *fillers* (LISBÔA, 2004). De acordo com a NM 248 (ABNT,2003), os agregados graúdos variam de 4,75 mm a 75 mm; no entanto, para CAA, devem ter dimensão máxima de 20 mm e contribuir com 28% a 35% do volume total da mistura (GOMES; BARROS, 2009).

Qualquer variedade nas características do material pode afetar a autocompatibilidade do CAA. As variáveis mais influentes são o teor de água e de agregado miúdo (OKAMURA; OUCHI, 2003). Os agregados a serem utilizados na composição do CAA devem garantir a passagem do CAA por obstáculos durante o lançamento, e também diminuir a tendência à segregação, em vista disso, a dimensão máxima do agregado graúdo deve ser restringida (GOMES; BARROS, 2009).

A umidade e a absorção de água dos agregados devem ser levadas em consideração na dosagem do CAA. Os agregados graúdos bem graduados e menos alongados melhoram a trabalhabilidade colaborando para a redução de água da pasta (CHEN; YANG, 2015). Na mistura do concreto tradicional, a relação água/cimento é mantida constante para obter a resistência e a durabilidade necessárias. No entanto, com o CAA, a relação água/pó (cimento entre outros constituintes) deve ser escolhida tendo em conta a autocompatibilidade, uma vez que esta variável é muito sensível a esta razão (FELEKOĞLU; TÜRKEL; BARADAN, 2007).

É bem conhecido que, a fim de diminuir a quantidade de agregados graúdos e evitar a adição de uma quantidade maior de cimento, o CAA deve conter em sua composição uma porcentagem importante de agregados de tamanho muito pequeno, sendo caracterizados como adições minerais. Os materiais mais comuns utilizados são sílica ativa, cinzas volantes e pó de mármore (GRANATA, 2015). As adições podem ser classificadas como inertes ou reativas respectivamente, as que provocam apenas ação física dando mais compacidade ao concreto (*fillers* de calcário, quartzo, pós de mármore e granito), ou as que atuam como pozolanas (cinza volante, cinzas de casca de arroz, cinzas de bagaço de cana de açúcar, sílica ativa e metacaulim) (DOMONE, 2006; TOPÇU; BILIR; UYGUNOĞLU, 2009).

De acordo com Barros (2008), as propriedades de viscosidade que são necessárias no CAA só é conseguida e mantida devido à presença de resíduos finos como adição do tipo *filler*, de pozolanas e, portanto, fundamental para o alcance da autoadensabilidade desses concretos.

Fillers ou agentes modificadores de viscosidade são necessários para manter a estabilidade da mistura, reduzindo assim a exsudação e a segregação (KARMEGAM et al., 2014). O alto teor de pó na faixa de 500 a 600 kg/m³ é frequentemente necessário no CAA. No entanto, o alto teor de cimento aumenta o calor de hidratação, a fluência e o encolhimento. Assim, as adições minerais são necessárias para satisfazer o requisito de pó no CAA (SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016). O uso de adições minerais, finamente divididas, pode melhorar significativamente o concreto de forma que a relação água/sólidos da pasta seja diminuída, implicando em menor porosidade total e também um refinamento do sistema de poros e dos produtos da hidratação. Quando as partículas são mais finas que o cimento, atuam como pontos

de nucleação, ajudando a dispersar as partículas de cimento e melhorar o empacotamento da fase aglomerante (BARROS, 2008).

O CAA é um concreto altamente fluível que não requer compactação. A fluidez pode ser aumentada no CAA por dois meios: primeiramente podem ser usados redutores de água de alta faixa juntamente com agentes modificadores de viscosidade. Em segundo lugar, o teor de pó pode ser adicionado juntamente com superplastificantes. Entre esses dois métodos, o método econômico é modificar o teor de pó. O teor de pó pode ser aumentado usando subprodutos industriais em vez de cimento (AARTHI; ARUNACHALAM, 2018).

A incorporação de materiais finos, em grande quantidade, como adições minerais ao CAA, influenciam as características de auto adensabilidade, resistência à segregação, viscosidade e melhoram a sua trabalhabilidade no estado fresco. Favorece a resistência à fissuração térmica, a redução da expansão álcali-agregado e do ataque de sulfatos, além de reduzir custos (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A utilização destas partículas finas reduz a fricção entre os agregados, além de causar um aumento da viscosidade. A presença destas partículas promovem uma otimização da distribuição granulométrica, acarretando uma melhora na fluidez do concreto, assim como um ganho de resistência e durabilidade (DACZKO, 2012; CAMPOS, 2017).

Todos os materiais sílico/aluminatos, muito finos, que reagem com hidróxido de cálcio (CaOH_2) quando em contato com água, adquirindo propriedades cimentantes são considerados materiais pozolânicos (SABIR; WILD; BAI, 2001).

Para a confecção do CAA pode-se utilizar o Metacaulim (MK) como aditivo na fabricação de argamassas e concretos. O MK é um material que ao ser adicionado, acarreta uma redução de poros e torna a estrutura impermeável. Assim, os resultados revelaram que a inclusão de MK reduziu significativamente a retração por secagem, mas aumentou as forças mecânicas de concretos e argamassas. Algumas pesquisas mostraram que o concreto com MK proporcionou melhoria na resistência ao sulfato em relação ao concreto simples (GUNEYISI, GESOGLU, MERMERDAS, 2008; PAVLÍKOVÁ et al., 2009; JANOTKA et al., 2010).

Outros materiais que podem ser utilizados são os aditivos químicos. De acordo com a NBR 11768 (ABNT,2019), aditivos são produtos adicionados ao concreto em pequenas quantidades, com a finalidade de modificar algumas propriedades, buscando melhorar as condições de uso do concreto. Alguns tipos de aditivos estão listados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Tipos de Aditivos para Concreto

| Siglas | Descrição |
|--------|---------------------------------------|
| P | Plastificante |
| R | Retardador de Pega |
| A | Acelerador de Pega |
| PR | Plastificante Retardador |
| PA | Plastificante Acelerador de Pega |
| IAR | Incorporador de Ar |
| SP | Superplastificante |
| SPR | Superplastificante Retardador de Pega |
| SPA | Superplastificante Acelerador de Pega |

Fonte: NBR 11768/2019 (adaptado).

A substituição do cimento por materiais pozolânicos influencia diretamente no aspecto ambiental, pois contribui com a redução da emissão de CO₂ na atmosfera, considerado o principal causador do efeito estufa (JALAL et al., 2012).

Dentre os aditivos mais empregados no CAA estão os superplastificantes (SP) que permitem a redução de água do concreto e ainda melhoram o abatimento e a fluidez. Os SP podem ser usados em combinação com outros aditivos como retardadores de pega e modificador de viscosidade (GOMES; BARROS, 2009; KUMAR; KUMAR, KUJUR, 2018). No entanto, no caso de misturas que apresentem uma coesão baixa, necessita da utilização de aditivos modificadores de viscosidade, devido principalmente à falta de materiais finos, no qual evitam a segregação (GIL; SIDDIQUE, 2018).

No item 2.6.2 serão detalhados os diferentes tipos de resíduos que podem ser utilizados na confecção dos concretos autoadensáveis.

2.6.2 DIFERENTES TIPOS DE RESÍDUOS UTILIZADOS EM CAA

Uma das diferenças mais importantes entre o CAA e o concreto convencional é a incorporação de uma mistura mineral. Como o cimento é o componente mais caro do concreto, a redução do teor de cimento é uma solução econômica. Além disso, as misturas minerais podem melhorar o empacotamento das partículas e diminuir a permeabilidade do concreto (UYSAL; SUMER, 2011).

De acordo com a norma da ABNT-NBR 10.004 (ABNT, 2004), bem como a Resolução CONAMA 313/02 (BRASIL, 2002), consideram-se resíduos sólidos, aqueles nos estados sólidos e também semissólidos, que são resultantes de atividades industriais, domésticas, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. No Brasil seguem as seguintes normas sobre os resíduos sólidos de acordo com a ABNT (2004):

- NBR 10.004 (ABNT, 2004a)– Resíduos Sólidos – Classificação: Classe I (perigosos), Classe II-A (não perigosos e não inertes) e Classe II-B (inertes);
- NBR 10.005 (ABNT, 2004b) – Lixiviação de Resíduos;
- NBR 10.006 (ABNT, 2004c) – Solubilização de Resíduos Sólidos;
- NBR 10.007 (ABNT, 2004d) – Amostragem de Resíduos.

O processo de industrialização e as modernas tecnologias trouxeram muitas facilidades e novos produtos para a humanidade. Por outro lado, essa industrialização, devido à emissão de gases perigosos e produção de resíduos sólidos, criou uma série de problemas ambientais como a poluição, esgotamento dos recursos naturais e problemas na gestão de resíduos (XIAO et al., 2015). Para minimizar esses problemas diversos pesquisadores, tentam utilizar resíduos de diferentes indústrias para substituir parte dos agregados e investigar seu efeito nas propriedades do concreto. Muitos resíduos sólidos são utilizados como adição ou substituição parcial dos componentes do concreto.

Em alguns trabalhos foram utilizados pó de mármore como resíduo (TOPÇU; BILIR; UYGUNOĞLU, 2009; HEBHOUB et al., 2011; BELAIDI et al., 2012; HADDADOU; CHAID; GHERNOUTI et al., 2015; GALETAKIS; SOULTANA, 2016; SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016; SOUNTHARARAJAN; SIVAKUMAR, 2013, VARDHAN et al., 2015; ALYAMAC et al., 2017), assim como, escória granulada, pó de calcário, pó de basalto (UYSAL, 2012). Em alguns trabalhos verifica-se a utilização de cinzas volantes (BARLUENGA et al., (2015); DEHWAH (2012), e ainda resíduos plásticos (HAMA; HILAL, (2017), assim como a utilização de resíduos de construção civil (CARRO LOPEZ et al., (2015); KAPOOR et al., (2016).

Em outros trabalhos foram utilizados resíduos de metais em substituição parcial da areia na produção de concreto e suas propriedades foram comparadas com a do concreto de controle (DEVI; GNANAVEL, 2014; QASRAWI et al., 2009; REHMAN; IQBAL; ALI, 2018; KHAJURIA; SIDDIQUE, 2014; KOTHAI; MALATHY, 2014; DASH; PATRO; RATH, 2016; SINGH; SIDDIQUE, 2016; PAN et al., 2019).

O bom desempenho do CAA é influenciado pelas propriedades dos agregados, da distribuição do tamanho de partícula, volume de vazios, consumo de pasta e viscosidade (CHEN; YANG, 2015). As características físicas, químicas e mineralógicas dos materiais componentes

do concreto possuem grande influência nas suas propriedades mecânicas, reológicas e microestruturais, tanto no estado fresco quanto no endurecido (DE CASTRO; LIBÓRIO; PANDOLFELLI, 2011).

A substituição de cimento por outros materiais finos, e por se tratar de um componente mais caro do concreto, leva a redução do seu teor o que pode ser considerada uma solução econômica (TOPÇU; BILIR; UYGUNOĞLU, 2009). Nos próximos itens serão abordados a utilização de resíduos de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) e de resíduos metálicos na produção do CAA. Estes dois materiais foram utilizados neste trabalho.

2.6.2.1. CAA com Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito

A utilização de Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG) como adições minerais, os quais têm como características a finura dos grãos, podem desempenhar um papel de micro preenchimentos que podem aumentar a compacidade e gerar uma diminuição da porosidade do concreto, promovendo assim, uma estrutura menos porosa que dificulta a entrada de agentes degradantes no concreto no estado endurecido (KAPOOR, SINGH, SINGH; 2016).

Grandes quantidades de resíduos sólidos são geradas todos os dias a partir da indústria de mármore e granito. Quase 70% de um bloco de mármore, cada um pesando 15-20 t, é desperdiçado após os processos de mineração, corte e polimento. A grande quantidade de resíduos de lodo de mármore e granito gerado no processo de corte e de polimento é muito alta para estocagem (ALYAMAC; GHAFARI; INCE, 2017). Com o aumento da conscientização ambiental, é essencial explorar soluções alternativas para o problema de descarte de resíduos.

Para reutilizar o lodo obtido no processo de corte de mármore e granito, é necessário que ele seja convertido em pó pela secagem e aplicação de uma pequena carga mecânica. Uma das principais aplicações do RBMG no setor da construção é sua utilização como agregados finos e como substituto do cimento (GALETAKIS; SOULTANA, 2016). Verifica-se que a utilização de pó de calcário como material filler no CAA apresenta um bom desempenho na diminuição da porosidade do concreto (TOPÇU; BILIR; UYGUNOĞLU, 2009).

A viscosidade do material à base de cimento pode gerar um aumento da coesão da pasta por meio da adição dos fillers, como o pó de mármore. O uso do pó de mármore residual na produção de CAA como aditivo mineral aumenta suas propriedades mecânicas e de durabilidade (SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016). O pó de mármore é uma boa alternativa para resolver o problema da trabalhabilidade do CAA (HADDADOU; CHAID; GHERNOUT, 2015). No entanto, a adição excessiva de partículas finas pode resultar em aumento considerável da área

superficial específica do pó, o que resulta em um aumento na demanda de água para atingir uma dada consistência (YAHIA; TANIMURA; SHIMOYAMA, 2005).

Barros (2008) avaliou diferentes propriedades de durabilidade do CAA com resíduo de corte de mármore e granito como adição mineral. A relação de *filler*/cimento foi de 0,5. Os resultados obtidos com resíduos foram melhores do que o concreto convencional. No ensaio de capilaridade foi verificado que a adição do resíduo proporcionou uma estrutura de poros com maior descontinuidade e/ou menor diâmetro, assim este material apresentou uma resistência à absorção de água por capilaridade 61% maior.

Belaidi et al. (2012) realizaram um trabalho no qual o cimento Portland foi parcialmente substituído por pó de mármore de 10 a 40%. A trabalhabilidade do CAA no estado fresco foi medido utilizando testes de espalhamento, teste do tempo de fluxo do funil V, Anel J, Caixa L e testes de estabilidade da peneira, assim como de resistência à compressão nas idades de 7, 28, 56 e 90 dias. Os resultados indicam uma melhora na trabalhabilidade do CAA com o uso de pó de mármore.

Em um trabalho experimental realizado por Ashish (2018) verificou-se que a substituição de 10% e 15% de agregado miúdo por pó de mármore em CAA apresentou efeito positivo em sua resistência à tração por compressão. Também, foi demonstrado pelo autor que a substituição de 10% de cimento por pó de mármore e 20% de substituição combinada de cimento e areia por pó de mármore também resultou em aumento da resistência à compressão.

Estudos confirmaram que a porcentagem ótima de pó de mármore como substituto parcial do cimento no concreto é de 10% (SOUNTHARARAJAN; SIVAKUMAR, 2013, VARDHAN et al., 2015).

No caso da utilização de resíduo pó de mármore em substituição ao agregado fino, o comportamento do concreto é geralmente melhorado com o incremento da porcentagem de substituição (SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016). Demirel (2010) relatou que a força compressiva e o módulo de elasticidade dinâmico do concreto aumentaram com o aumento da porcentagem de resíduo pó de mármore, substituindo a areia muito fina. A utilização desses fillers como substituto da areia mostrou-se mais favorável à utilização como substituto do cimento (SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016).

Tennich, Ouezdou e Kallel (2017) verificaram que a incorporação de resíduos industriais de filler de mármore na produção de CAA tem um efeito positivo sobre a durabilidade do concreto, pois gera um aumento da compactação e reduz a interligação dos poros nos CAA. Desse modo, reduz a penetração de íons de sulfatos agressivos que podem estar presentes no ar, nas águas e solos.

Rodrigues e Melo Filho (2017) investigaram o uso do RBMG em substituição do cimento para confecção do CAA. Todas as misturas atingiram os parâmetros de trabalhabilidade, por meio do teste de espalhamento, T500, Funil V e Caixa L, com exceção da mistura com 40% de RBMG. A maior resistência à compressão foi alcançada com 20%, no entanto na mistura com 30% a resistência ainda foi maior que no controle.

Khodabakhshian et al. (2018) investigaram a influência da substituição parcial de cimento Portland por diferentes proporções de sílica ativa e resíduos de mármore em pó. O fator água/ligante adotado foi 0,45. Foram realizados teste de trabalhabilidade, durabilidade e resistência. Observou-se que a resistência e a durabilidade do concreto melhoram com o uso conjunto de sílica ativa e pó de mármore. O uso combinado de 20% de pó de mármore e 10% de sílica ativa apresentou os melhores resultados e uma redução de 30% do cimento. A resistividade elétrica de todas as misturas aumentou à medida que o conteúdo de sílica ativa passou de 0% a 10%. O valor da resistividade elétrica apresentados aos 91 dias para a mistura 10% de sílica e 20% de pó de mármore foi de 301,9 $\Omega.m$ o que significa um baixo risco de corrosão.

2.6.2.2 Resíduos metálicos

Dash et al. (2016) realizaram uma revisão sobre diferentes tipos de resíduos industriais, que podem ser adequadamente utilizado no concreto como substituição do agregado miúdo. Dentre os resíduos analisados estão: escória de aço (DEVI E GNANAVEL, 2014; QASRAWI et al., 2009; KHAJURIA e SIDDIQUE,2014; KOTHAI e MALATHY, 2014); escória de cobre (AL-JABRI et al., 2009A, B, 2011; ALNUAIMI, 2012; WU et al., 2010; MEENAKSHI e ILANGOVAN, 2011; CHAVAN e KULKARNI, 2013; AMBILY et al., 2015; VELUMANI e NIRMALKUMAR, 2014; POOVIZHI e KATHIRVEL, 2015; WU et al., 2010); escória de forno de fundição (WEEKS et al., 2008; ATZENI et al., 1996; MORRISON et al., 2003), escória de alto forno (YUKSEL et al., 2006, 2007, 2011; VALCUENDE et al., 2015; YUKSEL e GENC, 2007; YUKSEL et al., 2011) e escória de ferro cromo (PANDA et al., 2013).

Qasraw et al. (2009) afirmaram que a utilização de escória de aço afeta negativamente a trabalhabilidade do concreto particularmente as proporções de substituição acima de 50%. Os melhores resultados para resistência à compressão foram obtidos quando as proporções de substituição ficaram em torno de 15 a 30%. Os autores relataram que o uso de escória de aço aumentou a densidade do concreto.

De acordo com Poovizhi e Kathirvel (2015), a densidade do concreto foi aumentada à medida que foi incrementada a substituição da areia por escória de cobre. Houve aumento

máximo da resistência a compressão com 40% de substituição da areia natural por escória de cobre.

Devi e Gananavel (2014) relataram que houve diminuição da trabalhabilidade com aumento da taxa de substituição da areia por escória de aço. Ocorreu um aumento da resistência a compressão do concreto em 27,04% e resistência a tração obteve aumento de 9,29% em relação ao controle na mistura cuja areia foi substituída por 40% de escória de aço.

Al- Jabri et al. (2009) afirmaram que a trabalhabilidade do concreto aumenta com o incremento do teor de escória de cobre nas misturas de concreto e a resistência a compressão aumentou em até 50% de substituição da areia por escória de cobre. Também a resistência a tração foi aumentada nas misturas com até 80% do resíduo sendo o aumento máximo de 26,7% nas misturas com 40% e 50% de substituição. Os autores concluíram que até 40% de substituição de areia por escória de cobre, houve uma diminuição na absorção da água superficial.

Wu et al. (2010) inferiram que a adição de escória de cobre melhora a trabalhabilidade da mistura de concreto, devido à superfície polida e lisa composição e a baixa absorção de característica da escória de cobre. A resistência à tração na mistura de concreto em que o agregado miúdo foi substituído por 40% por escória de cobre foi de 9,6 MPa e 9,3 MPa mistura de controle. Valores inferiores para tal parâmetro foram encontrados nas misturas com 20%, 60%, 80%, 100% do resíduo.

Yuksel e Genc (2007) relataram aumento da trabalhabilidade com uso de escória granulada de alto forno. Os autores observaram que a resistência à tração diminui à medida que a taxa de substituição aumenta.

Yuksel et al. (2006) relataram que a resistência a compressão do concreto com escória de alto forno diminuiu quando a taxa de substituição aumentou. Os valores das resistências a compressão das misturas foram: 15,47 MPa para o referência e 14,83 MPa a 25%, 12,24 MPa a 50%, 10,92 MPa a 75%, 9,66 MPa a 100% de escória de alto forno.

Panda et al. (2013) relataram que com até 100% de substituição da areia de rio por de escória de ferro cromo, não houve significativa mudança na resistência à compressão. O resíduo possui granulometria semelhante à da areia natural.

Valcuende et al. (2015) concluíram que nas primeiras idades, o concreto no qual agregado miúdo foi substituído por escória de alto forno mostram resistência à compressão semelhante ao concreto de referência. No entanto, aos 365 dias devido à reatividade da escória, quanto maior foi a quantidade de areia substituída por escória de alto forno, maior foi a resistência à compressão do concreto.

Velumani e Nirmalkumar (2014) afirmaram que resistência à tração do concreto com substituição de 40% agregado por escória de cobre foi $7,25 \text{ N/mm}^2$ em que a resistência à tração de concreto controle foi de $4,89 \text{ N/mm}^2$. A absorção da água superficial diminui com até 40% de substituição.

Khajuria e Siddique (2014) afirmaram que, ao substituir o agregado miúdo por escória de ferro, a resistência à compressão aumenta com aumento da substituição em até 30%.

Wu et al., (2010) afirmaram que até 40% da escória de cobre em substituição da areia pode obter uma alta resistência à compressão semelhante ou melhor que a mistura de controle.

Rose e Suganya (2015) concluíram que resistência à compressão pode ser aumentada substituindo agregado miúdo por até 40% de escória de cobre.

Chavan e Kulkarni (2013) examinaram a utilização da escória de cobre como substituição da areia nas propriedades de resistência e concluíram que o concreto adquire maior resistência que a mistura do concreto de referência quando 75% do agregado fino é substituído por escória de cobre.

Singh; Siddique (2016) avaliaram as características de durabilidade do concreto autoadensável fabricado com escória de ferro. Os agregados miúdos foram parcialmente (0, 10, 25 e 40%) substituídos por escória de ferro. Todas as misturas continham 455 kg/m^3 de cimento, 10 % CV, 1,2% SP e a relação a/c foi mantida em 0,44. Foram realizados testes de resistência à compressão e durabilidade, como permeabilidade rápida ao cloreto, absorção de água, resistência ao ataque de sulfato e velocidade de pulso ultrassônico até os 365 dias de idade. Além disso os autores analisaram a microestrutura por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e Difração de Raio X (DRX). Os autores concluíram que incorporar escória de ferro proporciona melhor resistência e durabilidade ao CAA.

Os valores do espalhamento, caixa L e caixa U diminuíram com o aumento da escória de ferro, enquanto ocorre um aumento no tempo do funil em V. A trabalhabilidade das misturas diminuiu com o aumento da escória de ferro devido à sua superfície rugosa e a forma angulosa aumenta o atrito entre as partículas.

A resistência à compressão das misturas aumentou com o incremento da substituição da areia por escória de ferro e com a idade. Aos 28 dias, a resistência aumentou em 21% sobre a mistura de controle. A absorção de água das misturas com escória de ferro foi menor que a mistura controle em todas as idades de cura.

A mistura sem escória de ferro obteve desempenho ligeiramente melhor que as misturas com escória de ferro sob ataque externo de sulfato. Houve apenas 10% e 16% de perda na resistência à compressão em 91 e 365 dias após imersão em Mg_2SO_4 . As mistura com escória de

ferro mostraram boa resistência à penetração de íons cloreto. A velocidade de pulso ultrassônico mostra uma excelente condição com escória de ferro em todos os níveis de reposição. Imagens MEV indicam que a estrutura interna do concreto fica mais densa após a inclusão de escória de ferro (SINGH, SIDDIQUE, 2016).

Ismail e Hashmi (2008) realizaram vários testes para avaliar a qualidade do concreto com reutilização de resíduos de ferro em substituição da areia em concreto. Até 20% de substituição obtiveram maior resistência à compressão que o concreto controle. Os valores do espalhamento diminuíram com aumento da adição do resíduo.

Chitra e Kumar Senthil (2016) investigaram concreto de alta resistência preparado escória de cobre como substituto dos agregados miúdos em até 40% e nano-sílica até 2% de substituição do CP. Os resultados mostram baixa permeabilidade ao cloreto aos 28 e 90 dias. A absorção de água foi reduzida com o aumento do teor de escória de cobre.

Deboucha et al. (2015) constataram que a escória de alto forno melhoraram a resistência e propriedades de durabilidade de misturas de concreto

Devi e Gnanavel (2014) concluíram que a substituição parcial de agregados miúdos por escória de aço aumentou a propriedade de resistência e diminuiu a penetração rápida dos íons cloreto.

Sheen et al. (2015) utilizaram escória de aço inoxidável com diferentes áreas específicas, 1766 e 7990 cm²/g como material de enchimento (filler) e substituto do cimento respectivamente. O concreto controle foi feito com 469 kg/m³ de cimento e as substituições de 10 a 50% por escória de aço; filler (108 kg/m³), areia (791 kg/m³), brita (829 kg/m³), SP (1,4%) e a/c (0,39) foram mantidos constantes. Os resultados de espalhamento, T500 e funil V foram alcançados em todas as misturas até 50% de substituição. A resistência a compressão desejada, de 35 MPa, foi atingida nas misturas com até 30% aos 28 dias. Nas porcentagens de 40 e 50% de substituição, a resistência diminuiu drasticamente. A maior resistividade e dureza superficial foram obtidas com 10% e 50% de escória de aço, respectivamente.

Sharma e Khan (2018) investigaram a durabilidade do CAA com escória de cobre (EC) em substituição ao agregado miúdo e o metacaulim (MK) em substituição das cinzas volantes (CV). O concreto controle era composto de 60% CP, 40% CV e 0% de EC. As misturas foram feitas mantendo 60% CP, 30% CV, 10% MK e diferentes proporções de 0 a 100% de EC. As propriedades do CAA no estado fresco pioraram com 10% MK e 0% de EC. As resistências à compressão e tração melhoraram em relação ao controle, sendo o melhor resultado com 20% EC. A profundidade mínima de CO₂ foi encontrada na mistura com 100% EC, a máxima resistividade

elétrica e resistência aos sulfatos na mistura com 20% EC e a absorção superficial foi menor em todas as misturas com EC.

Ismail e Hashmi (2008) realizaram vários testes para avaliar a qualidade do concreto com reutilização de resíduos de ferro em substituição ao conteúdo de areia em torno de 10%, 15% e 20%. De acordo com os autores, foi verificado que as misturas de concreto feitas com resíduos de ferro apresentaram maior resistência à compressão e resistência à flexão que as misturas de concreto de controle.

O uso de escórias de ferro em substituição a parte do agregado fino em CAA proporciona ganhos de resistência e durabilidade ao concreto. As adições minerais promoveram redução da permeabilidade do concreto e consequente aumento da durabilidade e resistência mecânica (LEITE; MOLIN, 2002; DAL MOLIN, 2005), assim como melhoram a resistência na zona de transição.

Durante o processo de retificação e de usinagem podem ser gerados vários subprodutos, tais como cavacos de metais, fluidos de cortes e pó metálico, que consomem recursos, ou geram custos (AGRAWAL; KHARE, 2013). No processo de usinagem uma grande quantidade de cavacos é gerada, podendo representar até 50% do material bruto depois da usinagem; assim, estes cavacos provenientes dos processos de usinagem são um exemplo de resíduo industrial que merece destaque (SHAIBANI; GHAMBARI, 2011).

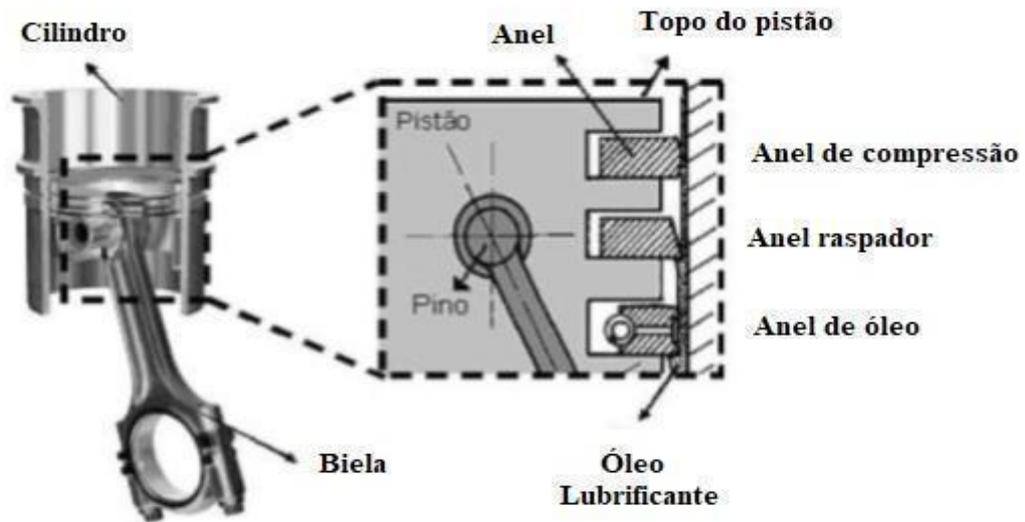
Na fabricação de peças automotivas, dentre elas os anéis de pistão, para que se possam obter os materiais com as características necessárias e as tolerâncias exigidas, estes materiais são submetidos a vários processos de usinagem, e geram uma quantidade muito grande de resíduos.

Na próxima seção serão detalhados os processos de fabricação de anéis de pistão, dos quais, os resíduos do processo de retificação serão utilizados na confecção do concreto autoadensável neste estudo.

2.6.3 PRODUÇÃO DE ANÉIS DE PISTÃO

Os anéis que são empregados em pistões de motores de combustão interna compensam a folga entre o pistão e o cilindro, e geram uma vedação necessária para uma boa compressão do motor e um melhor rendimento (AOKI, 2003). Os anéis de pistão são divididos em três tipos: os anéis de compressão, anéis raspadores e anéis de óleo. Na Figura 2.8 pode-se observar um cilindro em corte, no qual são mostrados o pistão e os anéis de pistão, onde é possível observar os três tipos de anéis.

Figura 2.8: Cilindro em corte, com os anéis de pistão.



Fonte: FERRARESE (2004).

De acordo com Ferrarese (2004), o anel de compressão é o principal responsável pelo desempenho do conjunto quanto à vedação dos gases da combustão dentro do cilindro. Este componente deve suportar as temperaturas e pressões altas geradas durante o processo de combustão, assim deve ser responsável pela vedação adequada, evitando que os gases escapem.

O segundo anel de pistão é também caracterizado como um anel de compressão, também chamado de anel raspador. Este anel tem como principal função raspar o excesso de óleo deixado na parede do cilindro. O anel inferior, da terceira canaleta, é denominado de anel de óleo e tem como principal função o controle do filme de óleo na parede do cilindro deixado para os outros anéis.

Os anéis de pistão podem ser fabricados atualmente de ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular ou aço, todos com os mais diversos revestimentos, de acordo com a solicitação a que o anel está sujeito (MAHLE, 2016; LAMOGLIA, 2017) como:

- a) Ferro Fundido Cinzento: estes materiais são obtidos por meio do processo de fundição estática, este material possui uma elevada resistência ao desgaste, boa usinabilidade e baixo custo.
- b) Ferro Fundido Nodular: este material é obtido por meio do processo de fundição centrífuga, possuindo módulo de elasticidade e dureza maiores se comparado ao ferro fundido cinzento. Geralmente, os anéis fabricados com este material requerem algum tipo de cobertura em sua face de trabalho, sendo o cromo e o molibdênio os mais usuais.

- c) Aço: obtido por meio de processo de laminação, possui módulo de elasticidade maior que os ferros fundidos, sendo muito utilizado em anéis com altura reduzida; além disso, os aços inoxidáveis recebem tratamento de nitretação.

Para a fabricação dos anéis de pistão e obtenção da geometria e seção transversal com as dimensões e tolerâncias exigidas, estes materiais durante o processo são submetidos a operações de desbaste e acabamento. Um dos processos utilizados é a retificação que é caracterizada pela remoção dos materiais de uma peça, realizadas por meio da ação de grãos abrasivos, presentes nas ferramentas de corte. Estes grãos abrasivos são capazes de remover pequenas quantidades de materiais que estão presentes na superfície por meio do processo de corte acarretando a formação de cavacos. O processo de retificação é geralmente utilizado para as operações de acabamento, que possibilita a obtenção de tolerâncias apertadas e baixas rugosidades (KALPAKJIAN; SCHMID, 2008). A seguir serão detalhados os processos de retificação de anéis de pistão (LAMOGLIA, 2017).

Uma das operações utilizadas para a confecção de anéis de pistão é a retificação bruta de topo, que consiste na remoção de material das pontas do anel por ação de discos denominados de rebolos. Nesta etapa, os anéis são submetidos a processos de usinagem das faces das pontas por discos de corte. Os anéis são fechados em um formato circular, em seu diâmetro nominal, sendo empurrados através de buchas que possuem o mesmo diâmetro. Conforme demonstrado na Figura 2.9:

Figura 2.9: Operação de retificação de topo para a fabricação de anel de pistão.



Fonte: Mahle Componentes de Motores do Brasil Ltda (2016), LAMOGLIA (2017).

Outra operação utilizada para o processo de fabricação é o processo de retificação lateral que pode ser realizada por meio de dois rebolos abrasivos que giram em sentidos contrários. Estes rebolos removem o material simultaneamente das laterais do anel, que ajustam a altura da peça a uma medida específica. Neste processo, devido à uma grande quantidade de material a ser removido, é necessário a realização da operação de desbaste em várias etapas (LAMOGLIA, 2017). Para as operações de desbastes do material metálico ferroso das faces laterais dos anéis de segmento são utilizados ferramentas de corte abrasivo, conforme mostrado na Figura 2.10.

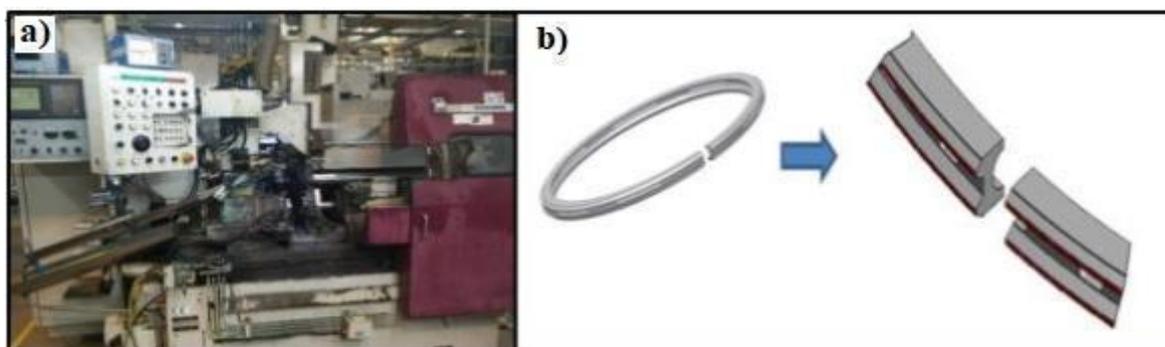
Figura 2.10: Retífica de anéis de pistão com rebolo vertical (Grupo Mahle).



Fonte: Teixeira (2007).

O processo de retificação de perfil é uma das mais importantes do processo de fabricação dos anéis de pistão. Este processo consiste na retificação da face de trabalho, assim obtém-se o material com as características, perfil final. Neste processo, os anéis são fechados em formato de árvore sendo separados por espaçadores. Este processo de retificação por perfil é controlado por Torno CNC (Controle Numérico Computadorizado). Na Figura 2.11.a é mostrado a retificadora de perfil, enquanto que na Figura 2.11.b é mostrado a face de trabalho (DANTAS, 2015).

Figura 2.11: (a) Retificadora de perfil (b) Face de trabalho.



Fonte: Dantas (2015).

2.7. PRODUÇÃO DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS-CAA

A partir do desenvolvimento do CAA realizado no Japão foram criados diversos métodos de dosagem. Os métodos de dosagem são importantes, pois selecionam as melhores misturas e a quantidade de matérias-primas em proporções ideais para dar ao concreto as propriedades necessárias em estados frescos e endurecidos para aplicações específicas (SHI, et al. 2015).

O objetivo do processo de dosagem de concreto é a obtenção por meio da utilização de cálculos, de um traço com a melhor composição, que ao ser reproduzido, garanta a obtenção de um concreto que apresente as condições requeridas de trabalhabilidade, com o menor teor de argamassa possível (RECENA, 2011).

De acordo com Okamura e Ouchi (2009), o método de dosagem do CAA tem como objetivo atender aos requisitos de deformabilidade, resistência à segregação e capacidade de passar por restrições no estado fresco, sendo que a dosagem não é feita em função da resistência à compressão, pois as relações de água/aglomerante são na maior parte, suficientemente pequenas para garantir bons resultados de resistência a compressão (MELO, 2005).

Diferentes metodologias de dosagem para obtenção do CAA são encontradas na literatura. Baseado nos princípios de projeto, esses métodos podem ser classificados em cinco categorias: método de projeto empírico, método de resistência à compressão, método de empacotamento, métodos baseados em modelo fatorial estatístico e modelo de reologia de pasta (SHI et al., 2015; SHAHIDAN; ISHAM; JAMALUDDIN, 2016).

O método de empacotamento compressível parte dos estudos de De Larrard (1999), sobre o princípio da maior quantidade de agregados e menor espaço de vazios entre eles. Este método possibilita uma grande compacidade granular que proporciona um concreto com baixo fator a/c e de baixa porosidade.

Neste método, o primeiro passo é determinar as propriedades de todos os materiais; depois, faz-se as misturas dos agregados para se obter o melhor empacotamento. Em seguida faz-se os ajustes da pasta com base no concreto fresco, viscosidade e tensão de escoamento (μ , τ_0), e concreto endurecido, resistência à compressão e módulo de elasticidade. Conforme De Larrard (1999) e Gomes e Barros (2009), a tensão de escoamento para CAA está em torno de 200 a 500 Pa e a viscosidade entre 200 a 300 Pa.s (GOMES; BARROS, 2009).

O método de dosagem empírico é baseado em dados empíricos envolvendo o conteúdo de agregados graúdos e miúdos, de água e cimento e a dosagem de superplastificante para determinar as proporções de mistura. As melhores proporções de misturas necessárias para atingir as propriedades de um CAA são encontradas por meio de vários testes e ajustes dos seus componentes.

O método de resistência à compressão determina a quantidade de cimento, aditivos minerais, água e conteúdo de agregado, com base na resistência à compressão necessária. Neste método se destaca a contribuição de Kheder e Jadiri (2010), baseado no método EFNARC para a dosagem de CAA. Nesse método, o conteúdo de agregados graúdos depende do seu tamanho máximo e dos agregados finos, do módulo de finura. O teor de água foi determinado com base

no tamanho máximo do agregado e na resistência do concreto. A relação de a/c e do volume de água/pó foram determinados pela resistência à compressão do concreto.

Outro estudo que se baseou na dosagem utilizando o método de resistência à compressão foi desenvolvido por Dinakar, Sethy e Sahoo (2013), que propuseram um método de dosagem para uso de escória de alto forno granulada. Neste estudo, o teor total de pó foi fixado na primeira etapa e a porcentagem de escória foi fixada com base na resistência necessária.

Assim como é determinado o teor de água necessário para o CAA, conforme Shi et al. (2015) foram determinados os agregados graúdos e miúdos utilizando curvas de agregados combinadas, baseadas nas normas *DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.)*. Finalmente, a autocompatibilidade do concreto no estado fresco foi avaliada por meio da medição de fluidez do fluxo de queda no teste do funil-V e da capacidade de passagem através do teste de caixa L (SHI et al., 2015).

O método de modelo fatorial estatístico é baseado em estatística e nos efeitos de diferentes parâmetros, tais como o conteúdo de misturas de cimento e minerais, proporção água/pó, volume de agregado graúdo e dosagem de SP, assim como a trabalhabilidade e resistência à compressão de CAA no estado fresco e endurecido. Intervalos razoáveis para cada parâmetro são determinados e misturados na proporção que é calculada de acordo com o projeto da mistura para o concreto (SHI et al., 2015).

Os modelos estatísticos são válidos para uma ampla gama de proporções de mistura e são capazes de prever as propriedades de trabalhabilidade do CAA. Assim, por meio de todas as proporções de mistura de CAA previstas como adequadas para o alvo das propriedades de trabalhabilidade, pode encontrar-se a mistura mais econômica e robusta para conseguir a otimização da mistura de CAA (NIE; AN, 2016).

Um modelo de reologia da pasta de concreto foi desenvolvido por Saak et al., (2001). Este método proposto para a matriz da pasta relaciona a resistência à segregação e trabalhabilidade do concreto fresco com uma dada distribuição específica para o tamanho de partícula e fração volumétrica do agregado. A aplicabilidade do método é testada medindo as propriedades de fluxo do concreto fresco. Além disso, deve ocorrer a existência de uma tensão de escoamento e viscosidade mínima da pasta de cimento, para evitar a segregação sob condições estáticas e dinâmicas (SHI et al., 2015; FERRARA; PARK; SHAH, 2007).

Esses fatores, juntamente com a forma dos agregados, influenciam o conteúdo de vazios e o diâmetro médio das partículas do esqueleto sólido. De acordo com Saak et al. (2001), o diâmetro médio das partículas do esqueleto sólido é calculado pela Equação 6:

$$D_{av} = \frac{\sum_i d_i m_i}{\sum_i m_i} \quad (6)$$

Onde: d_i é o diâmetro médio da fração de agregados i e m_i é a quantidade de massa da fração.

Na próxima seção serão apresentados alguns métodos relacionados com o processo adotado neste trabalho.

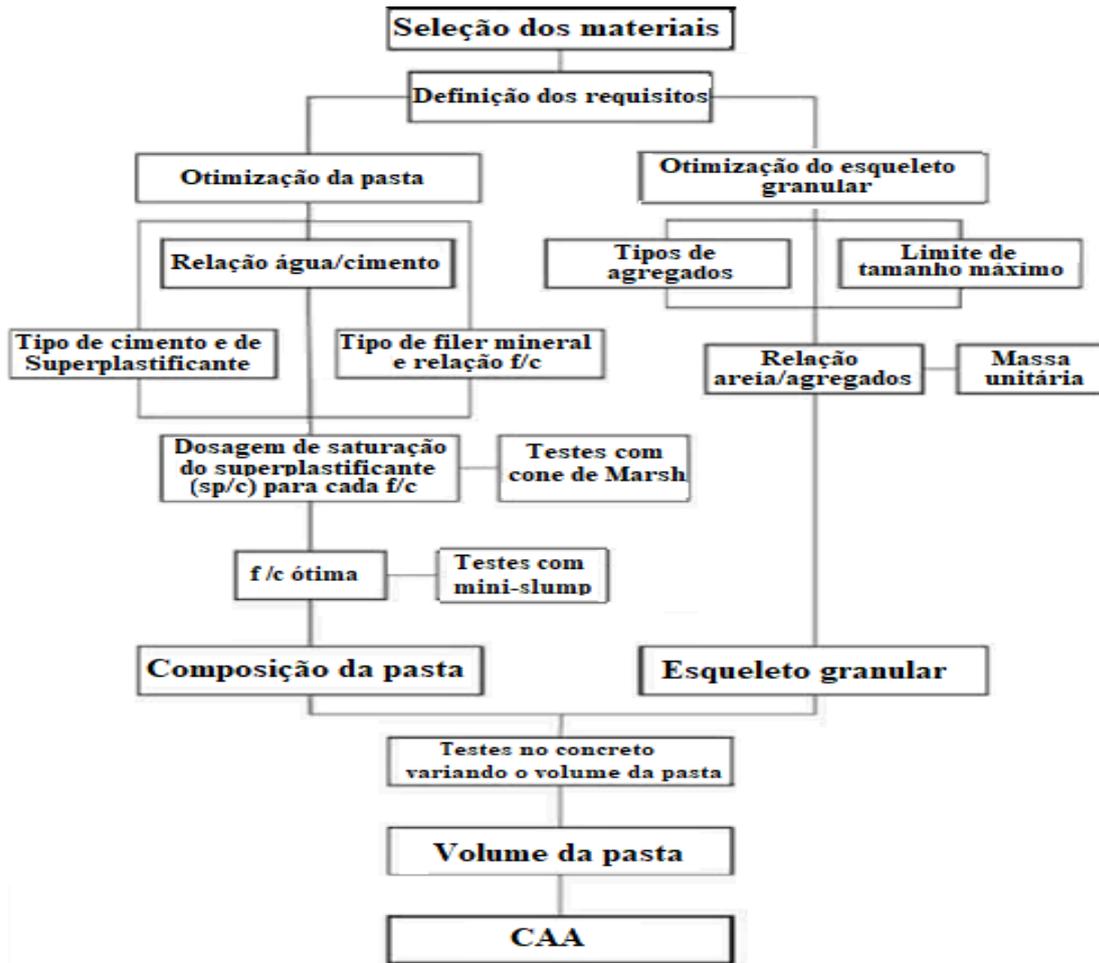
2.7.1. Método de dosagem de Gomes, Gettu e Agulló

Este método sugere que tanto a viscosidade quanto a fluidez da pasta governam o comportamento do fluxo de concreto. A composição da pasta é definida pela quantidade de cimento e das relações dos demais componentes da pasta em função da massa do cimento, tais como: água (a/c), superplastificantes (sp/c), pozolanas (sf/c), e filler f/c (GOMES; BARROS, 2009).

Este método é caracterizado por um caráter empírico para a obtenção da dosagem do CAA que apresente uma alta resistência. A metodologia proposta assume que o concreto pode ser obtido otimizando-se a composição da pasta e o esqueleto granular separadamente (GOMES; BARROS, 2009). No estudo para a obtenção da pasta do concreto procura-se determinar duas relações massa do superplastificante/massa do cimento e uma relação da massa do filler / massa do cimento (PEREIRA, 2010).

Neste método, a relação de água / finos deve ser fixada, em princípio, no limite superior de até 0,4, e depois deve ser diminuída, até que se atinja uma resistência requerida para o concreto. Em relação ao esqueleto granular, deverá ser adotado um tamanho característico máximo para o agregado, de 20 mm (LISBOA, 2004). Também, deve-se diminuir o volume dos vazios entre os grãos do agregado, assim diminuir-se-ia a necessidade de um aumento da pasta para que ocorresse a lubrificação, atenuando o processo de retração e porosidade do concreto (TUTIKIAN, 2004). A Figura 2.12 mostra uma sequência do método de dosagem proposto por Gomes et al., (2009) para o CAA.

Figura 2.12: Diagrama que descreve o método de dosagem proposto por Gomes e Barros.



Fonte: Gomes e Barros (2009).

Com a quantidade de água e aglomerantes fixados, as pastas serão ensaiadas com diversas relações de f/c , para a definição do ponto que ocorre a saturação do aditivo através do ensaio do cone Marsh. Após este ensaio, a pasta de CAA é ensaiada no mini abatimento, quando deve apresentar um espalhamento igual a 180 ± 10 mm, e deve preencher o diâmetro de 115 mm em um intervalo compreendido entre 2s a 3,5s. Com a composição de pasta e do esqueleto granular definido, o concreto deve ser ensaiado com diversas proporções de pasta até ser encontrado um teor mínimo que atinja os requisitos necessários para ser caracterizado como CAA, atendendo aos parâmetros nos experimentos de espalhamento, Funil V, caixa L e tubo U (PEREIRA, 2010).

A partir dos dados dos agregados, das densidades e do peso de cada componente, obtém-se o peso unitário e o volume de cada mistura. Para a determinação do teor de vazios são utilizadas as equações 7, 8 e 9 (GOMES; BARROS, 2009):

$$\rho_{adm} = \left[\frac{\rho_s * s / a(\%) + \rho_b * b / a(\%)}{100} \right] \quad (7)$$

Onde: ρ_s e ρ_b são as densidades secas da areia e da brita, respectivamente e s/a e b/a são as relações areia/agregados e brita/agregados em porcentagem de mistura.

$$v(\%) = \left(\frac{\rho_{adm} - \varpi_u}{\rho_{dm}} \right) \times 100 \quad (8)$$

Onde: v (%) é o percentual do teor de vazios, ρ_{dm} a densidade da mistura seca e ϖ_u o peso unitário da mistura. O valor de ϖ_u é obtido por meio da Equação 9.

$$\varpi_u = \frac{\omega_t}{V_t} \quad (9)$$

Onde ω_t e V_t são o peso total e o volume total da mistura, respectivamente.

2.7.2. Método de dosagem de Repette e Melo

O método de Repette-Melo é caracterizado pela dosagem de composição baseado em valores de resistências à compressão pré-determinadas, nos quais, a quantidade de água/cimento são determinados por meio dos valores de resistências conhecidas. Este ensaio consiste no estudo reológico da pasta de cimento utilizando o cone de Marsh (teste de fluidez), além da utilização do ensaio reométricos. Estes ensaios têm como objetivo a determinação dos teores ótimos para o aditivo superplastificante, dos agregados miúdos; e além da determinação da composição do CAA, que é feita por meio da incorporação de agregados graúdos e novo ajuste do teor de aditivo (MELO, 2005).

No item 2.8 serão detalhados os principais ensaios utilizados no estado fresco e endurecido para a confecção do CAA.

2.8 ENSAIOS PARA O CAA

As principais características que o CAA deve possuir no estado fresco são: a capacidade de preencher o interior das formas sem necessidade de vibração, assim como a capacidade de passagem entre os obstáculos, sem a obstrução que pode ocorrer em função do agregado graúdo, assim como a resistência à segregação (CAVALCANTE, 2006).

2.8.1. Ensaio auxiliares para estudo da pasta e da argamassa autoadensáveis

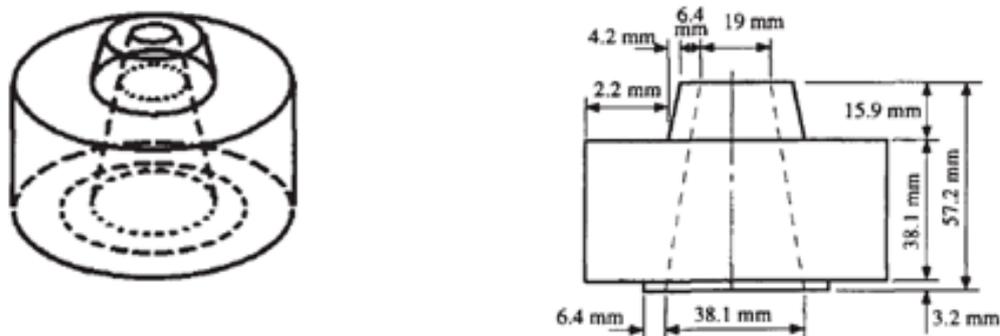
Para se obter um CAA com as características supracitadas, é necessário que a pasta e a argamassa tenham propriedades de alta fluidez e moderada viscosidade. Nos próximos itens serão abordados os ensaios para caracterização da pasta e da argamassa.

2.8.1.1 Ensaio de pasta Miniabatimento (Kantro)

O ensaio de pasta de miniabatimento foi proposto por Kantro (1980). Este ensaio é utilizado para o estudo da interação do aditivo com o cimento Portland utilizado, ou mesmo com o conjunto dos materiais aglomerantes ou finos em geral. Testando vários tipos de superplastificante, busca-se o de melhor desempenho. Além de poder selecionar o melhor aditivo para determinado tipo de cimento, o ensaio indica o ponto de saturação correspondente à máxima dosagem deste material. Em outras palavras, a partir deste ponto nenhuma influência significativa ocorrerá na fluidez da pasta aumentando a dosagem do superplastificante (PEREIRA, 2010).

O ensaio consiste em preencher o interior do tronco de cone com a pasta a ser estudada e verificar o diâmetro de espalhamento do fluido ao levantar o molde, que deve estar dentro do limite de (180 ± 10) mm. O equipamento de ensaio de miniabatimento de Kantro é ilustrado na Figura 2.13.

Figura 2.13: Ensaio da pasta -Miniabatimento proposto por Kantro.



Fonte: AITCIN (2004).

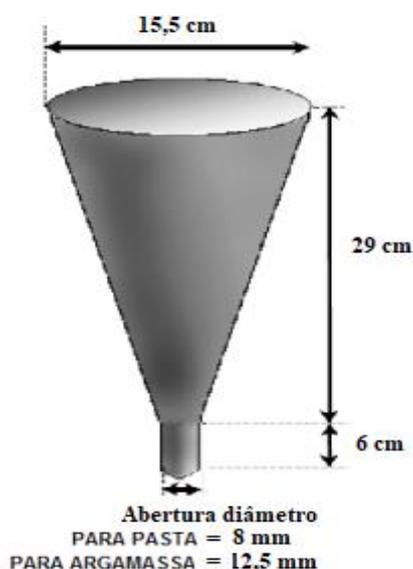
O ensaio também, pode ser analisado o tempo que a pasta leva para ultrapassar o diâmetro de 115mm (T115), que deve estar dentro do limite de (3 ± 1) s. Deste modo, a pasta que estiver dentro dos limites estabelecidos terá uma relação de filler calcário e sílica ativa com relação ao cimento considerada como sendo ótima (GOMES, 2002; GETTU; AGULLÓ, 2004; BARBOZA, 2018).

2.8.1.2 Ensaio de pasta - Cone de Marsh

O ensaio com o Cone de Marsh é usado para avaliar a saturação do aditivo, bem como avaliar o índice de fluidez de pastas de cimento para injeção, de acordo com a norma NBR 7682 (ABNT,1983). O ensaio consiste em medir o tempo necessário para fluir certa quantidade de material através do orifício inferior do cone. A Figura 2.14 apresenta as especificações para o equipamento utilizado para o ensaio de fluidez- Cone de Marsh.

Ensaio de miniabatimento e o do cone de Marsh devem ser considerados em conjunto, pois o ensaio de miniabatimento está mais relacionado à tensão de escoamento, enquanto que o cone de Marsh se refere à viscosidade (Castro, 2003).

Figura 2.14: Ensaio de fluidez- Cone de Marsh.



Fonte: Gomes (2002).

2.8.1.3 Ensaio da argamassa – Mini Cone e Mini Funil

As propriedades de alta fluidez e moderada viscosidade, exigidas para a argamassa, são alcançadas variando a dosagem de superplastificante e a relação água/materiais finos (OKAMURA et al., 2000).

De acordo com Gomes (2003), os parâmetros que definem a fluidez e a viscosidade da argamassa são obtidos por meio da Equação (10):

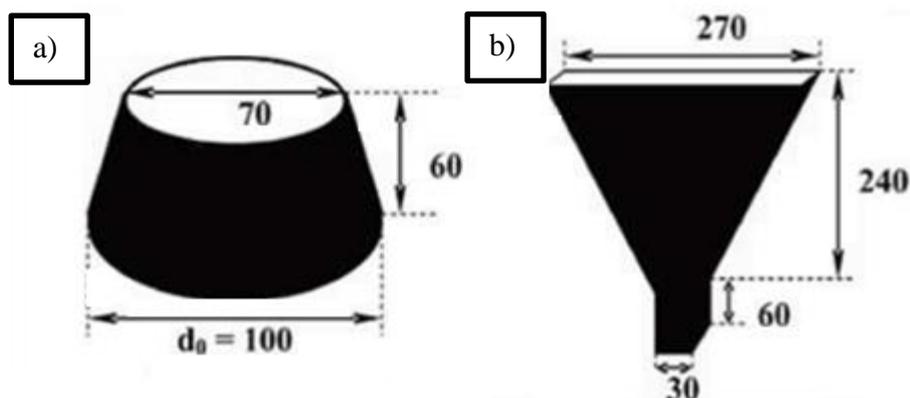
$$Gm = \frac{(d_1 * d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad (10)$$

Onde:

- G_m : é determinado por meio de duas medidas perpendiculares do diâmetro de espalhamento.
- d_1 e d_2 : diâmetros de espalhamento da argamassa (mm)
- d_0 : diâmetro da base do cone (mm).

Outro parâmetro que pode ser obtido é o valor de R_m , determinado medindo o tempo que a argamassa leva para fluir pelo funil, sendo t em segundos. Um elevado valor de G_m indica maior deformabilidade, e menor valor de R_m indica maior viscosidade. Argamassas com valores de $G_m = 5$ e $R_m = 1$ são consideradas bem aceitáveis para obter concretos com propriedades autoadensáveis (GOMES, 2002). Na Figura 2.15.a é obtido o valor de G_m que é medido através do ensaio do tronco de cone de consistência e o valor de $R_m = 10 / t$, que é medido através do ensaio no Funil-V para argamassa, de acordo com a Figura 2.15 (b).

Figura 2.15: Ensaio característicos para argamassa: a) Cone de consistência; b) Funil- V.



Fonte: Gomes (2002).

Nestes ensaios devem ser adotados os valores para $G_m \geq 8$, que correspondem a diâmetros de espalhamento ≥ 300 mm: e R_m de 1 a 5, correspondentes a tempos de fluxo (t) de 2 s a 10s (GOMES, 2002).

2.8.2. Ensaio específicos para avaliação do CAA no estado fresco

Para que o concreto seja considerado autoadensável, ele deve possuir alguns critérios (valores) necessários para concreto no estado fresco; os ensaios a serem realizados. Também, a faixa de valores necessários a serem alcançados após os ensaios estão descritos na Tabela 2.5.

Pelos resultados dos ensaios e parâmetros pode-se correlacionar o comportamento do concreto com os componentes e realizar os possíveis ajustes, ou seja, se o concreto estiver muito fluido e com baixa viscosidade, deve-se aumentar a quantidade de materiais finos. Caso aconteça a segregação, deve-se melhorar o empacotamento ou reduzir o tamanho das britas.

Tabela 2.5: Parâmetros para ensaios de autoadensamento

| PROPRIEDADES | ENSAIOS | PARÂMETROS CLASSE | FAIXA |
|-------------------------------|---|---|--------------------|
| Habilidade de preenchimento | Ensaio de espalhamento (<i>Slump flow test</i>) | SF 1 | ESPALHAMENTO |
| | | SF 2 | 550 a 650 mm |
| | | SF 3 | 660 a 750 mm |
| Ensaio de Viscosidade | T ₅₀₀ | VS 1 | TEMPO |
| | | VS 2 | ≤ 2 s |
| | | | >2 s |
| Capacidade de passagem | Funil V | VF 1 | < 9 s |
| | | VF 2 | 9 a 25 s |
| | | | |
| Estabilidade a segregação | Caixa L (H2/H1) | PL1 | ≥0,80c/2barras |
| | | PL2 | ≥0,80c/3barras |
| | | | |
| Estabilidade a segregação | Anel J mm | PJ1 | 0 a 25 c/16barras |
| | | PJ2 | 25 a 50 c/16barras |
| | | | |
| Estabilidade a segregação | Caixa U (H2-H1) | PU | ≤30 mm |
| | | | |
| | | | |
| Índice de estabilidade visual | Método da coluna de segregação | SR 1 | ≤20% |
| | | SR 2 | ≤15% |
| | | | |
| Índice de estabilidade visual | IEV 0 | Sem evidência de segregação ou exsudação | |
| | IEV 1 | Sem evidência de segregação e leve exsudação | |
| | IEV 2 | Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto | |
| | IEV 3 | Segregação claramente evidenciada pela concentração agregados centro do concreto ou pela dispersão argamassas nas extremidades (auréola argamassa >10 mm) | |

Fonte: NBR 15583-1: (ABNT,2017) adaptado.

Os métodos de ensaios mais utilizados para o concreto no estado fresco estão descritos nas normas ABNT e ASTM apresentadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Normas de ensaio para CAA no estado fresco.

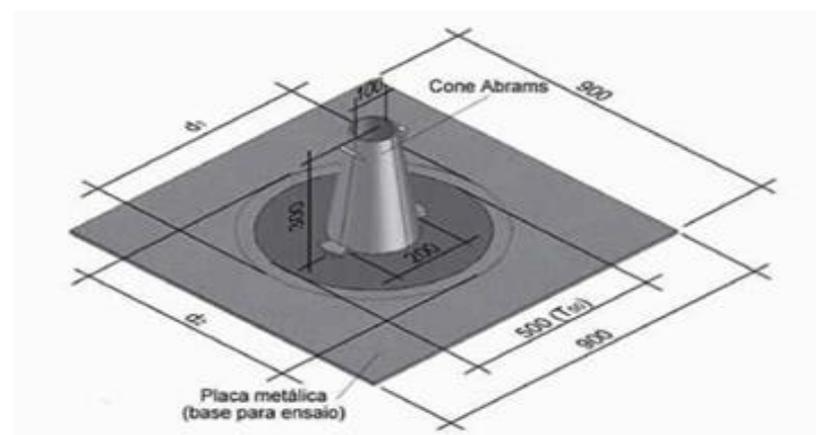
| | ABNT | ASTM |
|--|------------------|---------------------|
| Espalhamento e tempo de escoamento tronco de cone Slump flow test | NBR 15823-2:2017 | C 1611/C1611 M:2009 |
| Habilidade passante, Anel J | NBR 15823-3:2017 | C 1621:2014 |
| Habilidade passante, Caixa L | NBR 15823-4:2017 | - |
| Viscosidade, Funil V | NBR 15823-5:2017 | - |
| Segregação, coluna | NBR 15823-6:2017 | C 1610:2010 |

Fonte: (Próprio autor)

2.8.2.1 Ensaio de Espalhamento

O cone de Abrams é utilizado para medir a fluidez do CAA, sua habilidade de preenchimento em fluxo livre através do diâmetro de espalhamento formado pelo concreto e pelo tempo que o concreto leva para abranger um diâmetro de 500 mm. A segregação pode ser avaliada visualmente por meio do Índice de Estabilidade Visual (IEV). O método de ensaio consiste em encher um tronco de cone de concreto sem adensar, colocado sobre uma placa metálica, 900 por 900 mm, com a marcação centralizada de um círculo de diâmetro de 500 mm (Figura 2.16). Assim que levantar o tronco do cone deve-se acionar um cronômetro e marcar o tempo decorrido para atingir o diâmetro de 500 mm e depois fazer duas medidas perpendiculares do diâmetro final do espalhamento do concreto, d_1 e d_2 . (TUTIKIAN; MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009).

Figura 2.16: Cone de Abrams – Slump Flow test (dimensões em mm).



Fonte: Gomes e Barros, 2009

Por meio dos ensaios de fluidez, medida pelo teste de slump-flow, os CAA podem ser classificados em três classes de fluxo de queda classificadas como (EFNARC, 2005; MASSANA et al., 2018; ABNT NBR 15823-1:2017):

- SF1 (550-650 mm) é apropriado para estruturas de concreto não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, moldadas a partir do topo com deslocamento livre e distância curta do ponto de entrega (por exemplo, lajes, estacas e certas fundações profundas).
- SF2 (660-750 mm) é adequado para maioria das aplicações correntes (por exemplo, vigas, pilares e paredes).
- SF3 (760-850 mm) é normalmente produzido com um tamanho máximo de agregado graúdo (menores que 12,5mm) e usado para aplicações verticais em estruturas com alta densidade de armadura e/ou estruturas com formas complexas (por exemplo, pilares-parede, paredes-diafragma e pilares).

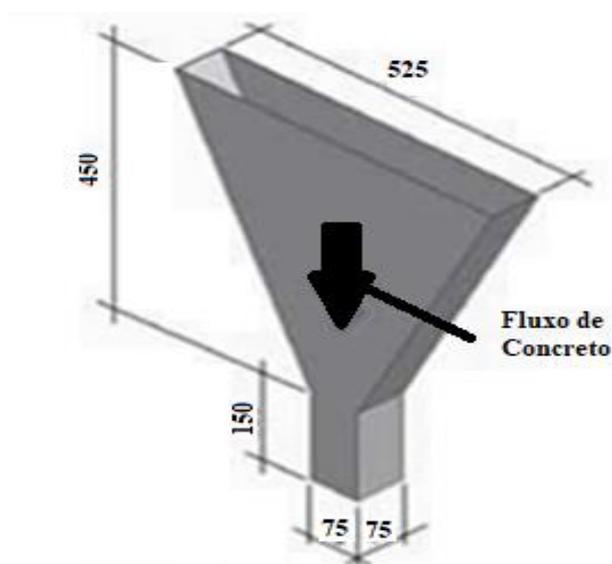
Também neste ensaio determina-se o índice de estabilidade visual (IEV) do material visualmente e classifica-se o concreto em 4 classes:

- IEV 0 (altamente estável);
- IEV 1 (estável);
- IEV 2 (instável);
- IEV 3 (altamente instável);

2.8.2.2 Ensaio de Viscosidade - Funil V

O ensaio do funil é utilizado para determinar a viscosidade do concreto autoadensável pela medida do tempo de escoamento do material pelo funil V (ABNT NBR 15823-5:2017). O ensaio é realizado utilizando um funil em forma de V, conforme mostrado na Figura 2.17, e com um cronômetro, é medido o tempo que o material (10 litros) leva para escoar sem segregar (TUTIKIAN; MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009).

FIGURA 2.17: Figura do Funil V (dimensões em mm).



Fonte: **Gomes e Barros, 2009.**

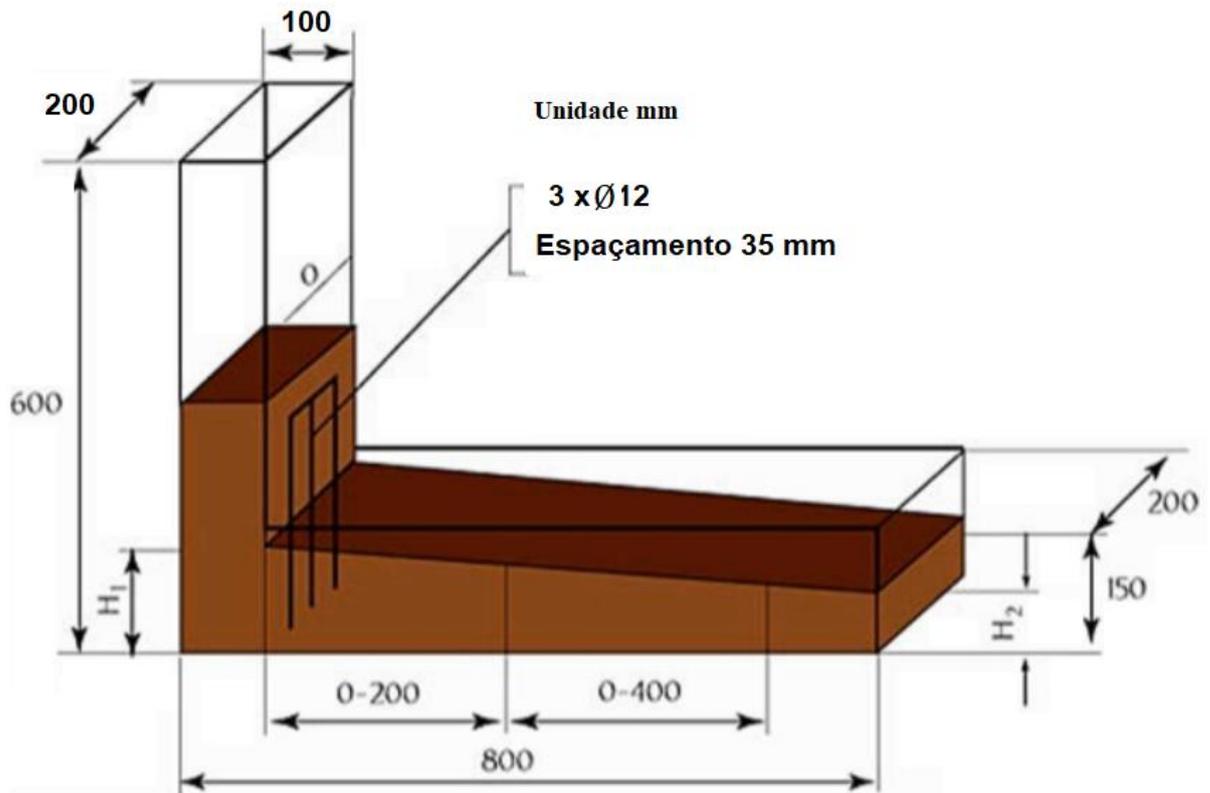
Os CAA podem ser classificados em duas classes de viscosidade plástica aparente como (ABNT NBR 15823-5:2017):

- VF1 \leq 8 s, adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas requer controle da exsudação e da segregação (por exemplo, pilares-parede, paredes-diafragma, indústrias de pré-moldados e concreto aparente).
- VF 29 a 25 s, adequado para maioria das aplicações correntes (por exemplo, vigas, lajes e outras).

2.8.2.3 Ensaio da Capacidade de passagem - Caixa L

O ensaio de caixa L é usado para medir fluidez e habilidade de passagem do concreto por obstáculos devendo permanecer coeso. Consiste em encher de concreto a coluna da Caixa L (Figura 2.18) e após, abrir a comporta onde se encontram as barras de aço espaçadas, marcar o tempo que o concreto atinge a marca de 20 e 40 cm. Então, com uma régua medir as alturas inicial (H_1) e final (H_2) de preenchimento da forma. A razão entre as alturas indica a fluidez e capacidade de preenchimento do concreto (TUTIKIAN; MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009).

Figura 2.18: Caixa L



Fonte: (EFNARC, 2002)

Para a capacidade de passagem que é a habilidade do concreto em fluir através de espaços confinados e aberturas apertadas sob seu próprio peso. O teste é calculado por meio da Caixa-L e a capacidade de passagem pode ser calculada pela seguinte Equação 11:

$$\text{Habilidade passante} = \frac{H_2}{H_1} \quad (11)$$

Onde: H_1 e H_2 indicam a altura do concreto fresco atrás do portão e no final da caixa, respectivamente.

Os CAA podem ser classificados em duas classes de habilidade passante (ABNT NBR 15823-4:2017; LANGAROUDI; MOHAMMADI, 2018):

- PL1 $\geq 0,80$ com duas barras de aço, adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80mm a 100mm (exemplos: lajes, painéis, elementos de fundação)
- PL2 $\geq 0,80$ com três barras de aço, é adequado para maioria das aplicações correntes, elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60mm a 80mm (por exemplo vigas, pilares, tirantes e indústrias de pré-fabricados)

2.8.2.4 Ensaio da Estabilidade e Segregação - Método da Coluna

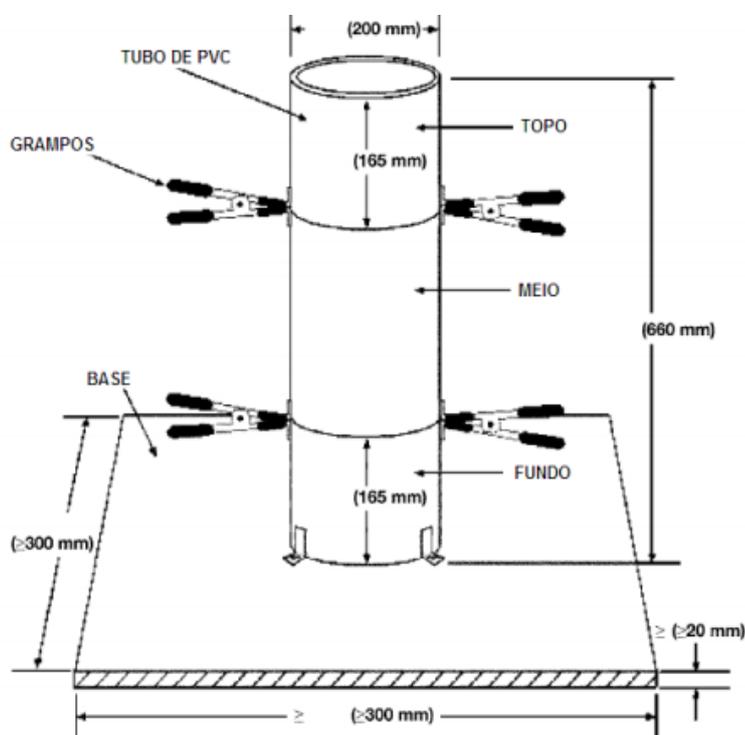
A resistência à segregação é fundamental para a homogeneidade e a qualidade do CAA, e é particularmente importante em concretos autoadensáveis de maior fluidez e baixa viscosidade. O CAA sofre segregação dinâmica durante o lançamento e segregação estática após o lançamento (ABNT NBR 15823-6:2017).

Os CAA podem ser classificados em duas classes de resistência à segregação como: (ABNT NBR 15823-6:2017;

- $SR1 \leq 20$ para distância a ser percorrida $< 5m$ e espaçamento de armaduras $> 80mm$
- $SR2 \leq 15$ para distância a ser percorrida $> 5m$ e espaçamento de armaduras $> 80mm$ ou para distância a ser percorrida $< 5m$ e espaçamento de armaduras $< 80mm$

Para o ensaio de segregação pelo Método da coluna é necessário moldar em cerca de 2 minutos, um cilindro de diâmetro de 20 cm e altura com 66 cm, (Figura 2.19), com o concreto sem nenhum tipo de vibração externa e com compactação apenas por seu próprio peso. Este cilindro é construído por pedaços de tubos de PVC, cortados em 2 partes de 165mm e uma de 330mm que devem ser fixados de forma que seja possível a posterior separação e reaproveitamento das partes.

Figura 2.19: Ensaio de Segregação: Coluna de segregação



Fonte: Adaptado (ASTM C 1610).

Neste ensaio, o concreto deve permanecer em repouso por cerca de 15 minutos, após o que, faz-se a coleta, em separado, do concreto do topo e da base do tubo.

Após esta etapa cada amostra é lavada na peneira com granulometria de 4,8mm de forma a separar os agregados graúdos que devem ser pesados na condição saturada superfície seca.

A segregação estática, medida em porcentagem, pode ser obtida da Equação 12, onde MB e MT correspondem à massa dos agregados graúdos coletados da base e do topo, respectivamente.

$$SR = 2 \times \frac{(MB - MT)}{(MB + MT)} \times 100 \quad (12)$$

Caso $MB < MT$ $SR = 0$

2.8.3. Ensaios do CAA no estado endurecido

As características do CAA são atribuídas principalmente às propriedades no estado fresco, mas também devem ser analisadas as propriedades no estado endurecido, tais como as propriedades de durabilidade e de resistência (CAVALCANTI, 2006).

Para o estudo das propriedades do concreto no estado endurecido, o foco muitas vezes é o estudo da resistência à compressão, que é considerada a principal propriedade de engenharia do concreto. O restante das propriedades mecânicas e físicas do concreto endurecido, tais como resistência à tração, propriedades elásticas, fluência, resistência à trincas, propriedades elétricas, térmicas, de transporte e outras propriedades, também podem ser analisadas (KOVLER; ROUSSEL, 2011).

Na avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido é de suma importância a análise das propriedades de durabilidade do concreto; para isto, faz-se necessário um estudo das características de porosidade do material. Como relatado anteriormente, a durabilidade dos concretos é associada, principalmente, à porosidade aberta interconectada do concreto, pois ela permite a entrada dos agentes agressivos externos para o seu interior. Muitos ensaios são utilizados para avaliar as características de durabilidade, tais como: permeabilidade ao ar, absorção de água por sucção capilar, resistência à carbonatação, resistência ao ataque por sulfatos, assim como da determinação da absorção de água e índices de vazios e massa específica.

Na Tabela 2.7 são mostrados alguns ensaios e as respectivas normas, que são utilizados para analisar as características dos concretos no estado endurecido como a resistência e durabilidade. Os ensaios são de compressão, tração por compressão diametral, absorção por

imersão e por capilaridade, módulo dinâmico de elasticidade, dureza de Esclerômetro e de resistividade elétrica volumétrica.

Tabela 2.7: Ensaios do concreto auto adensável no estado endurecido e respectivas normas.

| Ensaio | Normas |
|------------------------------------|---------------|
| Resistência à compressão | NBR 5739/2018 |
| Tração por compressão diametral | NBR 7222/2011 |
| Módulo Dinâmico de Elasticidade | ASTM 1876-01 |
| Dureza de Esclerômetro de Reflexão | NBR 7584/2012 |
| Absorção por Imersão | NBR 9778/2005 |
| Absorção por capilaridade | NBR 9779/2012 |
| Resistividade Elétrica Volumétrica | NBR 9204/2012 |

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Como definido na seção 1.2, este trabalho propôs desenvolver um traço de CAA referência incorporado de resíduo de beneficiamento de mármore e granito, como filler, e sem adição de resíduos metálicos. Em seguida, analisar a influência da substituição de porcentagens de areia, deste concreto referência, por porcentagens de cavacos metálicos, nas propriedades mecânicas, reológicas e de durabilidade dos concretos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

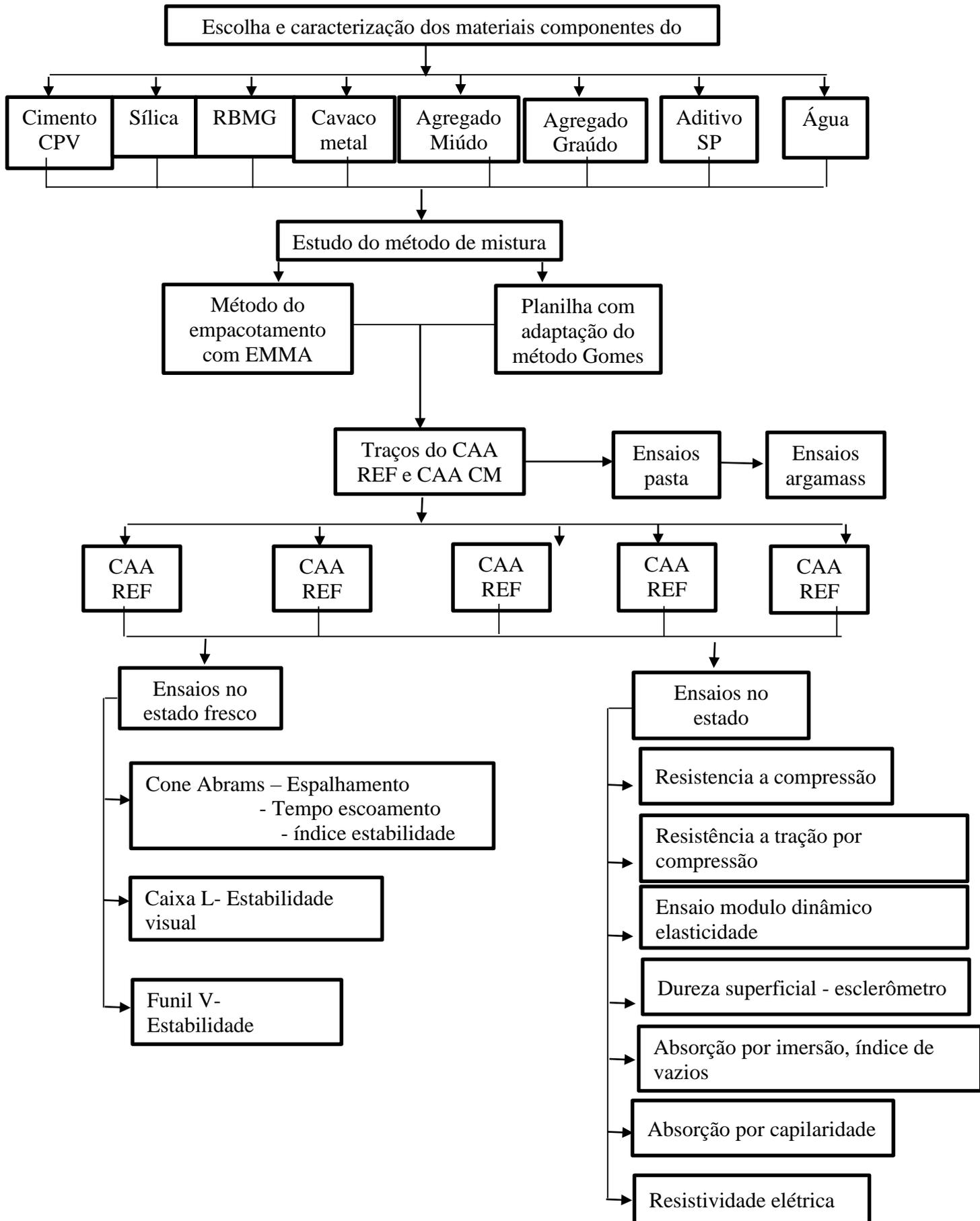
Foi adotada a nomenclatura para identificação dos concretos como CAA-REF para o concreto referência sem adição de cavacos metálicos e CAA-CM os concretos que tiveram quantidade de resíduo metálicos utilizados em substituição da areia, de modo que o percentual de substituição em massa está apresentado após a nomenclatura CM (25, 37,5, 50 e 75%).

O programa experimental desta pesquisa foi desenvolvido em três partes: seleção e caracterização dos materiais utilizados, estudo de empacotamento, processo de dosagem e produção do concreto CAA-REF com adição de RBMG (Resíduos Beneficiamento de Mármore e Granito) e produção dos CAA-CM com a substituição de areia por cavacos metálicos.

Foram realizados ensaios no estado fresco: espalhamento, T₅₀₀, Funil-V, Caixa-L, bem como os ensaios do CAA no estado endurecido: resistência à compressão (ABNT NBR 5739:2018), resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222/2011), módulo dinâmico de elasticidade por impulso de vibração (ASTM 1876-01), dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão (ABNT NBR 7584/2012), resistividade elétrica (ABNT NBR 9204/2012), absorção por imersão, índice de vazios e massa específica do concreto (ABNT NBR 9778/2009) e absorção por capilaridade (ABNT NBR 9779/2012).

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma com a sequência das etapas realizadas neste trabalho.

Figura 3.1: Fluxograma do processo de produção do concreto autoadensável.



3.2. PROCEDIMENTO UTILIZANDO O PROGRAMA EMMA PARA OBTENÇÃO DE MELHOR MISTURA DOS AGREGADOS PARA O CAA

Na busca da melhor proporção de mistura dos agregados, que apresentasse a maior densidade, ao invés do processo de misturas sucessivas em laboratório, adotou-se a seleção das porcentagens dos mesmos por meio da adequação desses materiais a uma “curva alvo” encontrada no software disponibilizada pela empresa Elkem Materials. Este procedimento permitiu que se utilizasse menor quantidade de materiais, diminuindo o trabalho consumido em ensaios e indicando soluções que não seriam obtidas caso se utilizasse apenas o método de misturas sucessivas.

Esta ferramenta conhecida como Emma® (ELKEM,2012) possibilita a busca virtual da melhor combinação de misturas, dos materiais componentes previamente incluídos na listagem de materiais, que proporciona o maior empacotamento das partículas e que resultem, conseqüentemente, no menor índice de vazios.

As composições referenciais encontradas foram verificadas experimentalmente. O EMMA® utiliza o modelo Andreassen e Andreassen modificado de empacotamento de partículas e calcula a distribuição de tamanho de partículas do compósito. Inicialmente, foram adicionados ao programa do EMMA® os dados referentes aos materiais usados nesta pesquisa (distribuição granulométrica e massa específica). Adotou-se o modelo Andreassen modificado e o coeficiente de distribuição de partículas $q=0,24$, o tamanho máximo e mínimo de partículas, $9500\ \mu\text{m}$ e $0,5\ \mu\text{m}$ respectivamente.

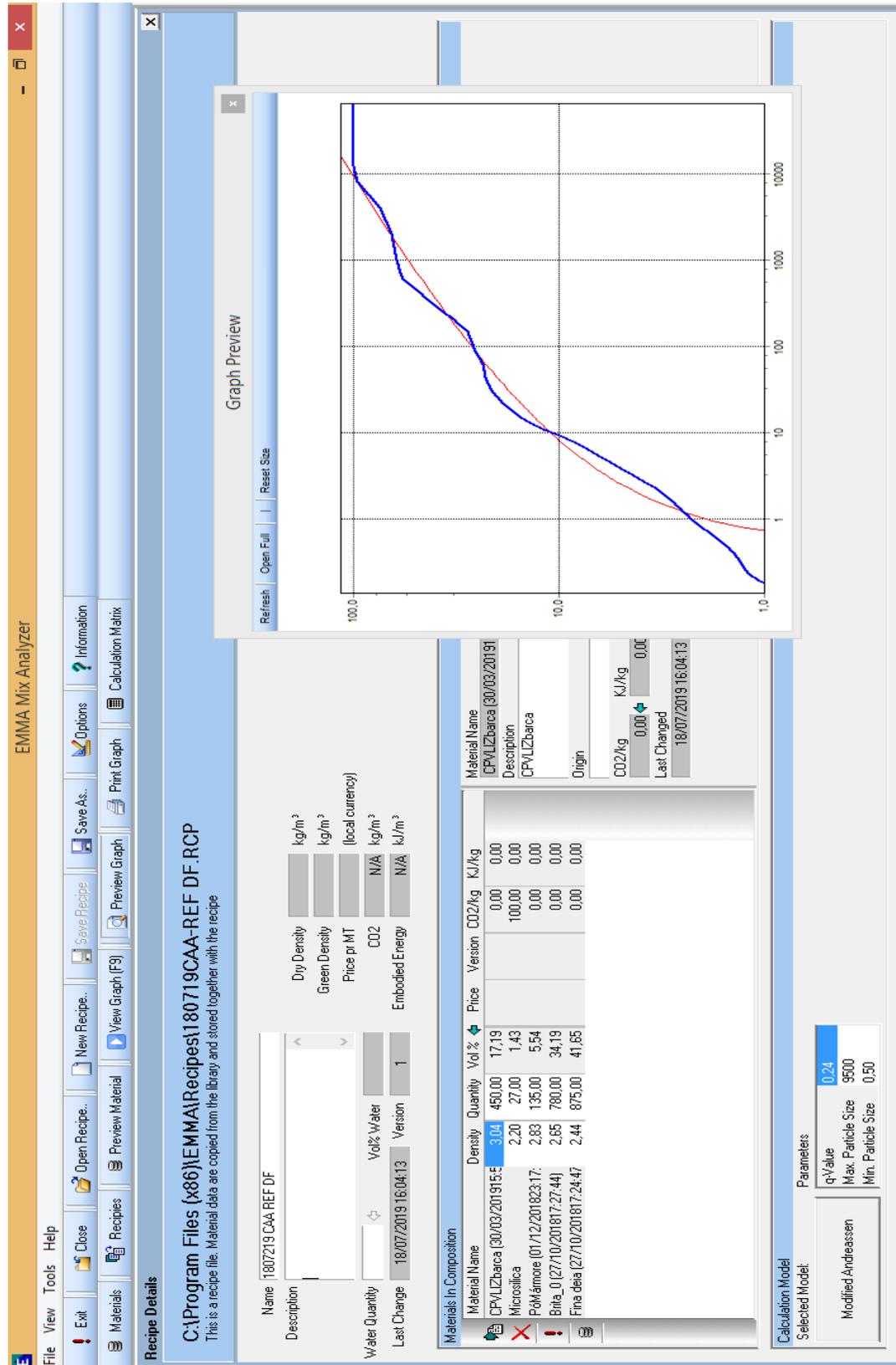
Primeiramente foi feita a inclusão no EMMA dos dados dos materiais sólidos (distribuição granulométrica e massa específica) dos componentes do CAA-REF e dos materiais que vão compor o CAA-CM.

Aberta uma nova aba para cálculo do CAA-REF, fez-se a inclusão de cada material parte da mistura. Partindo de um valor inicial para o cimento, adotam-se valores proporcionais a este material para cada um dos outros componentes. Gera-se então a primeira curva da mistura (curva azul). Compara-se com a curva alvo do EMMA (curva vermelha).

Devem-se repetir estas simulações de proporções até que se encontre uma curva da mistura que mais se aproxima da curva alvo e que represente a composição com melhor empacotamento e conseqüentemente com menor índice de vazios conforme mostrado na Figura 3.2. Em seguida foram simuladas no EMMA, a substituição de areia por cavaco metálico nas

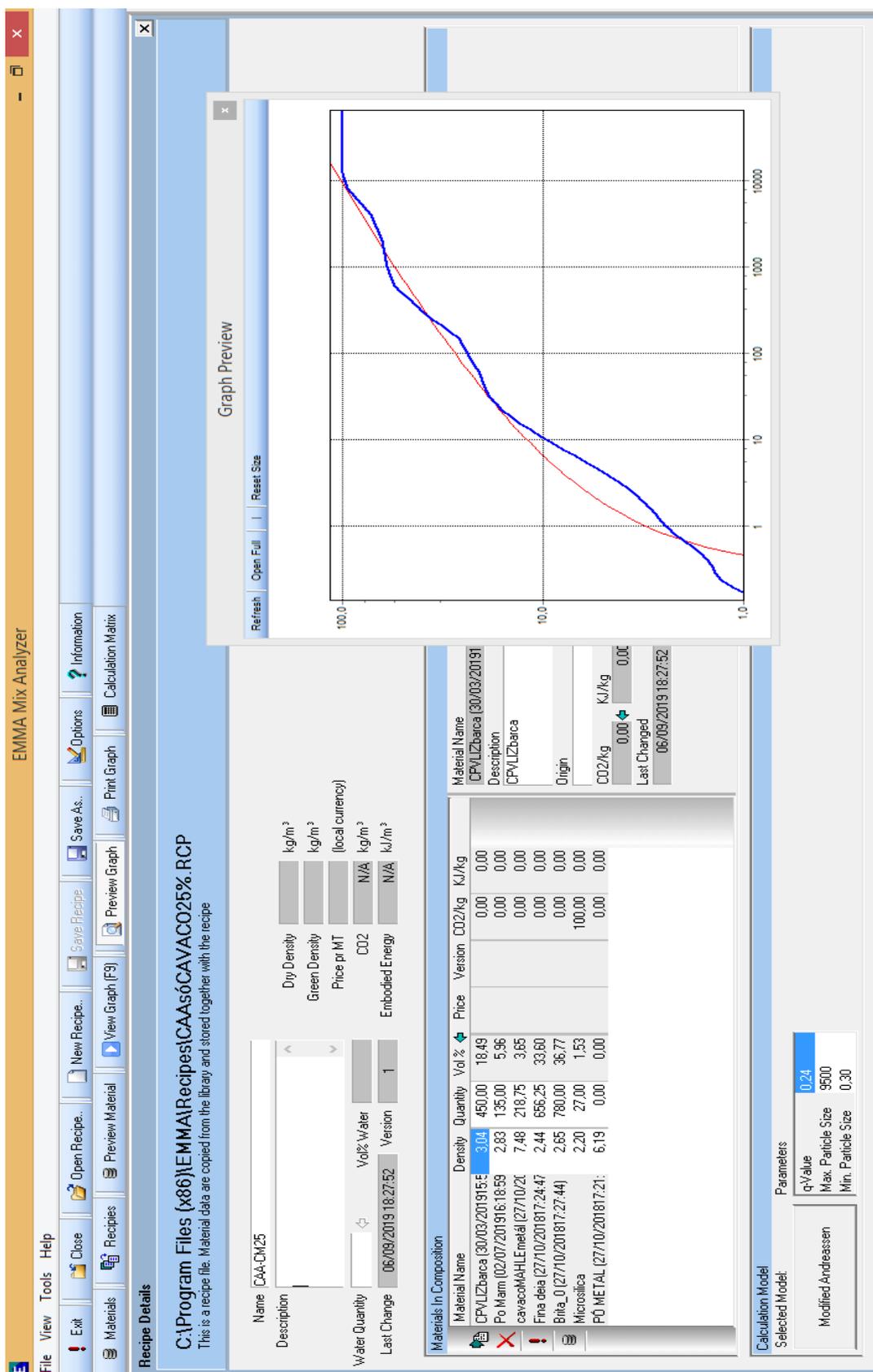
proporções adotadas de 25%, 37,5%, 50% e 75%. Como apresentado, respectivamente, nas Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6, não se constataram grandes diferenças nas curvas de empacotamento.

Figura 3.2: Seleção da proporção dos componentes do CAA-REF e a curva gerada.



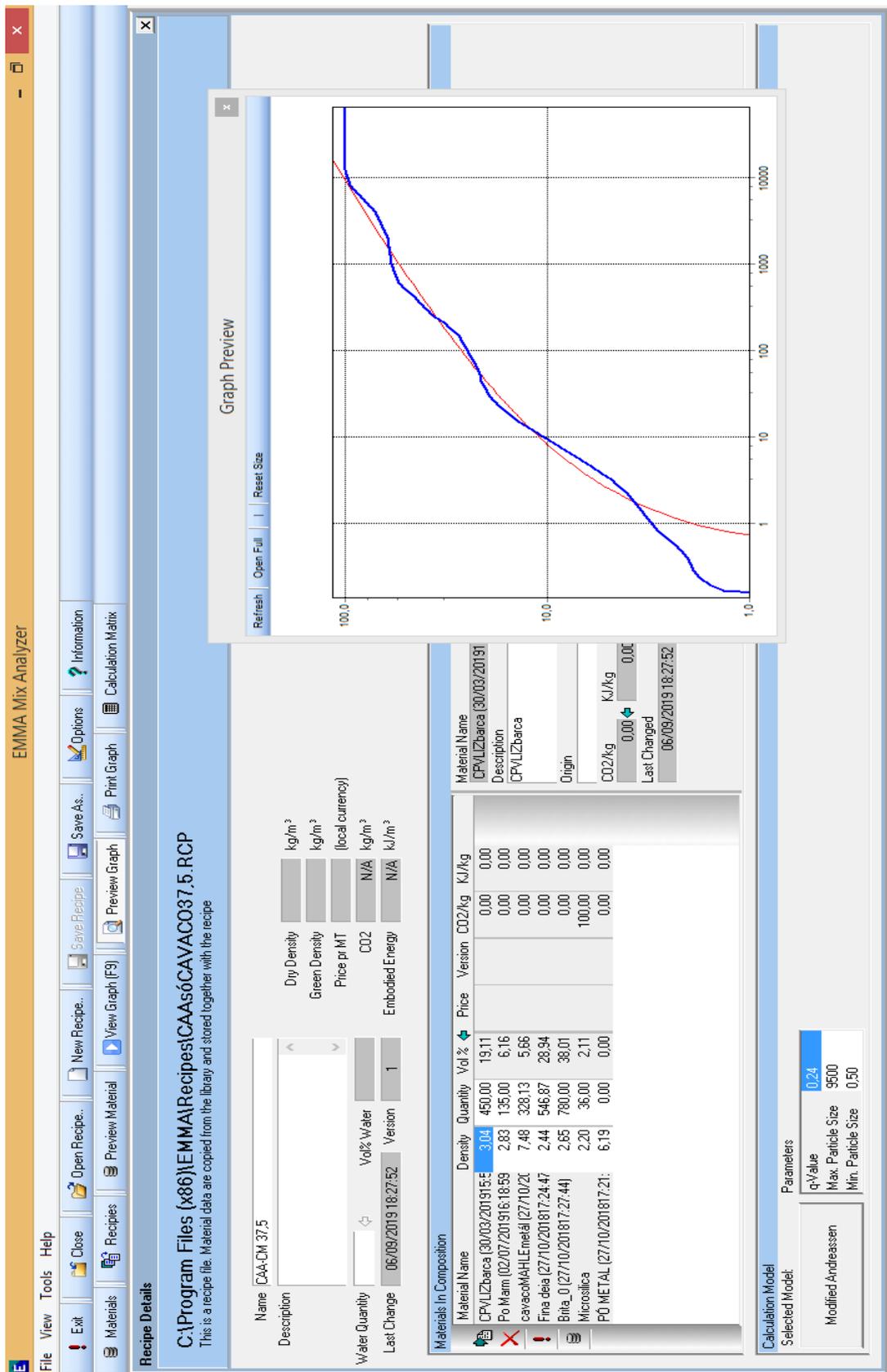
Fonte: (Próprio autor)

Figura 3.3: Seleção da proporção dos componentes do CAA-CM 25 e a curva gerada.



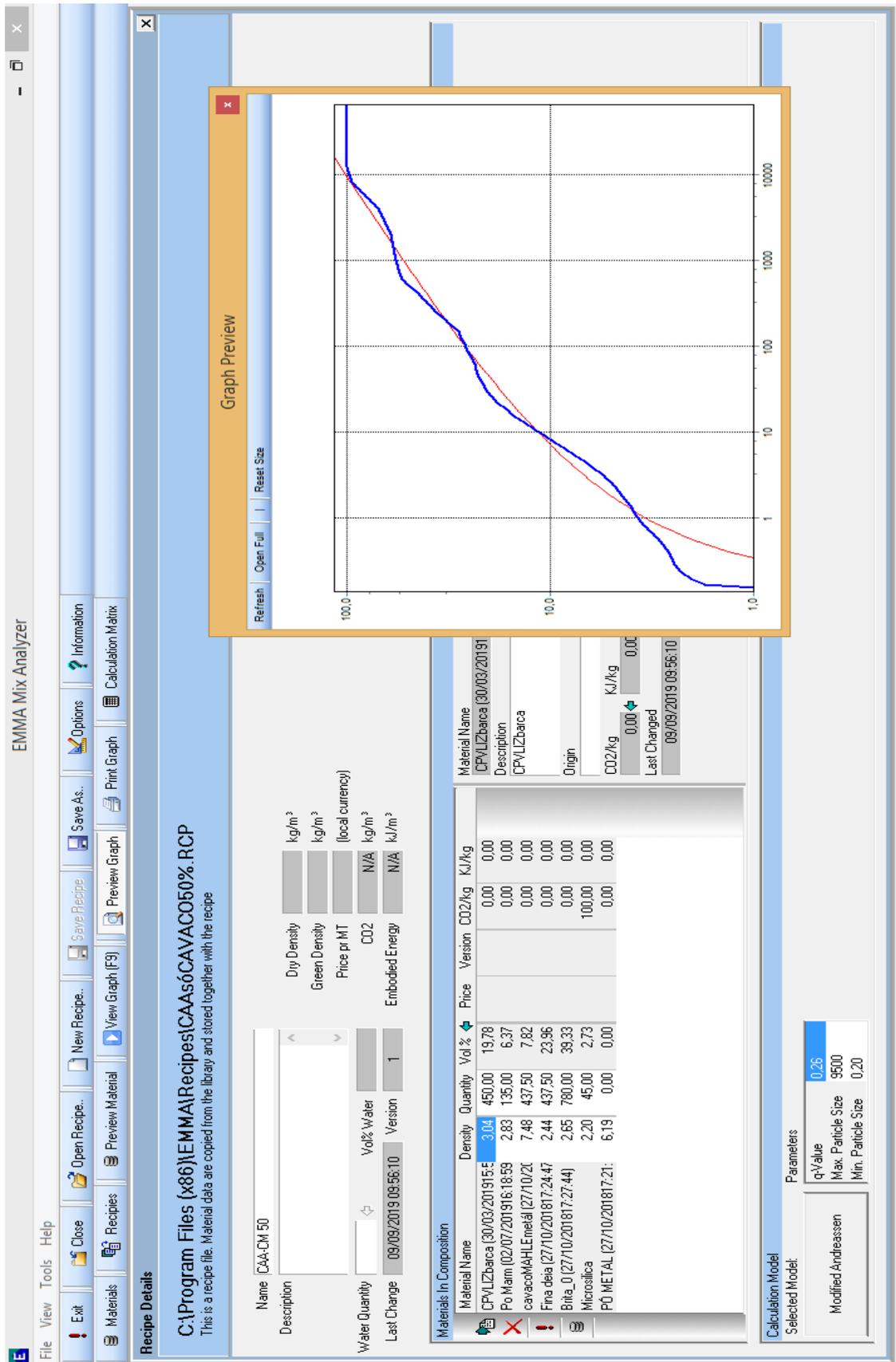
Fonte: (Próprio autor)

Figura 3.4: Seleção da proporção dos componentes do CAA-CM 37,5 e a curva gerada



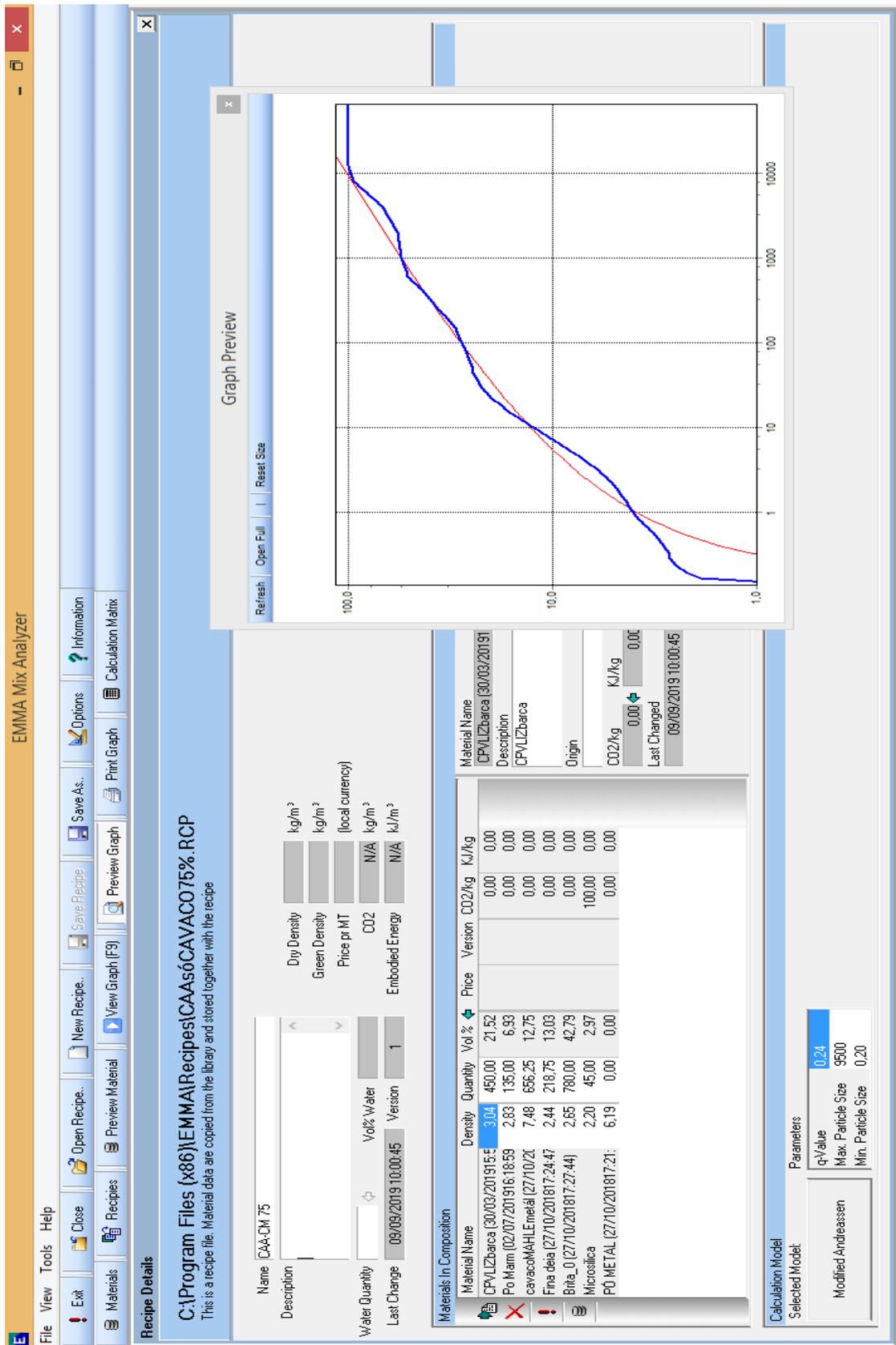
Fonte: (Próprio autor)

Figura 3.5: Seleção da proporção dos componentes do CAA-CM 50 e a curva gerada



Fonte: (Próprio autor)

Figura 3.6: Seleção da proporção dos componentes do CAA-CM 75 e a curva gerada



Fonte: (Próprio autor)

Foi criada uma planilha em Microsoft® Excel® como ferramenta para facilitar o cálculo do traço do CAA usando os princípios do Método de Gomes. Após a obtenção das quantidades de materiais que geram a curva azul, que mais se aproxima da curva alvo do EMMA®, foram lançadas na planilha de cálculo de traço de CAA (Coluna F) apresentado na Figura 3.7. Foi definido um fator a/c e sp/c (coluna B), gerando as massas dos componentes para 1 metro cúbico de concreto (coluna I). As quantidades de materiais seguem os limites estipulados por Gomes e EFNARC. Foram respeitadas as proporções areia/agregado; argamassa/concreto, teor de argamassa entre outros limites sugeridos por Okamura (1995)

Definidas as massas dos componentes, o volume da pasta e a correção do cimento foram calculados de acordo com GOMES (2009). As porcentagens dos agregados graúdo e miúdos foram obtidas pelas proporções do EMMA, conforme mostrado na Figura 3.7.

A planilha está preparada para fazer a correção do traço: em função do fator SP/c e do teor de sólidos do SP; da variação do fator a/c ; da correção da quantidade da areia e consequentemente de água (em função da umidade da areia que é checada no momento da confecção do traço) é apresentada na Figura 3.8.

A planilha está preparada para aceitar a inclusão de outros materiais (fillers e/ou outras adições minerais) que poderão fazer parte de um novo concreto, como irá acontecer no traço proposto por esta pesquisa que irá incluir RBMG e cavacos metálicos como adição mineral (Figura 3.9).

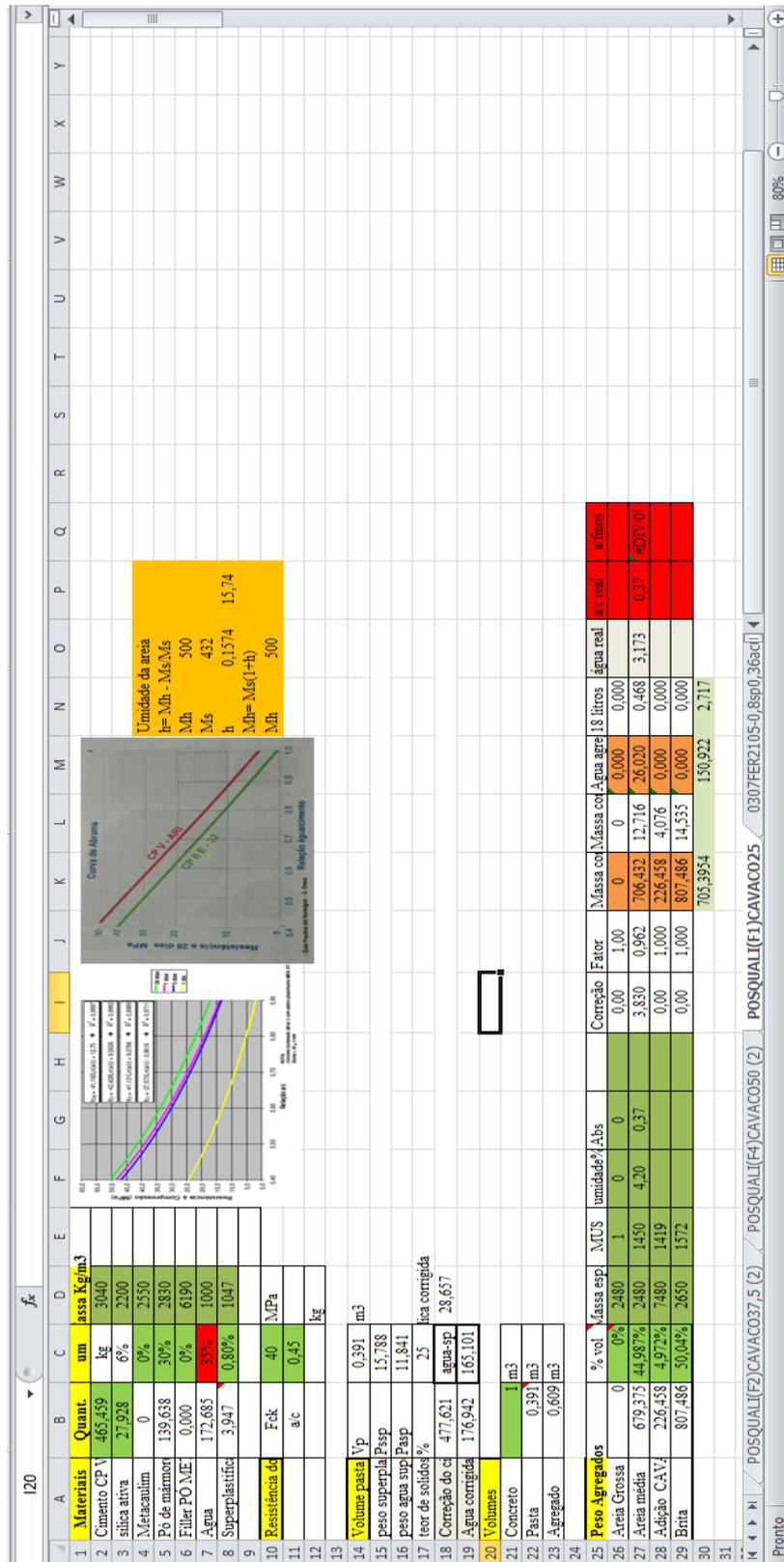
A planilha calcula também, paralelamente, os traços em volume de pasta e argamassa (Figura 3.10). Desta forma, foi possível testar primeiro se a pasta e a argamassa apresentavam valores compatíveis com parâmetros de um CAA para, só depois, confeccionar um traço do concreto. Assim, foi possível reduzir o consumo de materiais necessários para comprovação da eficiência de cada mistura proposta.

Figura 3.7: Planilha de cálculo de traço de CAA adaptada ao Método do Gomes(2009)

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
|----|-------------------------------|------|---|----------------------|---------|-----------|-----------|-------------------|------------|--------|------------|-----------|---------|---|---|---|
| 47 | Teor de Aditivogua/cimentante | | | Componentes CAA | EMMA | Massa (g) | Densidade | Volume m | Kg/m³ | m³ | traço unit | | volumes | | | |
| 48 | 0,80% | 0,35 | | Consumo de cimento | 450 | 465,459 | 3,04 | 148,0 | 1,000 | 0,1531 | 1,000 | | 0,1531 | | | |
| 49 | Água /cimento | | | Consumo de fillerPC | 0 | 0,000 | 6,19 | 0,0 | 0,000 | 0,0000 | 0,000 | | 0,0000 | | | |
| 50 | | 0,37 | | Consumo sílica 6% | 27 | 27,928 | 2,2 | 12,3 | 0,060 | 0,0127 | 0,060 | | 0,0127 | | | |
| 51 | | | | Consumo de Po de r | 135 | 139,638 | 2,83 | 47,7 | 0,300 | 0,0493 | 0,300 | | 0,0493 | | | |
| 52 | agua/finos | 0,27 | | Cosumo adição CAV | 218,75 | 226,265 | 7,48 | 29,2 | 0,486 | 0,0302 | 0,486 | | 0,0302 | | | |
| 53 | | | | Consumo de água | 166,95 | 172,685 | 1 | 167,0 | 0,371 | 0,1727 | 0,371 | | 0,1727 | | | |
| 54 | | | | Consumo de aditivo | 3,82 | 3,947 | 1,05 | 3,6 | 0,008 | 0,0038 | 0,008 | | 0,0038 | | | |
| 55 | | | | Consumo de areia m | 656,25 | 678,794 | 2,48 | 264,6 | 1,458 | 0,2737 | 1,458 | | 0,2737 | | | |
| 56 | | | | Consumo de Areia G | 0 | 0,000 | 2,57 | 0,0 | 0,000 | 0,0000 | 0,000 | | 0,0000 | | | |
| 57 | | | | Consumo de Brita 0 | 780 | 806,796 | 2,65 | 294,3 | 1,733 | 0,3045 | 1,733 | | 0,3045 | | | |
| 58 | | | | total | 2437,77 | 2521,511 | 2,52 | 0,9668 | | 1,0000 | | | 1 | | | |
| 59 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 60 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 61 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 62 | | | | lar baseado na propo | | | | | Parametros | | Volume | Densidade | | | | |
| 63 | | | | % | | | | Vareia/Vagreg | 0,50 | | Pasta | 0,392 | 2067,60 | | | |
| 64 | | | | Adição | 13,22 | | | Varg/Vconc | 0,70 | | Argamassa | 0,696 | 2465,27 | | | |
| 65 | | | | Areia Medi | 39,65 | | | teor de argamassa | 0,62 | | | | | | | |
| 66 | | | | | | | | Vareia/Vpasta | 0,78 | | | | | | | |
| 67 | | | | | | | | Vareia/Varo | 0,44 | | Concreto | 1 | 2521,51 | | | |

Fonte: (Próprio autor)

Figura 3.8: Planilha de cálculo para correção do traço de CAA, em função da umidade da areia.



Fonte: (Próprio autor)

3.3. MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

A caracterização dos materiais desta pesquisa foi feita por meio de ensaios físicos, os quais atenderam às especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

3.3.1. Cimento

O cimento utilizado foi do tipo Portland CP V-ARI, obedecendo às especificações da norma ABNT- NBR – 16697 (ABNT,2018), foi escolhido por ser um cimento que possui uma alta resistência inicial e final. Na Tabela 3.1 são apresentadas as características, fornecidas pelo fabricante, do cimento CP V-ARI-PREMIUM. Este cimento foi desenvolvido especialmente para processos que utilizam aditivos como o superplastificante como o caso do CAA.

Tabela 3.1: Características físicas, mecânicas e químicas do cimento CP V-ARI-PREMIUM.

| Características | Valor Médio | Especificação Norma ABNT |
|--|------------------------|---------------------------------|
| Perda ao fogo | 3,0% | $\leq 4,5$ |
| Resíduo insolúvel | 0,7% | $\leq 1,0$ |
| Anídrido Sulfúrico – SO ₃ | 2,9% | $\leq 3,5$ |
| Finura – resíduo na peneira 0,044 mm (# 325) | 1,4% | Não há |
| Finura Blaine | 500 m ² /Kg | ≥ 300 |
| Massa Específica | 3,07 g/cm ³ | Não há |
| Tempo de início de pega | 120 min. | ≥ 60 |
| Tempo de fim de pega | 180 min. | ≤ 600 |
| Resistência à compressão – 1 dia | 26,0 MPa | $\geq 14,0$ |
| Resistência à compressão – 3 dias | 39,0 MPa | $\geq 24,0$ |
| Resistência à compressão – 7 dias | 44,0 MPa | $\geq 34,0$ |
| Resistência à compressão – 28 dias | 50,0 MPa | Não há |

Fonte: Empresa CIMENTOS LIZ(2018).

3.3.2. Adições Minerai

As adições minerais utilizadas nesta pesquisa, e consideradas como integrantes da pasta, foram a sílica ativa, o resíduo de beneficiamento pó de mármore e granito (RBMG), visando à propiciar determinada quantidade de finos que promovesse a viscosidade e coesão exigida ao CAA no estado fresco.

3.3.2.1 Sílica Ativa

A sílica ativa é um produto de origem metalúrgica, o que lhe confere maior estabilidade quanto a sua composição química e física. É um pó fino pulverizado do processo de fabricação do silício metálico ou ferro silício. No processo de fabricação é gerado um gás (SiO) que, ao sair do forno elétrico oxida-se formando a sílica amorfa (SiO₂), que é captada em filtros de manga, em seguida armazenada em silos adequados e embalada em big-bags e sacos de *craft*.

As partículas da sílica ativa são esféricas, vítreas e possuem um diâmetro médio menor do que 1µm. Apresentam altíssima superfície específica e uma massa específica aparente baixa. O alto teor de SiO₂ no formato amorfo (não cristalino), aliado a uma elevada finura, proporciona altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação do cimento, conferindo melhor desempenho em concreto e argamassa.

A sílica ativa utilizada neste trabalho foi fornecida pela empresa Tecnosil - Sílica Ativa e fabricado por Palmyra do Brasil Indústria e Comércio de Silício Metálico. Neste trabalho adotou-se adição em massa de 6% de sílica ativa em relação à massa do cimento para os CAA-REF, mantendo-se o mesmo valor para o CAA-CM 25. Visando à manutenção das características de adensabilidade houve necessidade de aumento da massa de sílica ativa para 8% no CAA-CM 37,5 e para 10% nos CAA-CM 50 e CAA-CM 75. As informações fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Características físicas e químicas da Sílica ativa.

| | |
|-----------------------------|---------------------------|
| Teor de SiO ₂ | >85% |
| Superfície Específica | 20.000 m ² /kg |
| Formato da Partícula | Esférico |
| Diâmetro médio da Partícula | 0,15 µm |
| Massa Específica | 2,20 kg/dm ³ |

Fonte: TECNOSIL (2018) (tecnosil@tecnosilbr.com.br)

3.3.2.2 Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito

O RBMG foi coletado das canaletas de recolhimento de resíduos do processo de corte e polimento de mármore e granito em uma empresa de Itajubá. O material foi coletado em forma de lama e transportado em baldes plásticos para o laboratório de materiais da UNIFEI, onde foi disposto em bandejas e seco em estufa à 105°C durante 24 horas. Após o resfriamento do resíduo, o mesmo foi destorroado e peneirado em peneira de malha de 0,6mm.

A massa específica do RBMG foi obtida por meio do método do Frasco Le Chatelier ABNT - NBR – 16605 (2017). O ensaio granulométrico foi realizado no Laboratório de caracterização estrutural (LCE) da UNIFEI no equipamento Microtrac, S3500 da marca Zeiss, Modelo EVO MA-15. O teor de RBMG adotado neste trabalho foi 30% relativo à massa de cimento para todos os traços de concreto produzidos.

3.3.3. Agregados Miúdo e Graúdo (Areia, Resíduo Cavaco Metálico e Brita)

Empregaram-se como agregados miúdos a areia e o resíduo cavaco metálico (RCM) e como agregado graúdo a brita zero (B0).

3.3.3.1 Areia

A areia natural quartzosa foi adotada como agregado miúdo, proveniente do rio Sapucaí no município de Itajubá-MG e adquirida no comércio local. A areia foi caracterizada no Laboratório de materiais da UNIFEI quanto à massa específica conforme a ABNT NBR NM 52 (ABNT,2009); massa unitária e volume de vazios conforme a ABNT NBR NM 45 (ABNT,2006); absorção de água de acordo com a ABNT NBR NM 30 (ABNT,2001) e composição granulométrica segundo a ABNT NBR NM 248 (ABNT,2003). Também foi aferido o material fino passante da peneira 75µm de acordo com a ABNT NBR NM 46 (ABNT,2003).

3.3.3.2. Resíduo Cavaco Metálico

Neste trabalho foi utilizado o resíduo cavaco metálico (RCM), também adotado neste estudo como agregado miúdo e como substituição de parcela da areia em massa. Este material origina-se do processo de usinagem de anéis de pistão de uma empresa da região. O material foi coletado seco em um dos containers que recebe descarte deste material e foi transportado em baldes para o laboratório de materiais da UNIFEI onde foi caracterizado quanto à massa específica conforme a NBR NM 52 (ABNT,2009); massa unitária e volume de vazios conforme a NBR NM 45 (ABNT,2006); composição granulométrica segundo a NBR NM 248 (ABNT,2003). Também, foi aferido o material fino passante da peneira 75µm de acordo com a NBR NM 46 (ABNT,2003).

3.3.3.3 Brita Zero (B0)

Empregou-se como agregado graúdo a brita zero (B0) de origem granítica proveniente de uma empresa de Itajubá-MG. A brita foi caracterizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da FEPI quanto à massa específica e absorção de água segundo a NBR NM 53

(ABNT,2009); massa unitária e volume de vazios de acordo com a NBR NM 45 (ABNT,2006); composição granulométrica conforme a NBR NM 248(ABNT,2003). Também, foi determinado o material fino passante da peneira 75µm conforme a NBR NM 46 (ABNT,2003).

3.3.4 Água

A água utilizada para a produção dos concretos foi proveniente do sistema de abastecimento público da COPASA Minas Gerais, cujas características atendem a ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014).

3.3.5. Aditivo Superplastificante (SP)

Foi utilizado o aditivo superplastificante Adi-Super H25, fabricado pela empresa ADITIBRAS de Duque de Caxias, RJ. Este aditivo é especialmente indicado para a fabricação de CAAs. Pertence a uma linha de aditivos superplastificantes tipo II, de alta tecnologia, considerado de 3ª geração, formulado à base de polímeros de éteres carboxílicos modificados, que agem sobre as partículas de cimento apresentando um altíssimo efeito dispersante, de onde se obtém concretos altamente fluidos com uma relação água/cimento extremamente baixa, longa manutenção e elevadas resistências mecânicas iniciais e finais. É um produto líquido, classificado como não perigoso, pronto para uso, isento de cloretos e atende aos requisitos na NBR 11768 (ABNT,2019). O teor adotado de SP neste trabalho foi 0,8% relativo à massa de cimento para todos os traços de concreto produzidos. A Tabela 3.3 apresenta as características físicas e químicas do aditivo.

Tabela 3.3: Características físicas e químicas do aditivo.

| Produtos da Linha | Indicações Técnicas | Dosagem * recomendada | Propriedades |
|--|--|---|---|
| ADI- SUPER H25 | Efeito superplastificante | 300 a 1200 ml Sugestão inicial: 800ml | Aparência: Líquido Castanho claro |
| Nome Químico: Polímero Policarboxílico Modificado | Com manutenção Moderada da Trabalhabilidade. Possibilita a obtenção de altas resistências iniciais e finais. Possui baixo custo. | (* Dosagem recomendada para cada 100kg de cimento). (≈ 0,3% a 1,2% do cimento). | ph: 5,5 ±1,0 Massa específica: 1,055±0,02 g/cm ³ Concentração sólidos (%) 25,00 Solubilidade: Totalmente Solúvel em Água. |

3.4. DOSAGEM DOS CONCRETOS

Partindo das ferramentas e dos procedimentos descritos no item 3.2 foram calculados os traços do CAA-REF e dos CAA-CM. Primeiramente foi obtido o traço do Concreto Autoadensável Referência (CAA-REF) com 30% de RBMG, em massa do cimento, incorporado como adição mineral (*filler*); Para tal foram considerados estudos de Melo (2017) e Ashish (2018).

O traço referência foi composto por cimento, sílica ativa, RBMG, areia, brita zero, superplastificante (SP) e água nas proporções de 1:0, 06:0, 30:1, 944:1, 733:0, 008:0,35. No segundo momento, baseado no CAA-REF, foram desenvolvidos os traços dos Concretos Autoadensáveis com Cavaco Metálico (CAA-CM) substituindo porcentagens em massa da areia por cavaco metálico. O traço CAA-CM ficou composto então, por cimento, sílica ativa, RBMG, cavaco metálico, areia, brita zero, SP e água. Os percentuais de sílica e água/cimento dos traços CAA-CM 37,5, CAA-CM 50 E CAA-CM 75 foram corrigidos após ensaios da pasta (miniabatimento-Kantro e Cone de Marsh) e argamassa (mini cone e mini funil), visando à obter valores dentro dos limites adotados para CAA.

Os traços unitários do CAA-REF e dos CAA-CM são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Traços unitários dos concretos produzidos

| Composição Traço | Cimento | Sílica Ativa | RBMG | a/cim | SP | Areia | Cavaco Metal. | Brita 0 |
|------------------|---------|--------------|------|-------|-------|-------|---------------|---------|
| CAA-REF | 1 | 0,06 | 0,30 | 0,35 | 0,008 | 1,944 | 0 | 1,733 |
| CAA-CV 25 | 1 | 0,06 | 0,30 | 0,35 | 0,008 | 1,458 | 0,486 | 1,733 |
| CAA-CV 37,5 | 1 | 0,08 | 0,30 | 0,35 | 0,008 | 1,215 | 0,729 | 1,733 |
| CAA-CV 50 | 1 | 0,10 | 0,30 | 0,35 | 0,008 | 0,972 | 0,972 | 1,733 |
| CAA-CV 75 | 1 | 0,10 | 0,30 | 0,36 | 0,008 | 0,486 | 1,458 | 1,733 |

Fonte: (Próprio autor)

Na Tabela 3.5 é apresentado o teor de substituição de areia do CAA-REF por cavaco metálico em cada um dos traços dos CAA- CM.

Tabela 3.5: Teores de areia e cavaco metálico em cada traço de CAA produzido.

| Teores de areia e cavaco metálico em cada traço de CAA | | |
|--|-----------------|-------|
| | CAVACO METÁLICO | AREIA |
| CAA-REF | 0% | 100% |
| CAA-CM 25 | 25% | 75% |
| CAA-CM 37,5 | 37,5% | 62,5% |
| CAA-CM 50 | 50% | 50% |
| CAA-CM 75 | 75% | 25% |

Fonte: (Próprio autor)

O processo de mistura dos concretos foi em uma betoneira de 400 litros de eixo inclinado, marca CSM®. A sequência de mistura dos componentes do concreto adotada nesta pesquisa difere de muitos trabalhos que inicia a mistura com a colocação da brita e parte da água, seguidos de cimento, areia, fillers, superplastificante e restante de água.

Partindo da observação do processo de mistura dos componentes da pasta e da argamassa na argamassadeira, que se iniciou com os materiais cimentantes seguido dos demais materiais finos, depois da água e do superplastificante, foi adotada esta nova sequência de mistura do concreto que se mostrou muito eficiente.

Tanto para o traço do CAA-REF quanto para os traços de CAA-CM foram introduzidos inicialmente na betoneira seca a areia, e todos os materiais finos (cimento, sílica, RBMG, areia e cavaco metálico). Fez-se a mistura e homogeneização destes materiais durante 3 minutos. Foi então adicionado 80% da água, misturando por mais 2 minutos. Adicionou-se o superplastificante com o restante da água e misturado por mais 6 minutos. Foi observado, em vários traços testados anteriormente, que em aproximadamente 4 minutos o superplastificante agia e a argamassa ficava pronta para receber a brita. Assim, foi então adicionada a brita e misturado por mais 4 minutos, concluindo o processo de mistura.

Os ensaios do CAA-REF no estado fresco (espalhamento, Funil V, Caixa L) foram realizados. A determinação da massa específica aparente do concreto fresco, do rendimento, do teor de ar e do índice de ar foram realizadas pelo método gravimétrico, segundo a NBR 9833 (ABNT,2009). Para isso foi preenchido de concreto um cilindro metálico, cuja massa já era conhecida e encontrada a massa total do conjunto para então calcular a massa específica do concreto fresco, o teor de ar e índice de ar conforme mostrado na Figura 3.11.

Figura 3.11: Ensaio para medição da massa específica.



Fonte: (Próprio autor)

Os corpos de prova foram moldados, conforme mostrado na Figura 3.12.a, preenchendo de concreto os moldes metálicos, sem nenhum processo de vibração ou compactação de forma que ocorresse o autoadensamento da mistura.

Os moldes com o concreto fresco foram colocados em local plano dentro do laboratório conforme mostrado na Figura 3.12.b e após 24 horas foram desmoldados, identificados, e em seguida submetidos ao processo de cura adequado. Alguns foram colocados em tanque de cura em água com 5% de cal e outros introduzidos em câmara com umidade acima de 95% e temperatura de 23°C (+/- 2°C) onde permaneceram até a data da realização dos ensaios.

Figura 3.12. Corpos de prova (a) moldados (esquerda). (b) desmoldados e identificado(direita).

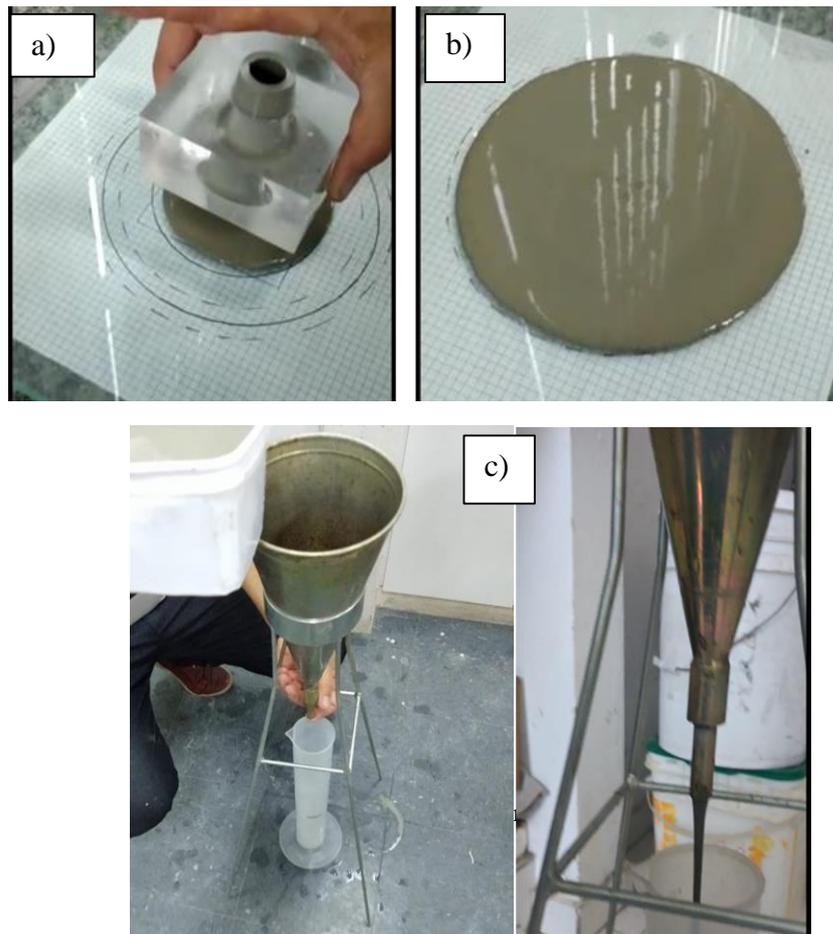


Fonte: (Próprio autor)

3.5. ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

As pastas foram ensaiadas por meio do ensaio de miniabatimento ou ensaio de Kantro conforme ilustrado nas Figuras 3.13 a e 3.13 b. Já o ensaio do cone de Marsh, para verificar o teor de saturação do aditivo e também a estabilidade da dispersão com o tempo é apresentado na Figura 3.13. c. Estes ensaios foram realizados para a pasta de todos os traços estudados (CAA-REF e CAA-CM).

Figura 3.13: Ensaio de (a) miniabatimento (Kantro)(esquerda), (b) Pasta(direita), (c) de fluidez com o Cone de Marsh (inferior)



Fonte: (Próprio autor)

Também foram realizados ensaios com a argamassa de todos os traços estudados (CAA-REF e CAA-CM) utilizando o mini funil V e mini tronco de cone conforme pode ser ilustrados na Figura 3.14.

Figura 3.14: Realização do ensaio da argamassa



Fonte: (Próprio autor)

Para analisar as características do concreto fresco, foram realizados os seguintes ensaios, como podem ser ilustrados na Figura 3.15.

Figura 3.15: Ensaios no estado fresco CAA-REF e CAA-CM. Medida do espalhamento pelo método de cone de Abrams (a e b), medida da habilidade passante pela caixa L (c), medida da viscosidade pelo método do funil V (d).



Fonte: (Próprio autor)

3.6. ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

Para testar os concretos no estado endurecidos, quanto à resistência e a durabilidade, foram realizados ensaios de compressão, tração por compressão diametral, módulo dinâmico de elasticidade, dureza de esclerômetro, absorção por imersão e por capilaridade e de resistividade elétrica volumétrica. Na Tabela 3.6 é apresenta a programação dos ensaios.

Tabela 3.6: Ensaios para a caracterização do CAA REF e CAA CM.

| Ensaios | Norma ABNT ou ASTM | Corpos de prova cm | Datas dos ensaios |
|--|-----------------------|----------------------------|----------------------|
| RESISTÊNCIA | | | |
| Resistência à compressão | NBR 5739/2018 | 08 corpos de prova 10 x 20 | 7, 28 dias |
| Resistência Tração por compressão diametral | NBR 7222/2011 | 06 corpos de prova 10 x 20 | 7, 28 dias |
| Módulo Dinâmico de Elasticidade | ASTM 1876-01 | 02 corpos de prova 10 x 20 | 35 dias |
| Dureza de Esclerômetro Reflexão | NBR 7584/2012 | 02 corpos de prova 10 x 20 | 35 dias |
| DURABILIDADE | | | |
| Absorção por Imersão | NBR 9778/2005 | 03 corpos de prova 10 x 20 | 28 dias |
| Absorção por capilaridade | NBR 9779/2012 | 03 corpos de prova 10 x 20 | 28 dias |
| Resistividade Elétrica Volumétrica | NBR 9204/2012 | 06 corpos de prova 15 x 30 | 28 dias |

3.6.1. Resistência à compressão (NBR 5739/2018)

Para o ensaio de resistência à compressão foram moldados 08 (oito) corpos de prova 10x20 cm, para cada traço de CAA, e ensaiados quatro corpos de prova aos 7 e 28 dias de idade segundo a ABNT NBR 5739 (ABNT,2018), conforme representado na Figura 3.16. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá em máquina universal de ensaios modelo WAW-1000® da marca TIME Testing Machines®, com capacidade de carga de 1000 ton. e velocidade de aplicação de carga de 0,75 MPa/s, calibrada em 15 fevereiro de 2018.

Figura 3.16: Ensaio de compressão.



Fonte: (Próprio autor)

3.6.2. Resistência à Tração por compressão diametral (NBR 7222:2011)

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram moldados 06 (seis) corpos de prova 10x20 cm para cada traço de CAA, e ensaiados três corpos de prova aos 7 e 28 dias de idade, segundo a ABNT NBR 7222 (ABNT,2011), conforme representado na Figura 3.17. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá em máquina universal de ensaios modelo WAW-1000® da marca TIME Testing Machines®, com capacidade de carga de 1000 ton e velocidade de aplicação de carga de 0,75 MPa/s, calibrada em 15 fevereiro de 2018.

Figura 3.17: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: (Próprio autor)

3.6.3 Ensaio de Módulo Dinâmico de Elasticidade por impulso de vibração (ASTM 1876-01)

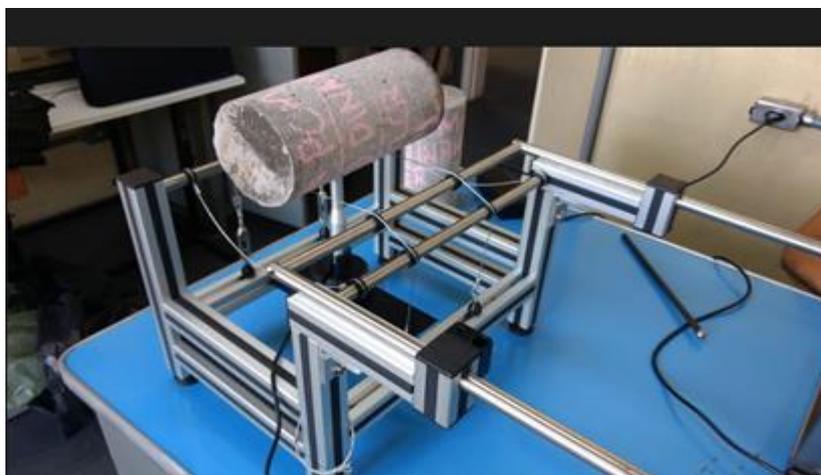
Segundo Shehata (2005), dois métodos de determinação do módulo de elasticidade são definidos como não destrutivos, a saber: o método de estímulo, que relaciona o módulo com a frequência natural de vibração e o outro que relaciona o módulo com a velocidade de propagação de ondas de ultrassom no corpo de prova. Ensaios realizados com pastas de cimento com relações água/cimento de 0,34 e 0,45 comprovaram que os módulos de elasticidade dinâmicos obtidos pelos ensaios de ultrassom e pelo método de estímulo por impulso (modo longitudinal), métodos dinâmicos, resultaram em valores muito próximos (POPOVICS, 2008).

A Técnica de Excitação por Impulso (TEI) conforme a ASTM E 1876 (ASTM,2015) foi utilizada para determinar o módulo de elasticidade dinâmico. O método de ensaio estimulado por

impulso consiste em obter as frequências naturais de vibração do concreto a partir da resposta acústica provocada pelo impacto de um pulsador no corpo de prova e, com base na sua massa e dimensões, é calculado o módulo de elasticidade do concreto. Como este é um ensaio não destrutivo, os corpos de prova usados neste ensaio também foram utilizados no ensaio de Dureza de Esclerômetro de Reflexão. Para a realização deste ensaio, aos 35 dias de idade foram moldados dois corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm para cada traço.

Para a realização do ensaio foi determinada a massa, o comprimento e o diâmetro de cada corpo de prova e depois colocado sobre o dispositivo de apoio, conforme mostrado na Figura 3.18.

Figura 3.18: Corpo de prova preparado para o ensaio do módulo dinâmico de elasticidade.



Fonte: (Próprio autor)

Foi usado um impulsor para bater leve e elasticamente no corpo de prova e a partir da resposta acústica provocada pelo impacto o módulo de elasticidade dinâmico foi calculado. Para cada corpo de prova foram repetidas as leituras até que cinco leituras consecutivas permanecessem dentro do intervalo de 1% entre elas. A média destas cinco leituras foi utilizada para determinar a frequência ressonante fundamental de flexão.

3.6.4. Ensaio Dureza de Esclerômetro de Reflexão (NBR 7584/2012)

O ensaio de Dureza de Esclerômetro mede a dureza superficial do concreto, fornecendo elementos para a avaliação da qualidade do concreto. Como este é um ensaio não destrutivo, foram utilizados os mesmos corpos de prova usados no ensaio de Módulo Dinâmico de Elasticidade por impulso de vibração. Para o ensaio realizado aos 35 dias da concretagem foram utilizados os dois corpos de prova de 10 x 20 cm para cada traço.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá de acordo com a NBR 7584:1995 que prescreve o método para avaliação da dureza superficial do concreto endurecido pelo uso do esclerômetro de reflexão. O equipamento usado foi o Esclerômetro 58-C0181/N da marca Controls®, com energia de percussão de 2,2 joules (Figura 3.19). O aparelho esclerométrico foi calibrado utilizando-se a bigorna padrão de calibração. A equação utilizada para o cálculo da resistência à compressão do concreto (f_c), em função do índice esclerométrico (IE) é fornecido pelo aparelho.

Figura 3.19: Esclerômetro 58-C0181/N da marca Controls



Fonte: (Próprio autor)

Em cada corpo de prova foram efetuados nove impactos em pontos uniformemente distribuídos na sua face. Na área de aplicação dos impactos foram marcados nove pontos com giz de cera a uma distância constante de 50 mm de seus centros, conforme mostrado na Figura 3.20.

Figura 3.20: Corpo de prova no ensaio de esclerômetro



Fonte: (Próprio autor)

Para garantir o travamento dos corpos de prova durante a aplicação dos golpes com o aparelho esclerométrico, os mesmos foram colocados na prensa universal de ensaio e foi aplicada

uma carga de aproximadamente 15% da prevista para a ruptura, conforme recomenda a norma MERCOSUL NBR NM 78 (1996).

O índice esclerométrico é fornecido diretamente pelo aparelho e corresponde ao número de recuo do martelo, após um impacto do esclerômetro de reflexão sobre um ponto da área de ensaio. O resultado do índice de esclerômetro de cada corpo de prova é calculado pela média aritmética dos nove valores individuais dos índices esclerométrico. O valor obtido denomina-se índice esclerométrico médio da área (IE), que pode ser obtido pela Equação 13:

$$IEe = K \times IE \quad (13)$$

Onde:

- IEe: Índice esclerométrico médio efetivo
- K: Coeficiente de correção do índice esclerométrico, obtido quando da aferição do aparelho
- IE: índice esclerométrico médio

Conforme determina a norma ABNT- NBR7584/2012, o equipamento foi calibrado e obtido o coeficiente de correção do índice esclerométrico, sendo $k= 1,278$.

De cada corpo de prova ensaiado, foi obtido um único índice esclerométrico médio efetivo (IEe).

3.6.5 Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica (NBR 9778/2009)

Para a determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e da massa específica foram moldados 3 corpos de prova 10 x 20 cm, e ensaiados os três corpos de prova entre o 28 e 35 dias de idade para cada traço de CAA, segundo a NBR 9778 (ABNT,2009). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá. Inicialmente, os 3 corpos de prova foram retirados do ambiente de cura e suas massas foram determinadas e imediatamente foram colocados em estufa a temperatura de (105 ± 5) °C por um período de 72 h. Após este período de 72 h, foram resfriadas em dessecador e foi registrado a valor da massa seca (m_s) de cada corpo de prova. Na Figura 3.21 são mostrados os corpos de prova que passaram pelo processo de secagem em estufa e pelo ensaio de capilaridade e imersão.

Figura 3.21: Secagem em estufa, ensaio Capilaridade e ensaio de Imersão.



Fonte: (Próprio autor)

Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água a temperatura de (23 ± 2) °C por um período de 72 h, foram então determinadas as massas decorridas 72 h de imersão. Na sequência, foram levados a ebulição por um período de 5 h e após a água esfriar até a temperatura de (23 ± 2) °C foi registrada a massa saturada superfície seca (m_s). Após completar a saturação, procedeu-se a pesagem dos corpos de prova em balança hidrostática e registrado a valor da massa imersa em água (m_i).

Para o cálculo dos valores de absorção (A), índice de vazios (I_v), massa específica seca (ρ_s), saturada (ρ_{sat}) e massa específica real (ρ_t), podem ser obtidos respectivamente das Equações (14 a 18):

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (14)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (15)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (16)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (17)$$

$$\rho_t = \frac{m_s}{m_s - m_i} \times 100 \quad (18)$$

Onde: m_{sat} = massa saturada (g)

m_s = massa seca em estufa (g)

m_i = massa imersa em água. (g)

3.6.6 Determinação da absorção de água por capilaridade (NBR 9779/2012)

Para a determinação da absorção de água por capilaridade o procedimento inicial adotado apresenta uma similaridade com o ensaio de imersão. Foram moldados 3 corpos de prova com as dimensões de 10 x 20 cm, e posteriormente foram ensaiados os corpos de prova entre o 28 e 35 dias de idade para cada traço de CAA, de acordo com a norma NBR 9779 (ABNT,2012).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá. Inicialmente, os 3 corpos de prova foram retirados do ambiente de cura e suas massas foram determinadas e, posteriormente foram armazenadas em estufa a temperatura de (105 ± 5) °C por um período de 72 h. Após as 72h, depois de resfriadas em dessecador, foram determinadas as massas secas (m_s) de cada corpo de prova.

Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água a temperatura de (23 ± 2) °C por um período de 72 h da seguinte maneira: as amostras foram posicionadas sobre um suporte dentro de um recipiente de ensaio, onde foi adicionada água com 1% de solução de Fenolftaleína, de modo que o nível de água permanecesse constante a (5 ± 1) mm) da face inferior, evitando a molhagem de outras superfícies.

Durante o ensaio foram determinadas as massas saturadas (m_{sat}) dos corpos de prova com 3h e 6h e depois com 24h, 48h e 72h. Após a última etapa, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral e verificado a distribuição da água no seu interior.

Para determinar a absorção de água por capilaridade foi utilizada a seguinte Equação 19.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S_i} \quad (19)$$

Onde: C= absorção por capilaridade (g/cm^3)

m_{sat} = massa saturada (g)

m_s = massa seca em estufa (g)

S= Área da seção transversal (g)

3.6.7. Ensaio Resistividade Elétrica Volumétrica (NBR 9204/2012)

O ensaio de resistividade elétrica auxilia na determinação da permeabilidade do concreto. É um método usado para estimar a maturidade, resistência e permeabilidade do concreto. Esse novo aspecto da durabilidade do concreto é abordado nas obras de Neville (2015).

Por meio do ensaio da resistividade, elétrica pode-se avaliar a estrutura do concreto produzido, uma vez que o resultado indica o quanto a estrutura dificulta a movimentação de elétrons livres. A resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio na estrutura controlam a taxa de corrosão, que é um processo eletroquímico (HELENE, 1993). A corrosão proveniente de íons cloreto é apontada como a maior vulnerabilidade à vida útil das estruturas de concreto (PEREIRA et. al., 2012).

A Tabela 3.7 aponta valores para a probabilidade de corrosão em função da resistividade.

Tabela 3.7: Indicação de probabilidade de corrosão.

| Resistividade do concreto | Indicação da probabilidade de corrosão |
|----------------------------------|---|
| >200 ohm.m | Desprezível |
| 100 a 200 ohm.m | Baixa |
| 50 a 100 ohm.m | Alta |
| <50 ohm.m | Muito alta |

Fonte: Polder, 2000

Para o ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica foram moldados 06 corpos de prova 15 x 30 cm, para cada um dos traço de CAA-REF E CAA-CM, segundo a NBR 9204 (ABNT,2012).

Após sete dias de cura, imersa em água e solução de cal, os corpos de prova foram levados à marmoraria para serem cortados de acordo com a Norma NBR 9204 (2012), conforme verificado na Figura 3.22 a. Após o corte, os corpos de prova ficaram com as dimensões 15 x 15 cm, (Figura 3.22. b). Retornando ao laboratório, três corpos de prova foram mantidos em cura em câmara úmida com 95% de umidade e três corpos de prova em temperatura ambiente, até a data do ensaio de 28 dias.

Figura 3.22.a: Máquina de corte. **Figura 3.22.b.** Corpo de prova para ensaio da resistividade elétrica.



Fonte: (Próprio autor)

Os ensaios foram realizados no Laboratório de construção civil da Universidade Federal de Itajubá seguindo os princípios na norma ABNT NBR 9204:2012 e adaptada ao procedimento adotado por Costa e Azzi (2017) que utilizaram dois eletrodos posicionados nas extremidades do corpo de prova e para auxiliar no contato entre as superfícies usaram esponjas de aço umedecidas. Nesta pesquisa, o uso das esponjas de aço se mostrou mais eficiente do que o uso da pasta para contato elétrico. Na Figura 3.23 é apresentado o dispositivo preparado para a realização do ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica com o corpo de prova entre as esponjas de aço, e os equipamentos auxiliares, variador de voltagem (varivolt), voltímetro e o amperímetro.

Os corpos de prova foram retirados do local de estocagem e determinadas a massa com aproximação de 1g e medidas as alturas em três geratrizes uniformemente espaçadas no perímetro com aproximação de 0,1mm. A temperatura e umidade relativa nas imediações dos corpos de prova foram registradas.

Para cada corpo de prova foi aplicada, por um tempo de 10 min, uma tensão de $(50 \pm 0,5)$ V e efetuada então a leitura da corrente alternada em mA que o atravessa.

Figura 3.23: Dispositivo montado para a realização do ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica.



Fonte: (Próprio autor)

O cálculo dos valores de resistividade elétrica volumétrica (ρ_v) de cada corpo de prova é obtido através da equação (20):

$$\rho_v = \frac{U * A}{i * h} \times 100 \quad (20)$$

Onde:

- ρ_v é a resistividade elétrica-volumétrica do corpo de prova na idade de ensaio, expressa em ohms centímetro ($\Omega \cdot \text{cm}$);

- U é a tensão aplicada ao corpo de prova (V).

- i é a corrente elétrica que atravessa o corpo de prova, expressa em miliamperes (mA);

- A é a área da superfície do eletrodo que é o corpo de prova, expressa em centímetros quadrados (cm^2);

- $A = \pi \times (D^2/4)$

- D é a média do diâmetro do corpo de prova expressa em centímetros (cm);

- h é a altura do corpo de prova, expressa em centímetros (cm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados os resultados da caracterização física dos materiais usados na confecção dos concretos autoadensáveis CAA REF e dos quatro CAA CM e os resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido.

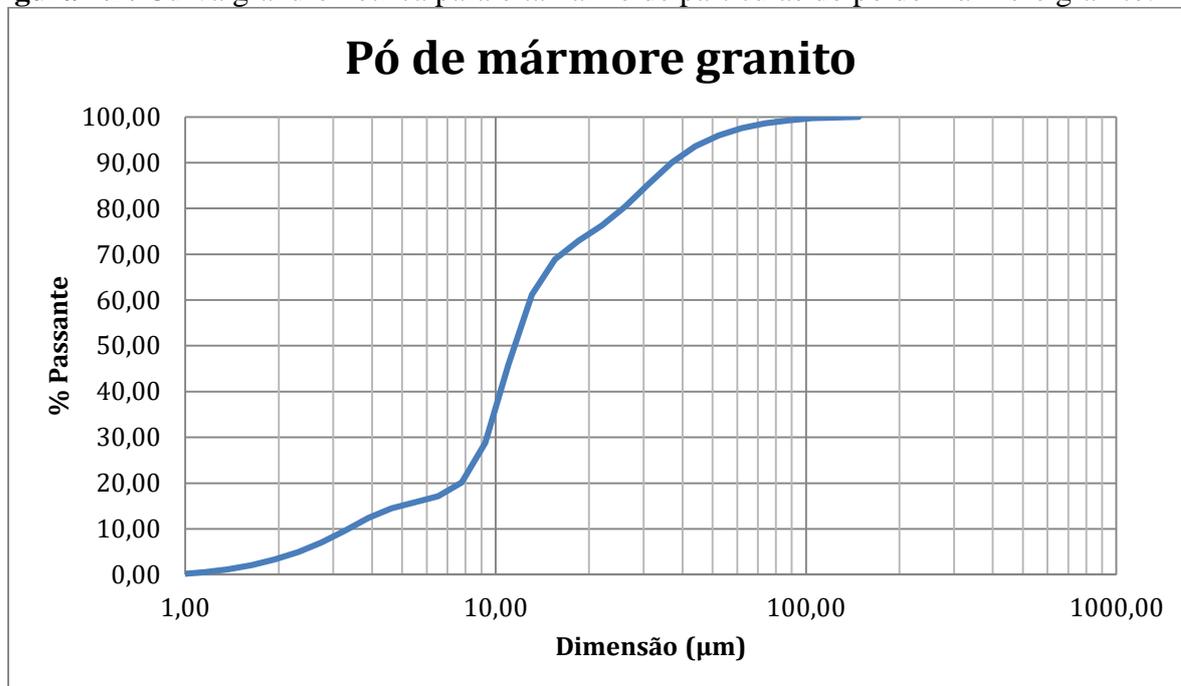
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PRECURSORES

No primeiro momento foi realizada uma análise dos materiais precursores.

4.1.1 Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG)

A massa específica média obtida do RBMG é de $2,83 \text{ g/cm}^3$. A média volumétrica é de $16,99 \mu\text{m}$. A curva de análise cumulativa do tamanho de partícula é apresentada na Figura 4.1. Os valores de D10, D50 e D90 usados como os critérios de aceitação para o método de difração a laser, são respectivamente, $3,35 \mu\text{m}$, $11,47 \mu\text{m}$ e $36,91 \mu\text{m}$. O que significa que 10% dos tamanhos das partículas estão abaixo dos $3,35 \mu\text{m}$, que 50% das partículas estão abaixo $11,47 \mu\text{m}$ (isto é, o diâmetro médio) e 90% das partículas estão abaixo de $36,91 \mu\text{m}$.

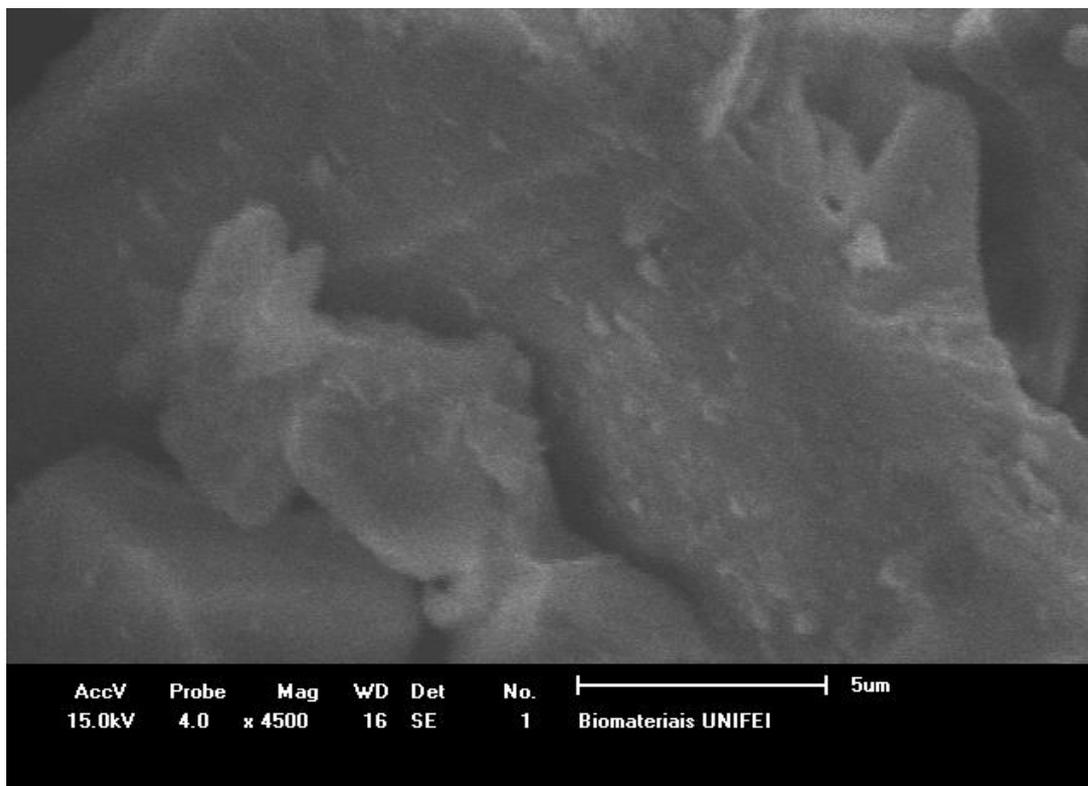
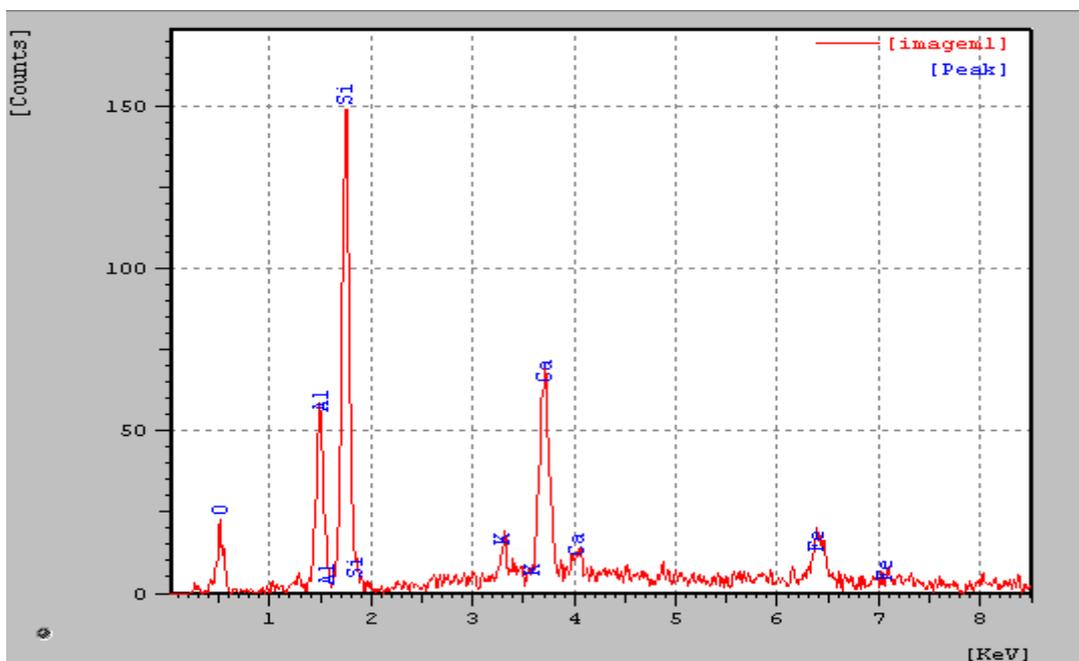
Figura 4.1: Curva granulométrica para o tamanho de partículas do pó de mármore granito.



Fonte: (Próprio autor).

Na Figura 4.2 (a, b) pode-se observar por meio da análise de EDS a presença dos elementos constituintes do pó de mármore.

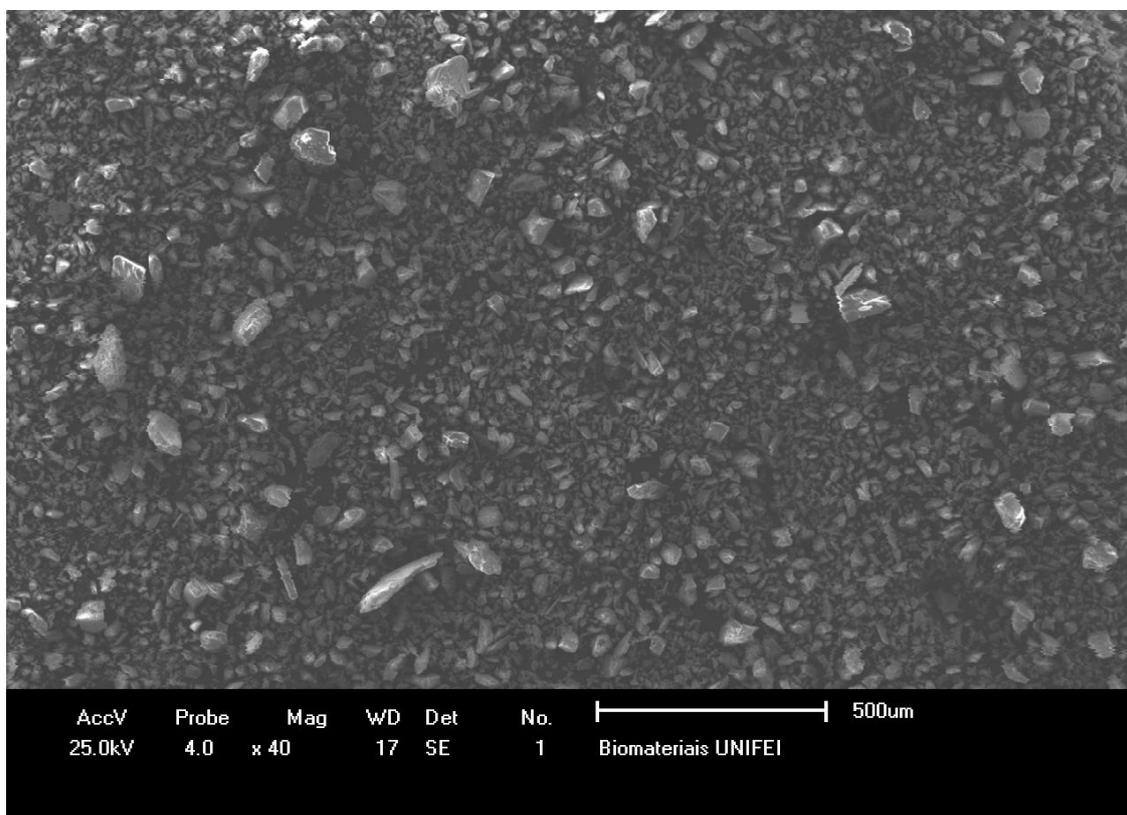
Figura 4.2: Análise do pó de mármore utilizando MEV (EDS).



Na Figura 4.3 podem ser observadas as micrografias obtidas por MEV do resíduo de pó de mármore. Nota-se que o resíduo de pó de mármore apresenta partículas com morfologia

irregular de formato angular. Ainda, observa-se a larga distribuição granulométrica do resíduo de pó de mármore.

Figura 4.3: Análise do pó de mármore utilizando MEV



Fonte: (Próprio autor)

4.1.2. Agregados Miúdos e Graúdos (Areia, Resíduo Cavaco Metálico e Brita)

Empregaram-se como agregados miúdos a Areia e o Resíduo Cavaco Metálico (RCM) e como agregado graúdo a Brita Zero (B0).

4.1.2.1 Areia

Na Tabela 4.1 é apresentada a distribuição granulométrica da areia utilizada na preparação do concreto autoadensável. Nesta tabela, pode-se observar as características do agregado miúdo e que a maior parte da areia se encontra com tamanhos entre 0,3 e 0,6 mm, o D_{max} característico, módulo de finura, massa específica, a massa unitária, assim como a absorção por água.

Para a determinação das características físicas do agregado miúdo as amostras foram secas em estufa e resfriadas à temperatura ambiente e então realizados os seguintes ensaios:

- Determinação da composição granulométrica dos agregados (ABNT NBR NM248:2003);
- Determinação da massa específica dos agregados (ABNT NBR NM 52:2009);
- Determinação da massa unitária e do volume de vazios dos agregados (ABNT NBR NM 45:2006).

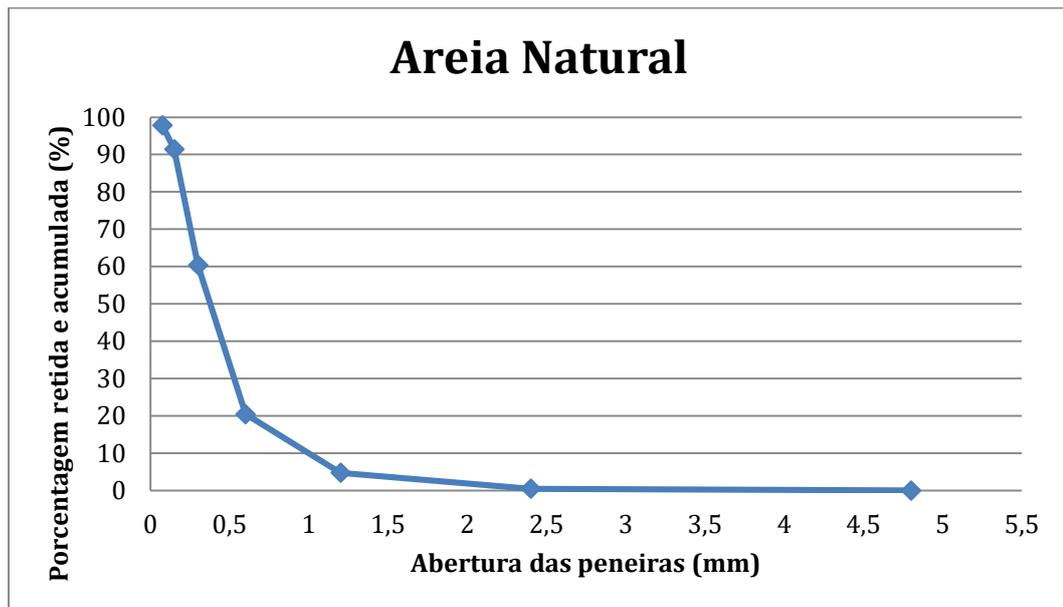
Tabela 4.1: Características físicas e granulométricas da areia

| Abertura da Peneira (mm) | Areia natural | | |
|--|--------------------------|-------------|------------|
| | % retida | % acumulada | % Passante |
| 4,8 | 0 | 0 | 100 |
| 2,4 | 0,48 | 0,48 | 99,52 |
| 1,2 | 4,29 | 4,77 | 95,23 |
| 0,6 | 15,70 | 20,47 | 79,53 |
| 0,3 | 39,89 | 60,36 | 39,64 |
| 0,15 | 31,07 | 91,43 | 8,57 |
| 0,075 | 6,38 | 97,83 | 2,19 |
| >0,075 | 2,19 | 100 | 0 |
| Dmax Característica | 1,2 mm | | |
| Módulo de Finura | 1,77 | | |
| Classificação | Zona utilizável inferior | | |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,48 | | |
| Massa unitária solta(g/cm ³) | 1,50 | | |
| Absorção de água | 0,37% | | |
| Material fino (passante 75) | 1,19% | | |

Fonte: (Próprio autor)

Na Figura 4.4 podem ser observadas as porcentagens retida e acumulada da areia natural.

Figura 4.4: Análise das porcentagens retida e acumulada da areia natural.

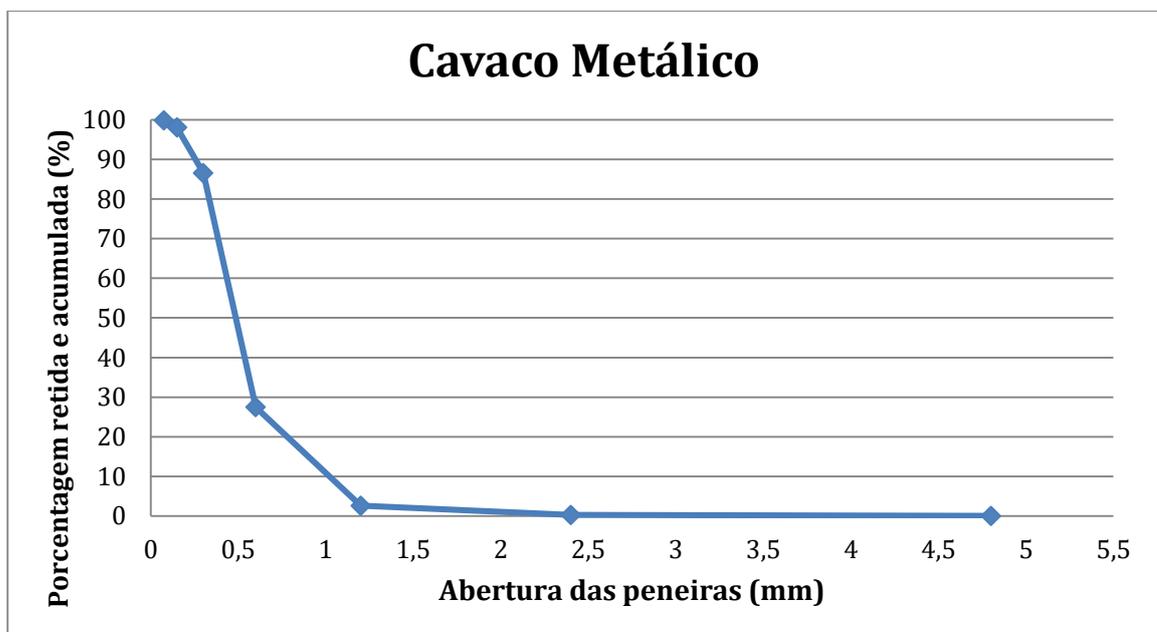


Fonte: (Próprio autor)

4.1.2.2 Resíduo Cavaco Metálico (RCM)

Na Figura 4.5 podem ser observadas as porcentagens retida e acumulada do cavaco metálico.

Figura 4.5: Análise das porcentagens retida e acumulada do cavaco metálico



A Tabela 4.2 apresenta as características físicas e granulométricas do Cavaco Metálico. Pode-se observar nesta tabela que a maior parte do cavaco também se encontra com tamanhos

entre 0,3 e 0,6 mm. Pode-se observar nas imagens que os grãos de cavaco metálico apresentam morfologia irregular com alta angulosidade e arestas bastante evidentes.

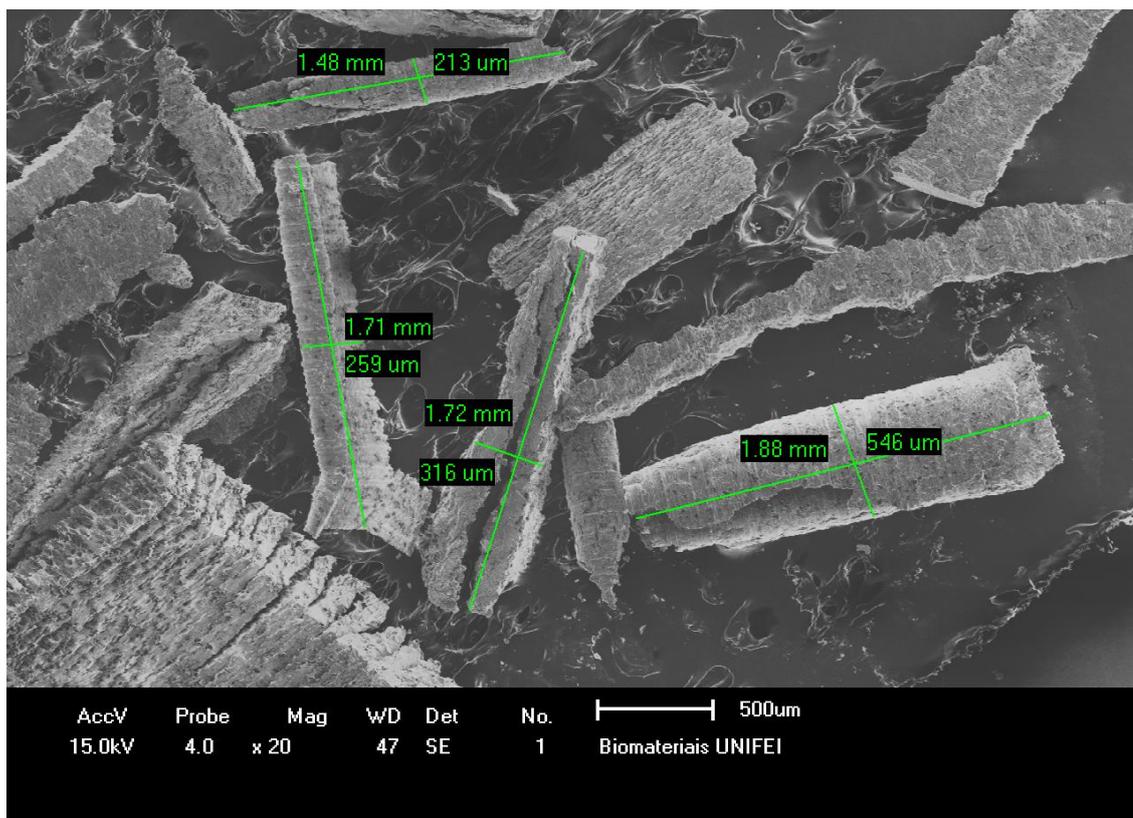
Tabela 4.2: Características físicas e granulométricas do Resíduo Cavaco Metálico (RCM)

| Abertura da Peneira (mm) | Cavaco Metálico | | |
|--|-----------------|-------------|------------|
| | % retida | % acumulada | % Passante |
| 6,3 | 0 | 0 | 100 |
| 4,8 | 0 | 0 | 100 |
| 2,4 | 2,46 | 0,246 | 99,75 |
| 1,2 | 2,32 | 2,57 | 97,43 |
| 0,6 | 24,89 | 27,46 | 72,54 |
| 0,3 | 59,13 | 86,59 | 13,41 |
| 0,15 | 11,47 | 98,06 | 1,94 |
| 0,075 | 1,77 | 99,83 | 0,17 |
| >0,075 | 0,17 | 100 | 0 |
| Dmax Característica | 1,2 mm | | |
| Módulo de Finura | 2,15 | | |
| Massa específica | 7,48 | | |
| Massa unitária solta(g/cm ³) | 1,95 | | |
| Material fino (passante 75) | 0,17% | | |

Fonte: (Próprio autor)

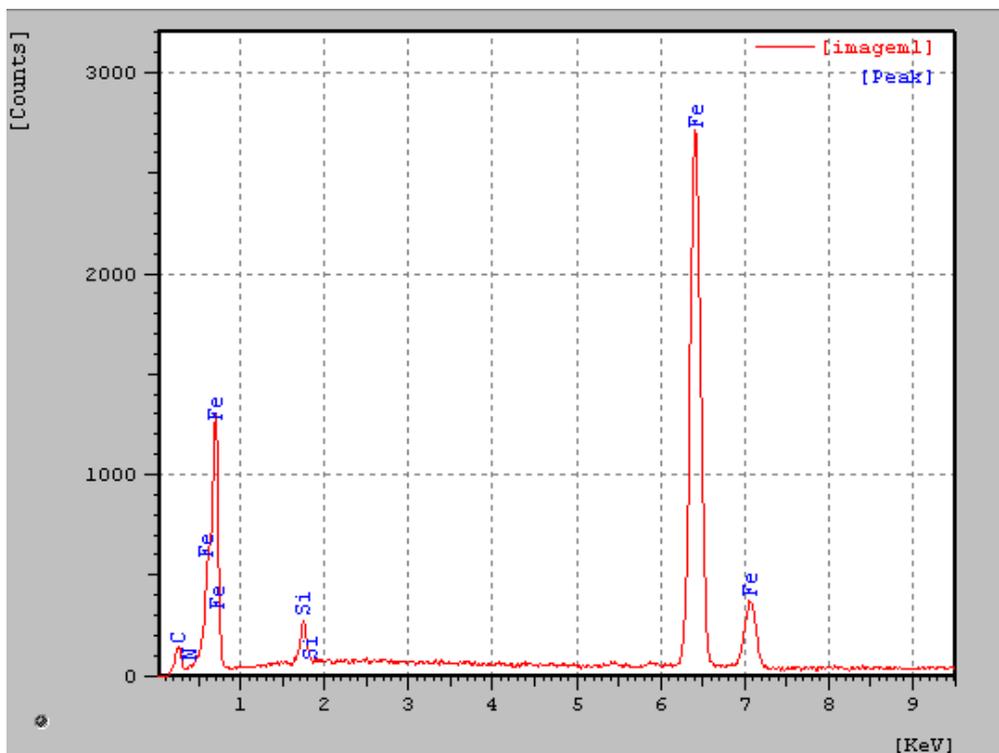
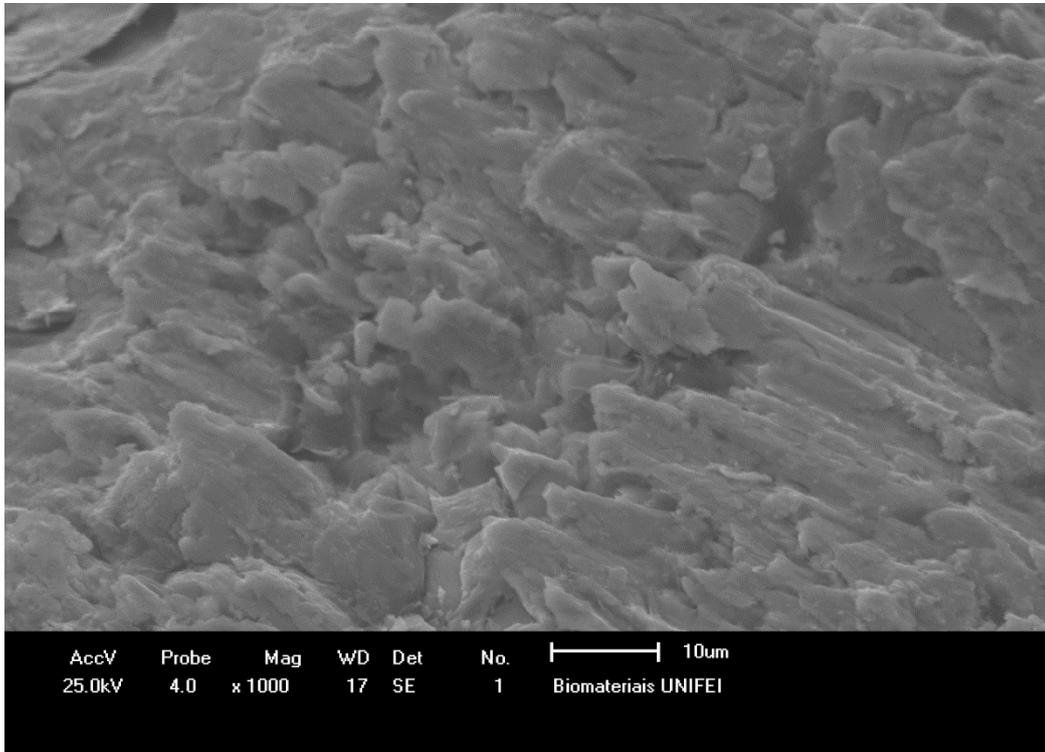
Na Figura 4.6 é apresentada a micrografia do Resíduo Cavaco Metálico obtidas por MEV. Pode se observar por meio da análise de EDS a presença dos elementos constituintes do cavaco metálico. A morfologia dos cavacos é bastante irregular com arestas evidentes e com alta angulosidade, assim como regiões de deformação plástica de superfície originada pela ferramenta de usinagem.

Figura 4.6: Análise do Resíduo Cavaco Metálico pelo MEV.



Na Figura 4.7 (a, b) pode-se observar por meio da análise de EDS a presença dos elementos constituintes do pó de mármore.

Figura 4.7: Análise do Resíduo Cavaco Metálico pelo MEV (EDS)



Fonte: (Próprio autor)

4.1.2.3 Brita Zero (B0)

As características físicas e granulométricas da brita estão dispostas na Tabela 4.3. Pode-se observar nesta tabela a classificação do agregado, que apresenta um módulo de finura de 5,88.

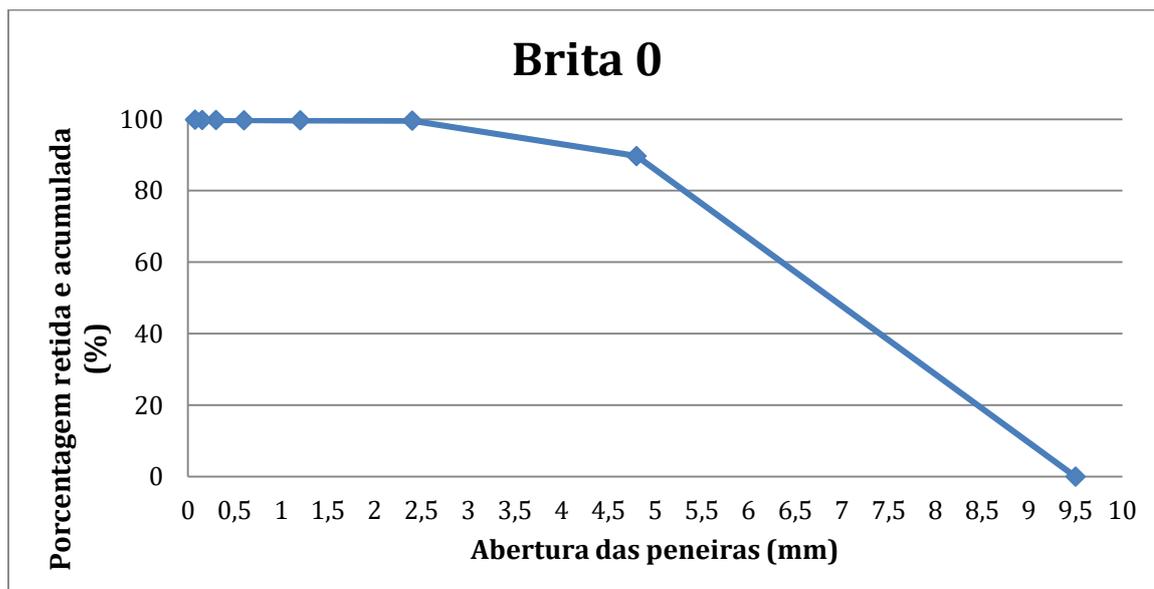
Tabela 4.3: Características físicas e granulométricas da Brita 0

| Abertura da Peneira (mm) | Brita 0 | | |
|---|----------|-------------|------------|
| | % retida | % acumulada | % Passante |
| 9,5 | 0 | 0 | 100 |
| 6,3 | 47,14 | 47,14 | 58,86 |
| 4,8 | 42,56 | 89,704 | 10,30 |
| 2,4 | 9,88 | 99,584 | 0,42 |
| 1,2 | 0,062 | 99,646 | 0,35 |
| 0,6 | 0,0058 | 99,704 | 0,35 |
| 0,3 | 0,034 | 99,738 | 0,31 |
| 0,15 | 0,040 | 99,778 | 0,27 |
| 0,075 | 0,057 | 99,835 | 0,22 |
| >0,075 | 0,217 | 100 | 0,00 |
| Dmax Característica | 9,5 mm | | |
| Módulo de Finura | 5,88 | | |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,65 | | |
| Massa unitária solta (g/cm ³) | 1,57 | | |
| Material fino (passante 75) | 0,217% | | |

Fonte: (Próprio autor)

Na Figura 4.8 podem ser observadas as porcentagens retida e acumulada da brita zero.

Figura 4.8: Análise das porcentagens de retida e acumulada da brita zero.



4.2. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco da pasta, da argamassa e dos concretos CAA-REF e dos CAA-CM para determinação da massa específica do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.

4.2.1 Ensaios da pasta e da argamassa

A Tabela 4.4 apresenta os resultados dos ensaios da pasta e da argamassa referente aos traços dos CAA-REF e dos CAA-CM. Pode-se constatar que todos os concretos apresentaram valores dentro das faixas limite determinadas, comprovando que o volume de superplastificante e finos foi adequado.

Tabela 4.4: Resultado Ensaios de Pastas e Argamassas da CAA-REF e das CAA-CM

| | PASTA | | ARGAMASSA | |
|---------------|--------------------|----------------|-------------------|--------------------|
| | Funil Marsh (s) | Kantro (mm) | Mini Funil (s) | Mini Slump (mm) |
| | Limites | | Limites | |
| | - | 180±10 mm | 2 a 10 s | 250 a 320 mm |
| TRAÇOS | | | | |
| CAA-REF | 45 | 180 | 10 | 300 |
| CAA-CM 25 | 36 | 200 | 5 | 310 |
| CAA-CM 37,5 | 30 | 200 | 5 | 315 |
| CAA-CM 50 | 46 | 190 | 6 | 280 |
| CAA-CM 75 | 66 | 190 | 6 | 300 |

Fonte: (Próprio autor)

4.2.2 Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico (ABNT NBR 9833:2009)

Os ensaios para determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico (ABNT NBR 9833:2009) foram realizados com o concreto no estado fresco e estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Características do concreto estudado

| Traço | Massa Específica (kg/m ³) | Rendimento (m ³) | Massa do cimento (Kg) | Volume Total (m ³) | Índice de ar(%) | Teor de ar (%) |
|------------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------|----------------|
| CAA-REF | 2400,62 | 0,126 | 450,72 | 0,125 | 1,010 | 0,98 |
| CAA-CM25 | 2493,77 | 0,074 | 466,66 | 0,072 | 1,019 | 1,84 |
| CAA-CM37,5 | 2530,82 | 0,075 | 474,18 | 0,073 | 1,027 | 2,59 |
| CAA-CM50 | 2614,6 | 0,075 | 489,99 | 0,073 | 1,021 | 2,06 |
| CAA-CM75 | 2774,2 | 0,075 | 519,10 | 0,074 | 1,017 | 1,70 |

Fonte: (Próprio autor)

De acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015) os concretos CAA-REF e os CAA-CM são classificados como concreto normal, pois o valor de suas massas específicas se encontram entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³. A massa específica dos CAA-CM é maior que a do CAA-REF em função da maior densidade do cavaco metálico que substituiu a areia. A densidade do concreto aumentou proporcionalmente com o aumento da substituição de areia por cavaco metálico, isso também foi constatado por outros pesquisadores (QASRAWI et al., (2009); POOVIZHI; KATHIRVEL (2015); SINGH; SIDDIQUE (2016).

4.2.3 Ensaios do concreto no estado fresco

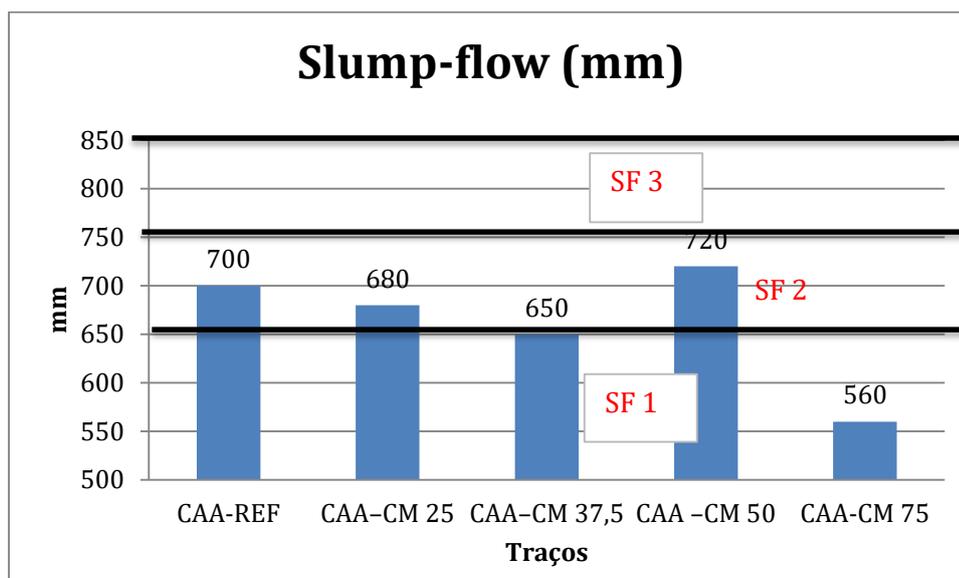
A Tabela 4.6 apresenta os resultados dos ensaios no estado fresco dos concretos CAA-REF e dos CAA-CM produzidos nesta pesquisa. Os limites apresentados são valores especificados pela norma brasileira NBR 15823-(ABNT,2017) que classifica o concreto como autoadensável.

Tabela 4.6: Caracterização do concreto autoadensável no estado fresco.

| Propriedades | Limites | CAA-REF | CAA - CM 25 | CAA- CM 37,5 | CAA - CM 50 | CAA- CM 75 |
|---|---|-------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|
| Consumo de cimento / Kg / m ³ | - | 450,72 | 466,66 | 474,18 | 489,99 | 519,10 |
| Massa específica (kg/m ³) – NBR | - | 2400,62 | 2493,77 | 2530,82 | 2614,6 | 2774,2 |
| Teor de ar aprisionado (%) | < 2% | 0,98,% | 1,84% | 2,59% | 2,06% | 1,70% |
| Slump-flow, d _f (mm) – NBR | SF1-550a650mm SF2-660a750mm SF3-760a850mm | 700 SF2 | 680 SF2 | 650 SF1 | 720 SF2 | 560 SF1 |
| Slump-flow, VSI NBR | - | IEV 0 | IEV 0 | IEV 0 | IEV 1 | IEV 3 |
| Slump-flow, T ₅₀₀ (s) – NBR | VS1 ≤ 2s VS2 > 2s | 6s VS2 | 6s VS2 | 3s VS2 | 2s VS1 | 3s VS2 |
| Caixa L, (H ₂ /H ₁) – NBR | PL1 ≥ 0,80c/2b PL2 ≥ 0,80/3b | 0,91 PL2 | 0,82 PL2 | 0,81 PL2 | 0,99 PL2 | 0,39 |
| Funil V, t _v (s) – NBR | VF1 ≤ 8s VF2 9a25s | 9s VF2 | 7s VF1 | 8s VF1 | 4s VF1 | 10s VF2 |
| Ruptura do cp a tração, análise visual das faces rompidas | Segregação aparente dos agregados | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente |

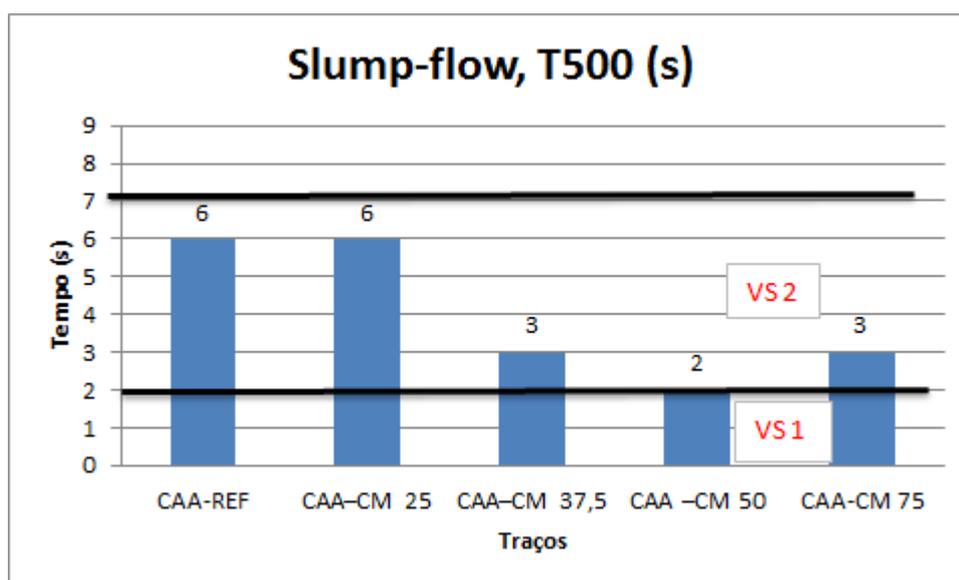
Constata-se que tanto o CAA-REF quanto os CAA-CM atenderam os limites estabelecidos pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017), para os ensaios de espalhamento, apresentados na Figura 4.9 e para o espalhamento T₅₀₀ apresentados na Figura 4.10.

Figura 4.9. Valores de Slump Flow para a mistura de CAA- REF e CAA- CM.



Fonte: (Próprio autor)

Figura 4.10. Valores de Slump Flow T500 para a mistura de CAA- REF e CAA- CM.

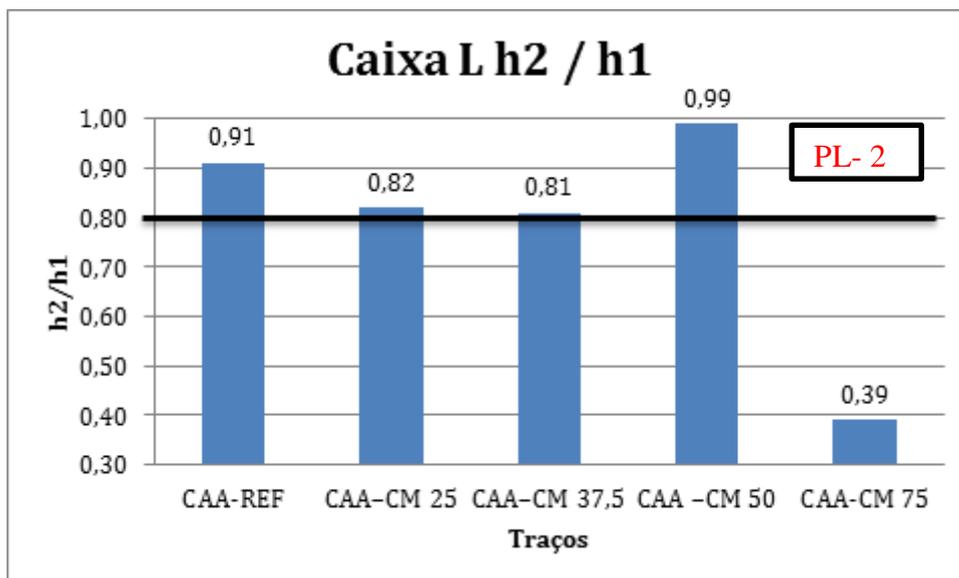


Fonte: (Próprio autor)

Os valores da Caixa L, que indicam a capacidade de passagem do concreto, apresentaram-se dentro dos limites da norma NBR 15823-4 (ABNT, 2017). Pode ser observado na Figura 4.11 que a taxa de bloqueio apresentou valores de 0,91 para o CAA-REF e valores de 0,82, 0,81 e 0,99 para os CAA-CM25, CAA-CM37,5 e CAA-CM50 respectivamente. Como no teste de habilidade de passagem as razões de bloqueio estão acima de 0,8 todos foram classificados como PA₂. Apenas o CAA-CM75 não apresentou a capacidade de passagem para ser classificado como

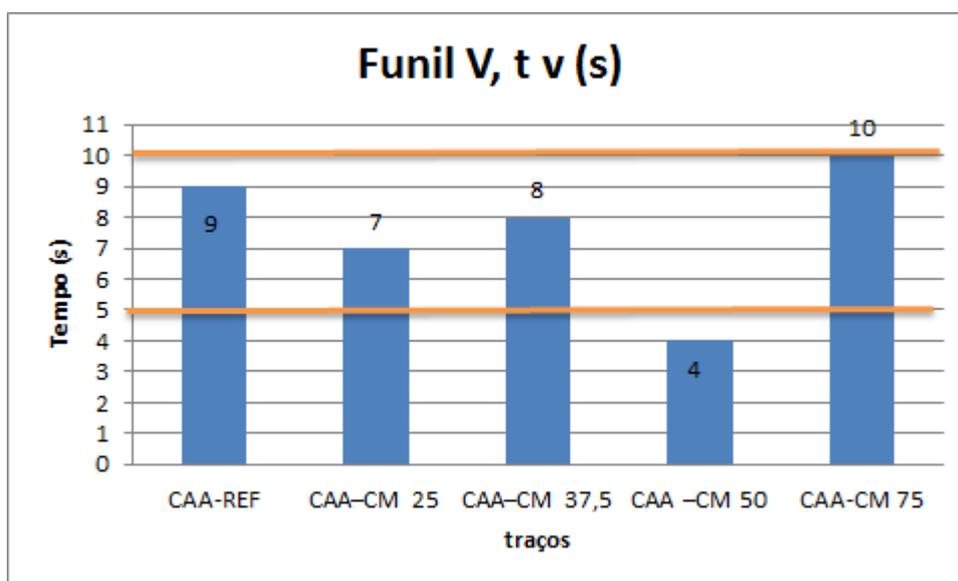
um CAA, alcançando valor inferior a 0,40. Na Figura 4.12, são mostrados os valores do Funil para a mistura CAA- REF e CAA- CM.

Figura 4.11. Valores de Caixa L (H_2 / H_1) para a mistura de CAA-REF e CAA-CM.



Fonte: (Próprio autor)

Figura 4.12: Valores do Funil V (s) para a mistura de CAA-REF e CAA-CM.



Fonte: (Próprio autor)

Ainda assim, todos os concretos se enquadram dentro dos limites de um CAA, com exceção do CAA-CM 75. A morfologia e textura dos agregados têm uma importância muito significativa nas propriedades do concreto, podendo interferir na trabalhabilidade do concreto fresco e na resistência mecânica do concreto endurecido. Qasraw et al.(2009), Devi e Ganavel; Khajuria e Siddique (2014) e Singh e Siddique (2016) relataram que o uso de escoria de aço aumentou a densidade do concreto como pode ser comprovado neste estudo.

Singh e Siddique (2016) concluíram que incorporar escória de ferro proporciona melhor resistência e durabilidade ao CAA e que a trabalhabilidade das misturas diminuiu com o aumento da escória de ferro devido à sua superfície rugosa e a forma angulosa que aumenta o atrito entre as partículas. Assim como constatado por Qasrawi et al. (2009), Devi e Ganavel (2014) houve uma queda na trabalhabilidade dos concretos com adições de resíduos cavacos metálicos, e corroborando com eles resultados decrescentes de valores de slump flow e caixa L são encontrados neste trabalho.

Já Wu et al. (2010) inferiram que a trabalhabilidade do concreto melhora com adição de escória de cobre devido às suas características de superfície polida e lisa e a seu baixo índice de absorção.

Pan et Al. (2019) estudaram o efeito da substituição do cimento portland por pó de escória de aço na proporção de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% sobre as propriedades de trabalhabilidade, e nas propriedades mecânicas e de durabilidade do CAA. Os resultados mostraram que a substituição do pó de escória de aço melhorou a habilidade de preenchimento e a capacidade de passagem, mas afetaram adversamente a resistência à segregação.

4.3. RESULTADOS PROVENIENTES DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO DO CAA

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios do concreto no estado endurecido analisando as características de resistência, tais como resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo dinâmico de elasticidade e o de dureza de esclerômetro. Os resultados dos ensaios de análise das características de durabilidade, a saber: determinação da absorção de água por imersão (índice de vazios), massa específica, absorção por capilaridade e assim como o de resistividade elétrica para os corpos de prova em câmara úmida e em ambiente de laboratório.

4.3.1 Ensaio de resistência à compressão (NBR 5739:2018)

Na Tabela 4.7 é mostrado os resultados da resistência à compressão do concreto CAA-REF e CAA-CM, aos 7 e 28 dias, onde $f_{c, data}$.

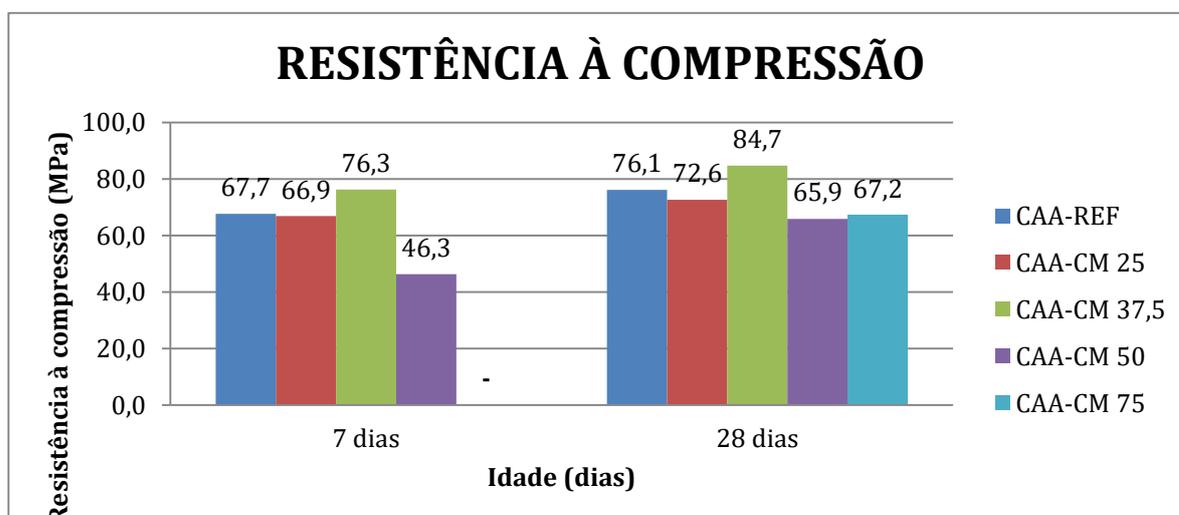
Tabela 4.7: Resultados dos ensaios de resistência à compressão, CAA REF e CAA CM.

| | CAA-REF | | CAA-CM 25 | | CAA-CM 37,5 | | CAA-CM 50 | | CAA-CM 75 | |
|------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Corpo de prova | $f_{c,7}$ MPa | $f_{c,28}$ MPa |
| CP1 | 71,28 | 45,14 | 72,78 | 74,87 | 78,66 | 81,24 | 45,97 | 9,51 | - | 68,51 |
| CP2 | 66,28 | 76,64 | 54,34 | 71,98 | 75,08 | 91,03 | 47,00 | 66,10 | - | 65,60 |
| CP3 | 65,41 | 74,71 | 47,56 | 61,26 | 74,17 | 84,48 | 43,83 | 68,77 | - | 46,65 |
| CP4 | 57,11 | 76,84 | 73,47 | 70,80 | 77,24 | 81,90 | 48,56 | 62,72 | - | 67,46 |
| Média (MPa) | 67,70 | 76,10 | 66,90 | 72,60 | 76,20 | 84,70 | 46,30 | 65,90 | - | 67,20 |
| S (MPa) | 3,16 | 1,18 | 10,86 | 2,10 | 2,0 | 4,47 | 1,62 | 3,03 | - | 1,47 |
| CV (%) | 4,68 | 1,55 | 16,24 | 2,89 | 2,67 | 5,28 | 3,49 | 4,60 | - | 2,19 |
| $f_{c, \text{máximo}}$ | 71,28 | 76,84 | 73,47 | 74,87 | 78,66 | 81,25 | 48,56 | 68,77 | - | 68,51 |
| $f_{c, \text{mínimo}}$ | 57,11 | 45,14 | 47,56 | 61,27 | 74,17 | 91,04 | 43,83 | 59,51 | - | 46,65 |

Fonte: (Próprio autor)

Na Figura 4.13 são apresentados os valores de resistência à compressão para os concretos CAA REF e CAA CM nas idades de 7 e 28 dias.

Figura 4.13: Resultados do ensaio de compressão para os concretos CAA REF e CAA CM nas idades de 7 e 28 dias.



Fonte: (Próprio autor)

Todas as composições de CAA estudadas foram classificadas como concreto estrutural segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015) e todas são pertencentes à classe do grupo II, cuja resistência à compressão é superior a 55 MPa sendo considerados concretos de alta resistência e alto desempenho. A resistência à compressão do CAA-REF se mostrou superior em 4,8% ao CAA-CM 25, 15,4% ao CAA-CM 50 e 11,7% ao CAA-CM 75 e se mostrou 11,15% inferior ao CAA-CM 37,5. Porém todos, sem exceção, apresentaram valores superiores a 65 MPa aos 28 dias. O CAA-CM 37,5 apresentou os melhores resultados de resistência à compressão tanto aos sete quanto aos 28 dias de idade. Não foi realizado ensaio do CAA-CM 75 aos 7 dias de idade.

Nesta pesquisa os melhores resultados para resistência a compressão foram obtidos para a mistura de 37,5 %. De acordo com Qasraw et al. (2009) a utilização de escória de aço afetou negativamente a trabalhabilidade do cimento, particularmente as proporções de substituição acima de 50% e os melhores resultados para resistência à compressão foram obtidos quando as proporções de substituição ficaram em torno de 15 a 30%. Estes autores relataram também que o uso de escoria de aço aumentou a densidade do concreto. Poovizhi e Kathirvel (2015) também constataram que a densidade do concreto aumentou com o incremento da substituição da areia por escória de cobre e que o aumento máximo da resistência à compressão ocorreu com 40% de substituição da areia natural por escória de cobre.

Devi e Gananavel (2014) relataram que houve diminuição da trabalhabilidade com aumento da taxa de substituição da areia por escoria de aço. Ocorreu um aumento da resistência à compressão do concreto em 27,04% e resistência a tração obteve aumento de 9,29% em relação a mistura controle cuja areia foi substituída por 40% de escoria de aço. Para Khajuria e Siddique (2014), o uso de escória de ferro proporciona um aumento da resistência à compressão com até 30% de substituição e Al Jabri et al. (2009) encontraram melhores resultados de compressão com 50% de substituição de areia por escória de cobre.

4.3.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222:2011)

Na Tabela 4.8 são indicados os valores dos resultados individuais da resistência à tração dos concretos CAA-REF e CAA-CM, aos 7 e 28 dias, onde $f_{ct\ sp, data}$.

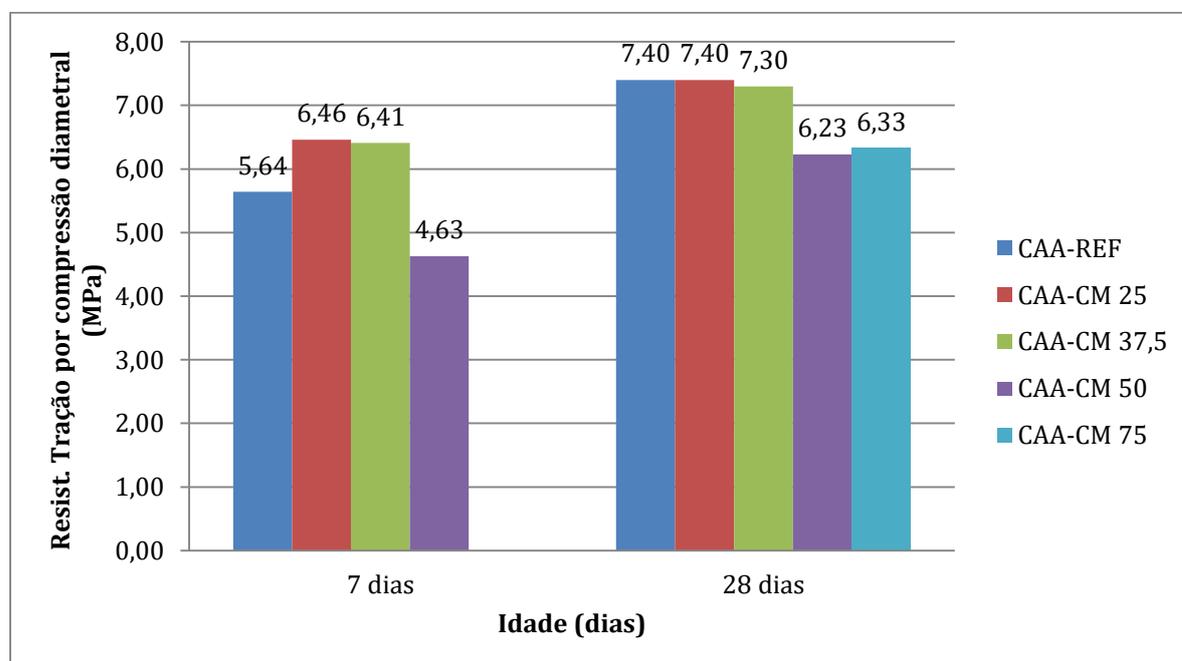
Tabela 4.8: Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos concretos CAA-REF e CAA-CM.

| Corpo de prova | CAA-REF | | CAA-CM 25 | | CAA-CM 37,5 | | CAA-CM 50 | | CAA-CM 75 | |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | F _{ct, sp 7} (MPa) | F _{ct, sp28} (MPa) | F _{ct, sp 7} (MPa) | F _{ct, sp28} (MPa) | F _{ct, sp 7} (MPa) | F _{ct, sp28} (MPa) | F _{ct, sp 7} (MPa) | F _{ct, sp28} (MPa) | F _{ct, sp7} (MPa) | F _{ct, sp28} (MPa) |
| CP1 | 5,61 | 6,51 | 6,42 | 7,45 | 6,95 | 6,26 | 4,60 | 6,05 | - | 5,61 |
| CP2 | 5,68 | 8,28 | 6,51 | 7,42 | 5,87 | 7,54 | 4,65 | 6,41 | - | 7,05 |
| CP3 | - | - | - | 7,38 | 5,70 | 7,07 | 4,05 | 4,38 | - | - |
| Média \bar{x} (MPa) | 5,64 | 7,40 | 6,46 | 7,40 | 6,41 | 7,30 | 4,63 | 6,23 | - | 6,33 |
| S (MPa) | 0,05 | 1,25 | 0,07 | 0,02 | 0,76 | 0,90 | 0,04 | 0,25 | - | 1,02 |
| CV (%) | 0,94 | 16,91 | 0,59 | 0,04 | 11,92 | 12,38 | 0,80 | 4,08 | - | 16,07 |

Fonte: (Próprio autor)

Na Figura 4.14 é mostrado os valores de média da resistência à tração por compressão diametral para os concretos CAA-REF e CAA-CM nas idades de 7 e 28 dias.

Figura 4.14: Resultados do ensaio de tração por compressão para os concretos CAA-REF e CAA-CM nas idades de 7 e 28 dias.



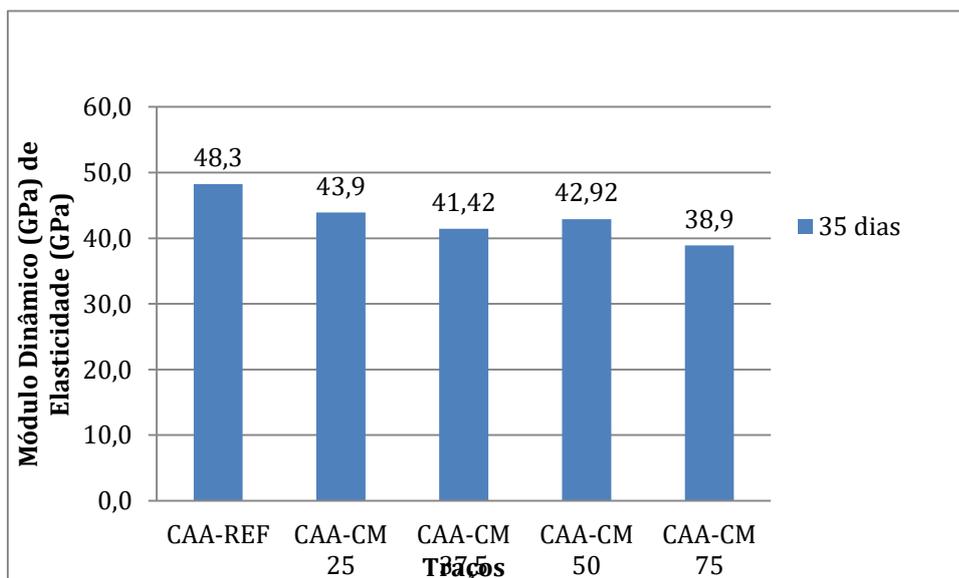
Fonte: (Próprio autor)

A resistência à tração dos concretos CAA-REF e CAA-CM corresponde em média, a cerca de 10% da sua resistência à compressão, respectivamente CAA-REF-9,7%, CAA-CM- 25-10,2%, CAA-CM 37,5-8,6%, CAA-CM 50-9,5% e CAA-CM 75- 9,4%. Singh e Siddique (2016) encontraram valores de 7,5% e 8,5% de tração em relação à compressão aos 28 dias, respectivamente para a mistura com escória de ferro e para a mistura controle. Nesta pesquisa, os maiores valores de tração por compressão são obtidos para a substituição de até 37,5% de areia por cavacos metálicos. Os valores alcançados por CAA-CM 25 e CAA-CM 37,5 se equiparam aos valores do CAA-REF, porém, ocorreu uma redução em torno de 16% nos valores de resistência do CAA-CM 50 e CAA-CM 75 em relação ao CAA-REF. Devi e Gannavel (2014) encontraram aumento de 9,29% da resistência à tração com a substituição de 40% de areia por escória de aço. Já Al Jabri et al. (2009) constataram um aumento máximo de 26,7% para 40 e 50% de substituição de areia por escória de cobre e Velumani e Nirmalkumar (2014) relataram melhora de 48% na resistência a tração quando substituíram 40% de areia por escória de cobre.

4.3.3 Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico (ASTM 1876-01)

Na Figura 4.15 e na Tabela 4.9 são apresentados os valores do módulo de elasticidade dinâmico para os concretos CAA-REF e CAA-CM aos de 35 dias de idades.

Figura 4.15: Valores do módulo de elasticidade dinâmico para os concretos CAA REF e CAA CM aos 35 dias de idade.



Fonte: (Próprio autor)

Tabela 4.9: Valores do módulo de elasticidade dinâmico para os concretos CAA REF e CAA CM nas idades de 35 dias

| Resultado Módulo de Elasticidade Dinâmico (Ed) em GPa (35 dias) | | | |
|---|-----------------------------|----------|----------|
| TRAÇO CAA | ρ (kg/m ³) | Ed (GPa) | Ed (Pa) |
| CAA-REF | 2340 | 48,3 | 4,83E+10 |
| CAA-CM 25 | 2470 | 43,9 | 4,39E+10 |
| CAA-CM 37,5 | 2480 | 41,42 | 4,14E+10 |
| CAA-CM 50 | 2520 | 42,92 | 4,29E+10 |
| CAA-CM 75 | 2800 | 38,9 | 3,89E+10 |

Fonte: (Próprio autor).

Para obter o módulo de elasticidade estático (cordal) a partir valor do módulo de elasticidade dinâmico adota-se o modelo desenvolvido por Popovics, apresentado na Equação 21.

$$E_c = 0,107 \times Ed^{1,4} \times \rho^{-1} \quad (21)$$

Sendo: os valores de entrada correspondem à densidade do concreto (ρ) em kg/m³ e ao módulo de elasticidade dinâmico (Ed) em Pa.

A Tabela 4.10 apresenta os valores calculados do Módulo de elasticidade estático pela Equação de Popovics.

Tabela 4.10: Módulo de Elasticidade Estático (Ec) em GPa

| Módulo de Elasticidade Estático (Ec) em GPa | | | |
|---|-----------------------------|----------|----------|
| TRAÇO CAA | ρ (kg/m ³) | Ec (GPa) | Ec (Pa) |
| CAA-REF | 2340 | 41,42 | 4,14E+10 |
| CAA-CM 25 | 2470 | 34,37 | 3,44E+10 |
| CAA-CM 37,5 | 2480 | 31,55 | 3,16E+10 |
| CAA-CM 50 | 2520 | 32,64 | 3,26E+10 |
| CAA-CM 75 | 2800 | 25,60 | 2,56E+10 |

Fonte: (Próprio autor)

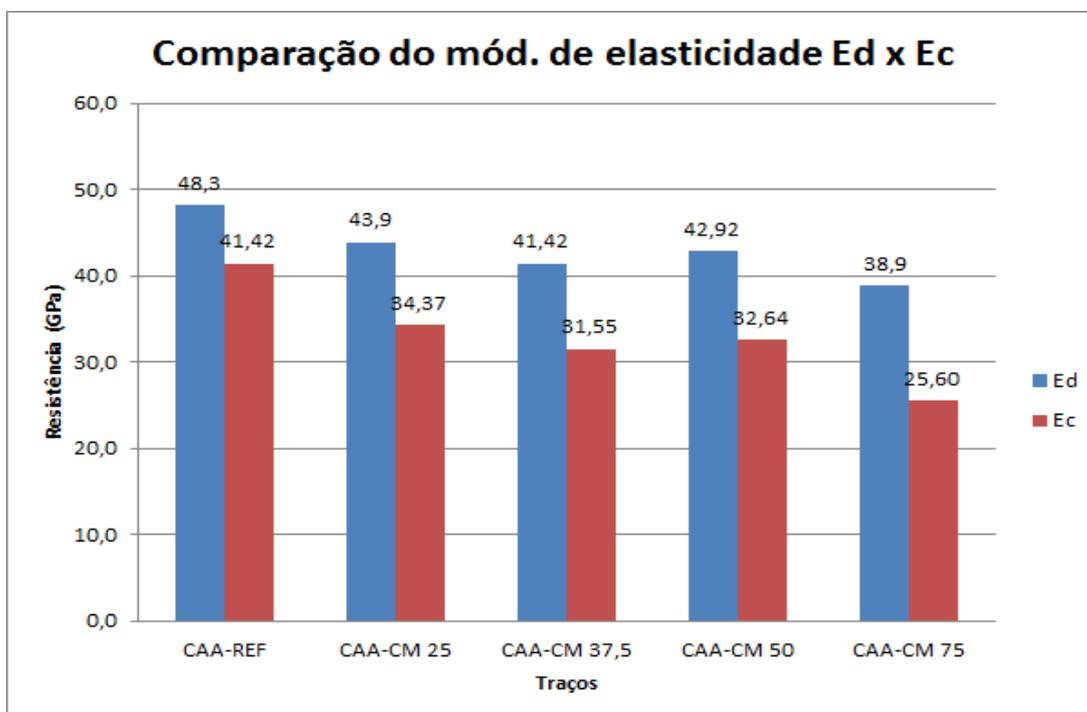
Na Figura 4.16 e na Tabela 4.11 são apresentados os valores de comparação do módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático para os concretos CAA REF e CAA CM na idade de 35 dias.

Tabela 4.11: Comparação dos Módulos de elasticidade estático (Ec) e dinâmico (Ed)

| Módulo de Elasticidade Estático (Ec) e Dinâmico Ed | | | |
|--|---------------------------------|----------|---------|
| TRAÇO CAA | (ρ) (Kg/m ³) | Ec (GPa) | Ed(GPa) |
| CAA-REF | 2340 | 41,42 | 48,30 |
| CAA-CM 25 | 2470 | 34,37 | 43,90 |
| CAA-CM 37,5 | 2480 | 31,55 | 41,42 |
| CAA-CM 50 | 2520 | 32,64 | 42,92 |
| CAA-CM 75 | 2800 | 25,60 | 38,90 |

Fonte: (Próprio autor)

Figura 4.16: Comparação dos Módulos de elasticidade estático (Ec) e dinâmico (Ed)



4.3.4 Ensaio de avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão (NBR 7584:1995)

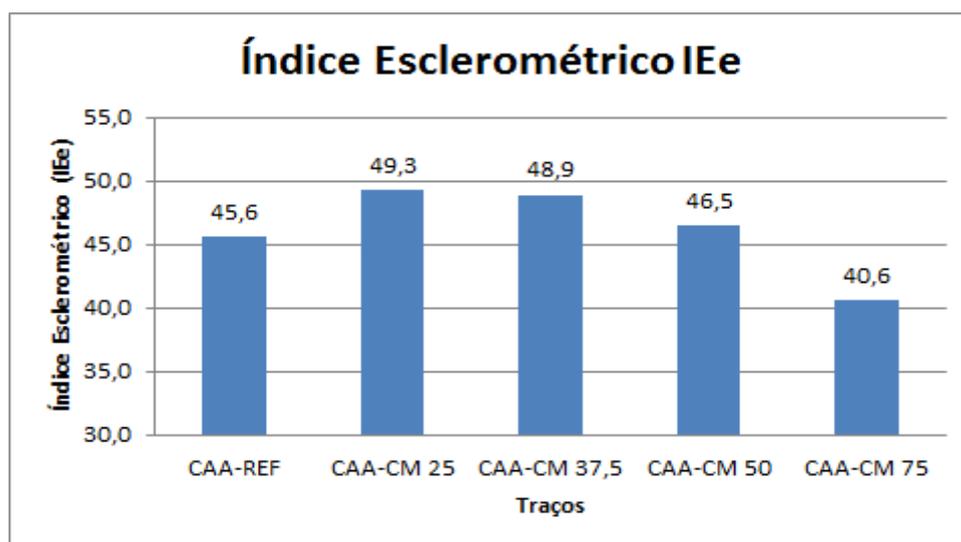
Na Tabela 4.12 são apresentados os valores dos IEe, das resistências cúbicas, dado pelo equipamento, e as resistências cilíndricas equivalentes (calculada por 0,85 da cúbica) para os concretos CAA-REF e CAA-CM aos de 35 dias de idades.

Tabela 4.12: Valores de IEe, da resistência cúbica, das resistências cilíndricas

| Resultado do Ensaio dureza esclerômetro (35 dias) | | | |
|--|------------|-----------------------------|--|
| TRAÇO CAA | IEe(médio) | Tabela Resist. Cúbica (MPa) | Resist. Cilíndrica (MPa) (0,85xcúbica) |
| CAA-REF | 45,6 | 50,7 | 43,1 |
| CAA-CM25 | 49,3 | 56 | 47,6 |
| CAA-CM37,5 | 48,9 | 57,1 | 48,5 |
| CAA-CM50 | 46,5 | 52,5 | 44,6 |
| CAA-CM75 | 40,6 | 41,6 | 35,4 |

Na Figura 4.17 são apresentados os valores dos índices esclerométrico efetivo para cada concreto (CAA REF e CAA CM) na idade de 35 dias.

Figura 4.17: Índice esclerométrico efetivo.

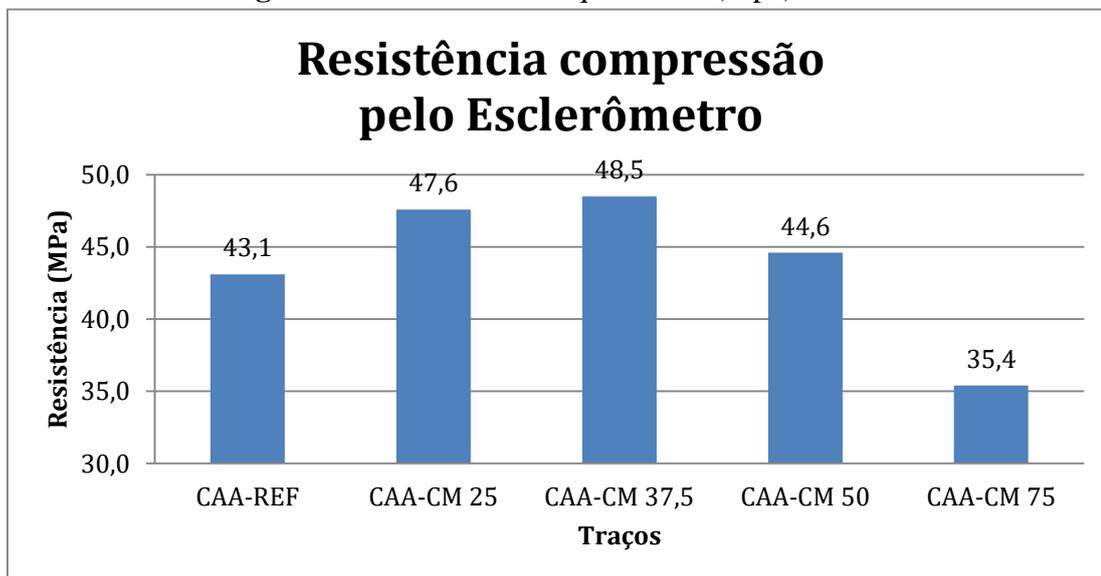


Fonte: (Próprio autor)

Na Figura 4.18 são apresentados os valores de resistência em função dos índices esclerométrico efetivo para cada concreto (CAA REF e CAA CM) na idade de 35 dias. Como

relatado por Sheen et al. (2015), um IEE maior representa uma superfície de concreto mais dura e é acompanhada de maior resistência à compressão. Isto corrobora com o resultado desta pesquisa que obteve o CAA-CM 37,5 com o maior IEE e apresentou a maior resistência à compressão de todas as misturas.

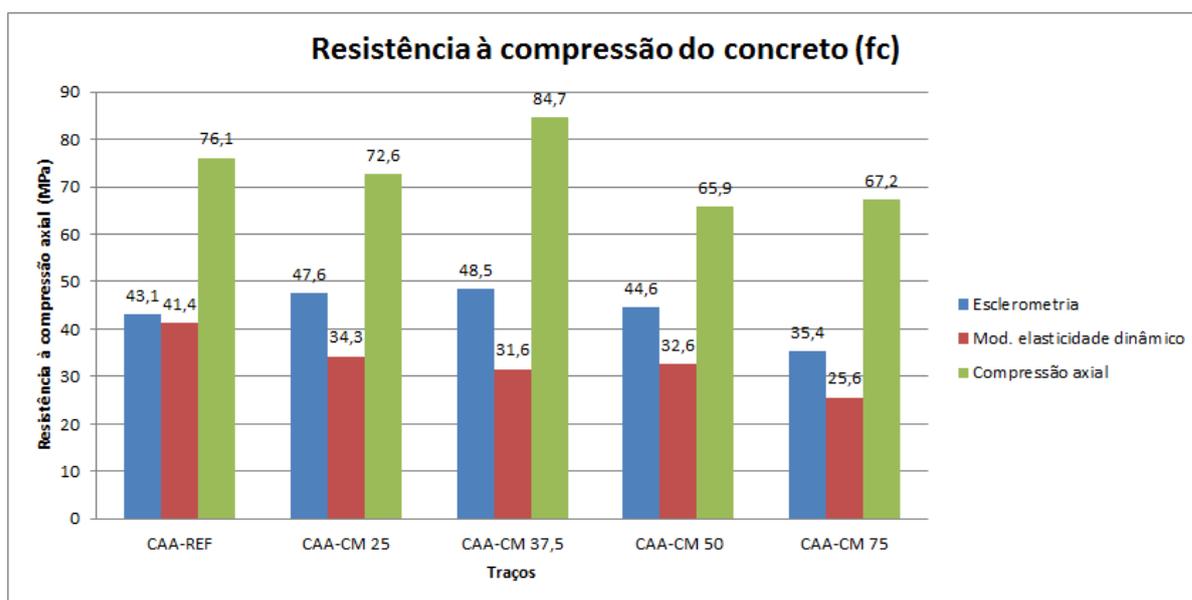
Figura 4.18: Resistência equivalente (Mpa) ao IEE.



Fonte: (Próprio autor)

Na Figura 4.19 é apresentada uma comparação dos valores de resistência à compressão dos concretos encontrados respectivamente nos ensaios de esclerometria, módulo de elasticidade dinâmico e compressão axial.

Figura 4.19: Comparação dos valores de resistência à compressão dos concretos dos ensaios de esclerometria, módulo de elasticidade dinâmico e compressão axial.



Fonte: (Próprio autor)

4.3.5 Determinação da absorção de água por imersão-índice de vazios e massa específica segundo a (NBR 9778:2009)

Na Tabela 4.13 é indicado os valores dos ensaios de absorção por imersão e índice de vazios dos concretos CAA-REF e CAA-CM.

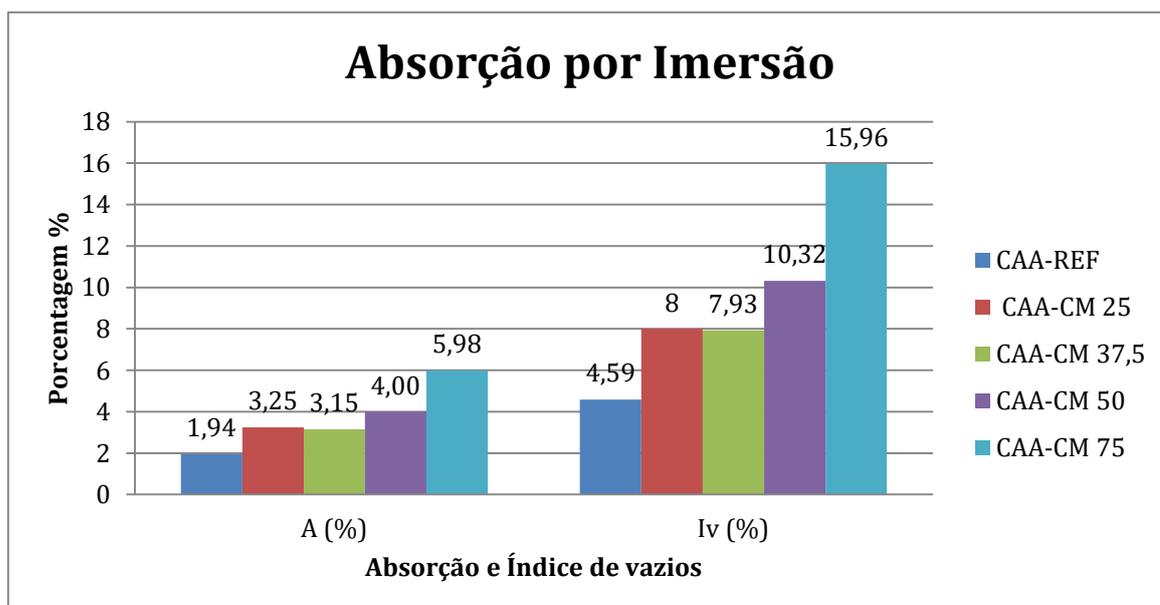
Tabela 4.13: Ensaio de absorção por imersão para os concretos CAA-REF e CAA-CM.

| Ensaio de absorção por imersão | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Traço | Massa Específica (kg/m ³) | | | Absorção por imersão (A) (%) | Índice de vazios (Iv) (%) |
| | ρ_{Seca} | $\rho_{Saturada}$ | ρ_{Real} | | |
| CAA REF | 2,36 | 2,41 | 2,47 | 1,94 | 4,59 |
| CAA-CM 25 | 2,46 | 2,54 | 2,67 | 3,25 | 8,00 |
| CAA-CM 37,5 | 2,35 | 2,60 | 2,74 | 3,15 | 7,93 |
| CAA-CM 50 | 2,57 | 2,68 | 2,87 | 4,00 | 10,32 |
| CAA-CM 75 | 2,67 | 2,83 | 3,18 | 5,98 | 15,96 |

Fonte: (Próprio autor)

Na Figura 4.20 são apresentados os valores de absorção por imersão A (%) e índice de vazios Iv (%) para o concreto CAA REF e CAA CM.

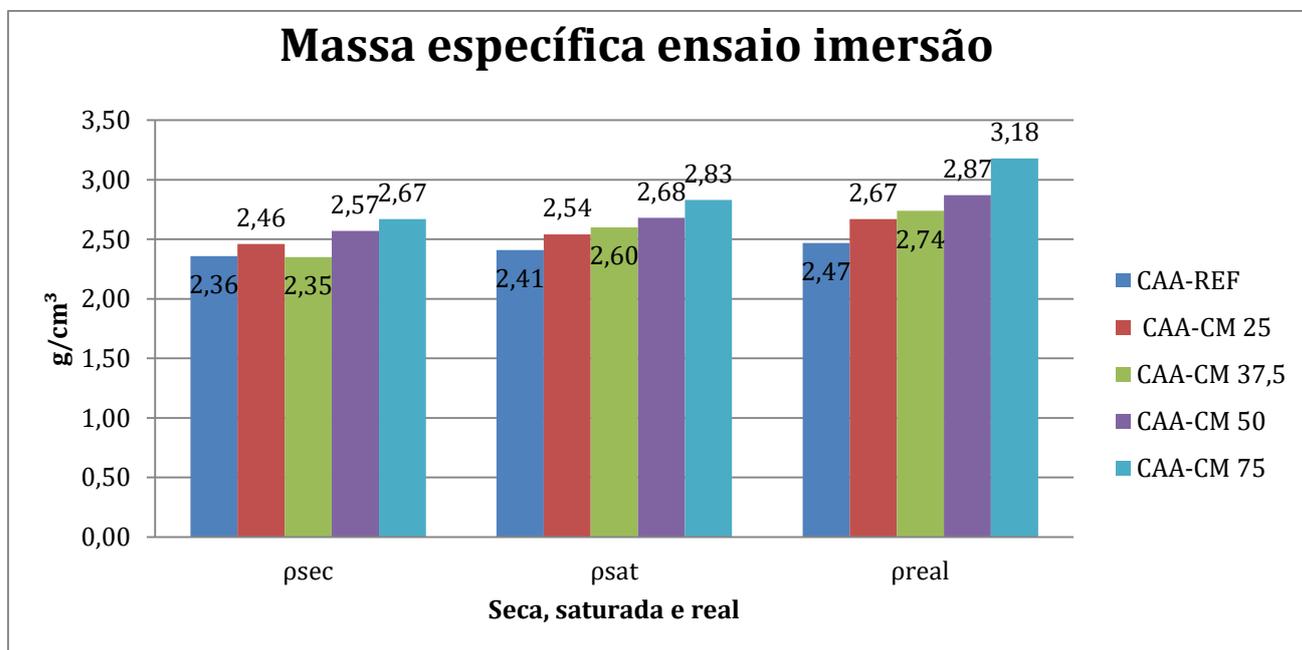
Figura 4.20: Resultados do ensaio de absorção por imersão A (%) e índice de vazios Iv (%) dos concretos CAA-REF e CAA-CM.



Fonte: (Próprio autor)

Na Figura 4.21 são apresentados os valores das massas específicas seca, saturada e real encontrados no ensaio de absorção por imersão dos concretos CAA REF e CAA CM.

Figura 4.21: Massas específicas seca, saturada e real dos concretos estudados.



Fonte: (Próprio autor)

Analisando os resultados encontrado no ensaio de porosidade ou índice de vazios ($I_v\%$), pode-se verificar que tanto o CAA-REF quanto os CAA-CM 25 e CAA-CM 37,5 apresentam valores $\leq 10\%$, indicando serem concretos classificados como duráveis. O CAA-CM 50 apresenta valor de $I_v\%$ entre 10 e 15% indicando ser um concreto classificado como normal. Já o CAA-CM 75 apresentou valor de $I_v\%$ maior que 15%, portanto classificado como concreto deficiente (HELENE; TERZIAN,1992).

Observando os resultados supramencionados para o ensaio de absorção de água por imersão ($A\%$), pode-se indicar que a qualidade dos concretos CAA-REF e CAA-CM 25, CAA-CM 37,5 e CAA-CM 50 é considerada durável, pois tem valores de $A\%$ inferiores a 4,2%. Já o CAA-CM 75 se enquadra na classificação de concreto normal pois seu valor de $A\%$ se encontra dentro da faixa de 4,2 a 6,3% (HELENE; TERZIAN,1992).

Al-Jabri et al. (2009) e Velumani e Nirmalkumar (2014) concluíram que com até 40% de substituição de areia por escória de cobre, houve uma redução na absorção da água superficial.

Os critérios adotados para avaliação da qualidade do concreto em relação a porosidade e absorção de água, de acordo com Helene e Terzian, 1992 são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14. Critérios para avaliação da qualidade do concreto

| Qualidade do concreto | Porosidade (%) | Absorção de água (%) |
|-----------------------|----------------|----------------------|
| Deficiente | ≥ 15 | $>6,3$ |
| Normal | 10-15 | 4,2 a 6,3 |
| Durável | ≤ 10 | $<4,2$ |

Fonte: HELENE; TERZIAN (1992).

4.3.6 Ensaio de Absorção por capilaridade (NBR 9779/2012)

Na Tabela 4.15 é indicado os valores dos ensaios de absorção por capilaridade dos concretos CAA-REF e CAA-CM.

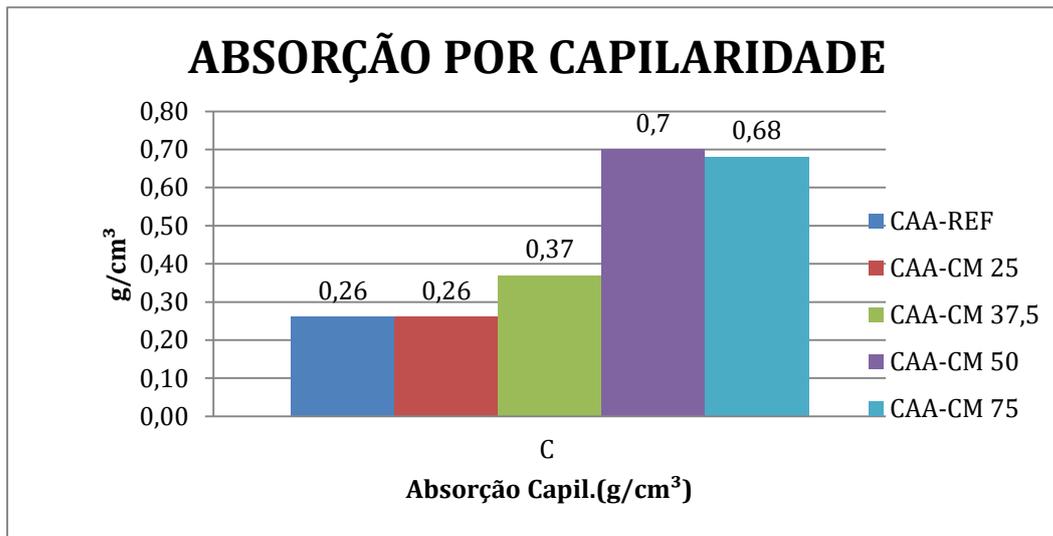
Tabela 4.15: Ensaio de absorção por capilaridade dos concretos CAA REF e CAA CM.

| Ensaio de Absorção por capilaridade | | |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------|
| Traço | (C) g/cm ² | (C) % massa |
| CAA-REF | 0,26 | 0,58 |
| CAA-CM 25 | 0,26 | 0,52 |
| CAA-CM 37,5 | 0,37 | 0,72 |
| CAA-CM 50 | 0,7 | 1,37 |
| CAA-CM 75 | 0,68 | 1,27 |

Fonte: (Próprio autor)

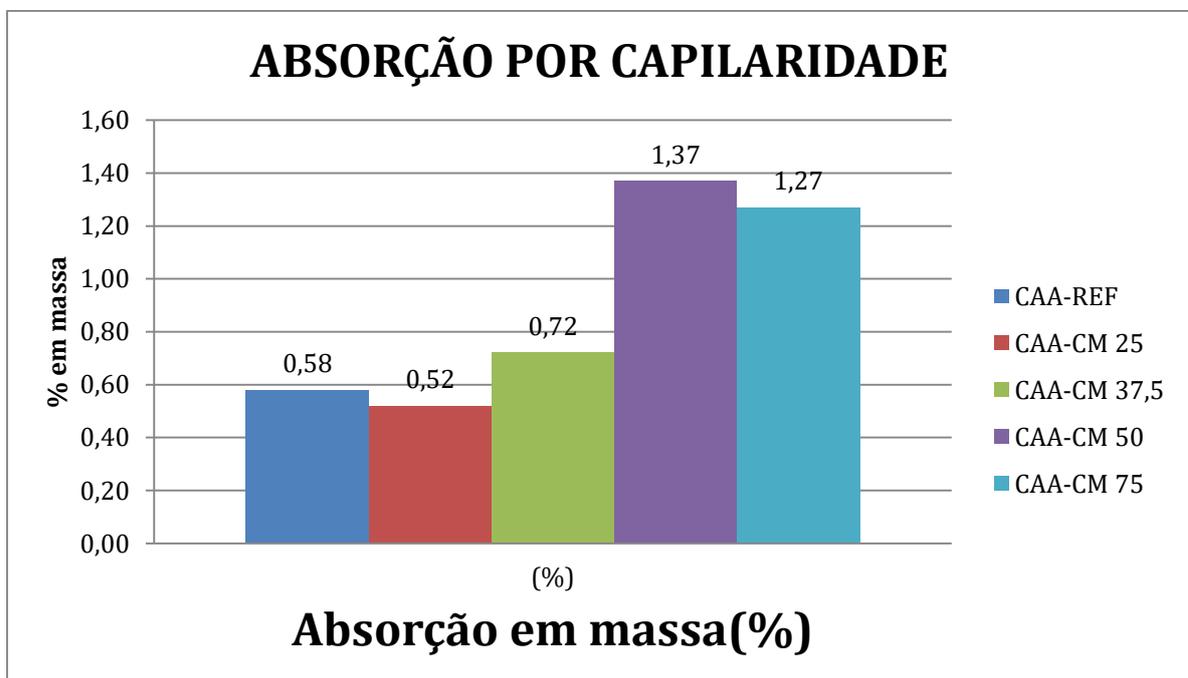
Na Figura 4.22 é mostrado os valores de absorção por capilaridade (C) em g/cm³ para o concreto CAA-REF e CAA-CM. Na Figura 4.23 é mostrado os valores de absorção por capilaridade % de massa.

Figura 4.22: Resultados do ensaio de absorção por capilaridade (C) dos concretos CAA REF e CAA CM.



Fonte: (Próprio autor)

Figura 4.23: Resultados do ensaio de absorção por capilaridade em % de massa dos concretos CAA REF e CAA CM.



Fonte: (Próprio autor)

Singh e Siddique (2016) concluíram que a absorção de água das misturas com escória de ferro foi menor que a mistura controle em todas as idades de cura. Chitra e Kumar Senthil (2016)

investigaram concreto de alta resistência preparado com escória de cobre como substituto dos agregados miúdos e concluíram que a absorção de água foi reduzida com o aumento de até 40% de substituição.

Segundo Neville (1982) um concreto pode ser considerado de boa qualidade quando apresenta valor de absorção capilar em massa $< 10\%$. Observando a Tabela 4.12 e a Figura 4.10 pode-se indicar que os valores de absorção para os CAA-REF e todos os CAA-CM são muito inferiores ao limite apresentado pelo autor (op.cit.). Embora os dois concretos possam ser classificados como de boa qualidade o CAA-CM apresenta valor de capilaridade superior ao CAA-REF e esta diferença cresce consideravelmente com o aumento da substituição de areia por cavaco metálico.

4.3.7 Ensaio de resistividade elétrica para os corpos de prova em câmara úmida e em ambiente de laboratório (NBR 9204/2012)

Os ensaios de resistividade elétrica foram realizados levando em consideração os percentuais de substituição de resíduos cavacos metálicos e o grau de umidade presente nos poros dos concretos estudados, que variou em função das condições de armazenamento. Para cada traço de concreto, durante a cura, três corpos de prova ficaram armazenados em câmara úmida e outros três ficaram em temperatura ambiente de laboratório até a data dos ensaios (28 dias).

Na Tabela 4.16 são apresentados os valores de resistividade elétrica dos corpos de prova dos concretos CAA-REF e CAA-CM que foram mantidos em câmara úmida e em ambiente de laboratório até a data de ensaio (aos 28 dias).

Tabela 4.16: Valores de resistividade elétrica.

| RESISTIVIDADE ELÉTRICA ($\rho \Omega m$) | | | | |
|--|------------|------|-------------------|------|
| TRAÇO | 28 dias | | | |
| | Câm. Úmida | DP | Ambiente Laborat. | DP |
| CAA-REF | 154,2 | 1,03 | 171,3 | 6,61 |
| CAA-CM 25 | 116,4 | 3,25 | 138,0 | 5,57 |
| CAA-CM 37,5 | 169,1 | 4,41 | 194,7 | 7,43 |
| CAA-CM 50 | 117,2 | 0,76 | 127,5 | 8,48 |
| CAA-CM 75 | - | - | 17,4 | 3,98 |

Fonte: (Próprio autor)

Na Tabela 4.17 são apresentados os valores de resistividade elétrica encontradas e a respectiva classificação de risco de probabilidade de corrosão.

Tabela 4.17: Classificação de risco de probabilidade de corrosão.

| RESISTIVIDADE ELÉTRICA (ρ Ω .m) | | | | |
|--|------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| Ensaio no tempo de 28 dias | | | | |
| TRAÇO | Câm. Úmida | Probabilidade de corrosão | Ambiente Laborat. | Probabilidade de corrosão |
| CAA-REF | 154,2 | Baixa | 171,3 | Baixa |
| CAA-CM 25 | 116,4 | Baixa | 138,0 | Baixa |
| CAA-CM 37,5 | 169,1 | Baixa | 194,7 | Baixa |
| CAA-CM 50 | 117,2 | Baixa | 127,5 | Baixa |
| CAA-CM 75 | - | - | 17,4 | Muito alta |

Fonte: (Próprio autor)

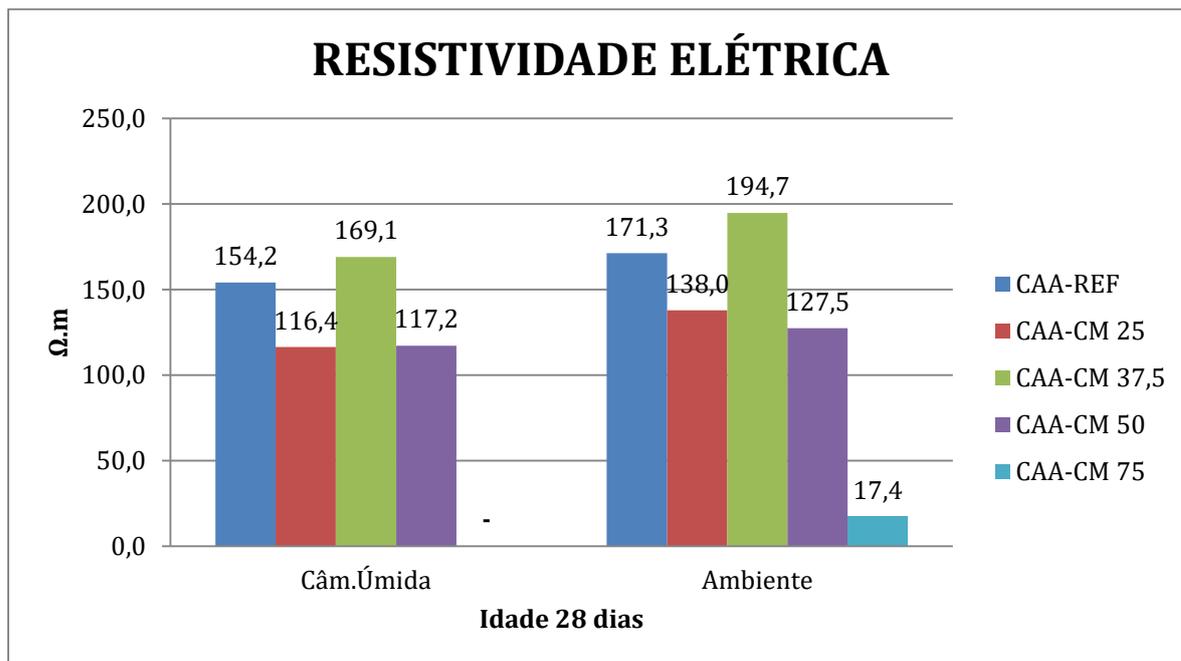
As medições da resistividade elétrica volumétrica que são apresentadas na Tabela 4.16 e na Figura 4.24 apontam que o percentual de substituição de resíduos teve grande influência na resistividade elétrica dos concretos. Os valores de resistividade elétrica se apresentam na faixa entre 100 e 200 Ω m para os concretos CAA-REF e CAA-CM 25, CAA-CM 37,5 e CAA-CM 50 aos 28 dias, tanto em câmara úmida quanto em ambiente de laboratório. Estes valores indicam baixa probabilidade de corrosão para estes concretos. Os valores de resistividade elétrica dos CAA-CM 25 e CAA-CM 50 são aproximadamente 25% menores que a resistividade do CAA-REF. No entanto, o CAA-CM 37,5 apresenta valores próximos de 12,5% maiores que o do CAA-REF. Já o concreto CAA-CM 75, que só teve ensaiado os corpos de prova em ambiente de laboratório, obteve um substancial comprometimento da resistividade elétrica, pois, apresentou valor muito inferior aos outros, alcançando apenas 17,4 Ω .m. Este valor indica que o concreto com substituição de 75% de areia por cavaco metálico apresenta uma alta probabilidade de corrosão.

Sharman e Khan (2018), encontraram valores crescentes de resistividade elétrica até o incremento de 60% de escória de cobre e a mistura de concreto com 20% de substituição apresenta a maior resistência ao movimento dos íons entre todas as misturas. Os autores (op. cit.) observaram ainda que com aumento da idade de cura de 28 para 120, dias a resistividade elétrica de todas as misturas aumentaram e atribuíram isso à maior hidratação das misturas de concreto levando à densificação da microestrutura.

Neste trabalho apenas o CAA-REF teve o ensaio estendido para até 90 dias e o resultado corrobora com os estudos de outros pesquisadores que apontam que a resistividade aumenta com a idade do concreto Sharma e Khan (2018); Sheen et al. (2015); Khodabakhshian et al. (2018). Os valores de resistividade do CAA-REF para 7, 28, 69 e 90 dias foram respectivamente 47,7 Ω .m., 171,3 Ω .m., 476,0 Ω .m. e 622,5 Ω .m. Considerando o significativo incremento de mais de

260% da resistividade elétrica do CAA-REF de 28 para 90 dias e a comprovação de outros pesquisadores de que o crescimento ocorre para todas as misturas com o aumento da idade e tempo de cura é de se esperar que os demais concretos desta pesquisa também alcancem em idades mais avançadas valores superiores a 200 $\Omega.m$, o que representaria baixa probabilidade de corrosão para estes concretos.

Figura 4.24: Valores de resistividade elétrica dos corpos de prova dos concretos CAA-REF e CAA-CM aos 28 dias



Fonte: (Próprio autor)

5. CONCLUSÕES

No presente estudo foi analisada a influência da adição de resíduos metálicos nas propriedades do concreto autoadensável. A inclusão dos resíduos metálicos se deu em substituição em massa de diferentes proporções de areia.

- Foi utilizado o princípio do empacotamento de partículas e otimização da pasta para encontrar um traço eficiente e com baixo fator a/c . Neste caso $a/c = 0,35$.

- As pastas e argamassas de cada um dos traços foram ensaiadas e alcançaram os parâmetros de fluidez e viscosidade indicados pela norma NBR 7682 (ABNT,1983) por Kantro (1980) e Gomes(2008).

- Os ensaios no estado fresco comprovaram a excelência da mistura, pois os concretos, referência e com cavacos metálicos, atenderam a todos os parâmetros e limites determinados na NBR 15823. Apenas o concreto com adição de 75% apresentou segregação e baixa capacidade de passagem por obstáculos

- Todos os concretos alcançaram valores de resistência à compressão acima de 67 MPa aos 28 dias e podem ser classificados como concreto estrutural e concreto de alta resistência segundo a ABNT NBR 8953:2015.

- Os valores da resistência à tração por compressão de todos os concretos se encontram em torno de 10% das suas resistências de compressão.

- O CAA-REF apresentou o maior módulo de elasticidade dinâmico (48,3 GPa) e constatou-se que o valor decresce com o aumento da proporção de resíduos metálicos.

- A dureza superficial dos concretos pelo método do esclerômetro de reflexão apontam que o IEE e a resistência à compressão cresceram com o aumento de até 37,5 % da proporção de resíduos metálicos, após este valor houve queda dos índices.

- A absorção e o índice de vazios crescem com o aumento da substituição de areia por resíduos metálicos. Apenas o CAA-CM 75 apresenta valor de $A > 4,2\%$ e é classificado como concreto normal os demais são classificados concretos duráveis.

- Quanto ao índice de vazios ($I_v\%$) os concretos CAA-REF, CAA-CM 25 e CAA-CM 37,5 podem ser apontados como concretos duráveis, pois seus valores de $I_v\%$ são < 10 . O concreto CAA-CM 50 é classificado como normal, tendo $10\% < I_v\% > 15\%$, e o CAA-CM 75 com $I_v\% > 15\%$ é classificado como deficiente.

- Quanto à absorção por capilaridade todos os concretos são classificados como concretos de boa qualidade, pois têm valores bem abaixo dos 10% recomendados pela norma.

- Todos os concretos apresentaram valores de resistividade elétrica aos 28 dias entre 100 e 200 $\Omega.m$, o que representa baixa probabilidade de corrosão. O concreto CAA-CM 75, apresentou valor de resistividade de apenas 17,41 $\Omega.m$, indicando ter alta probabilidade de corrosão. O CAA-CM 37,5 foi o que apresentou maior valor de resistividade elétrica (194,7 $\Omega.m$).

- O CAA-REF teve seus corpos de prova ensaiados em outras idades de cura, aos 7, 28, 69 e 90 dias com valores de resistividade elétrica crescente, respectivamente de 47,7 $\Omega.m.$, 171,3 $\Omega.m.$, 476,0 $\Omega.m.$ e 622,5 $\Omega.m.$

Portanto pode-se concluir desta pesquisa que:

- O uso de até 50% de resíduo cavaco metálico como agregado reciclado no CAA é viável, podendo com isso, além de viabilizar o reaproveitamento de resíduos reduzindo custo com estocagem, contribuir com a redução da extração de agregados naturais atendendo aos princípios de economia circular.

- Com até 50% de substituição da areia por cavaco metálico, no traço: CAA-CV 50 (1, 0,10, 0,30, 0,35, 0,008, 0,972, 0,972, 1,733) as propriedades no estado fresco, a trabalhabilidade, viscosidade, fluidez, capacidade de passagem e resistência à segregação são preservadas quase inalteradas em relação ao concreto referência.

- Com até 50% de substituição da areia por cavaco metálico as propriedades de resistência, compressão axial, tração por compressão, módulo de elasticidade e dureza de esclerômetro dos concretos estudados sofrem poucas alterações em relação ao concreto referência e apresentam resultados muito satisfatórios.

- Com até 50% de substituição da areia por cavaco metálico, quanto ao quesito durabilidade, os concretos apresentam baixa porosidade, baixo índice de vazios e baixa capilaridade o que dificulta a entrada de qualquer contaminante. Ressalta-se que quanto à migração de íons e a

possibilidade de corrosão os concretos estudados mostraram-se com alta resistividade, implicando em baixa probabilidade de corrosão.

- Apenas o CAA-CM 75 não pode ser considerado um concreto autoadensável por não se enquadrar em todos os parâmetros de classificação de um CAA. No entanto poderia ser considerado seu uso como um concreto de alta resistência, com fator $a/c < 40$ e como o de maior volume de substituição.

- E finalmente, o CAA-CM 37,5 (traço: 1, 0,08, 0,30, 0,35, 0,008, 1,215, 0,729, 1,733) foi o concreto que apresentou melhores resultados geral: se enquadra em todos os parâmetros no estado fresco, apresentou maior resistência à compressão (84,7 MPa aos 28 d), resistência à tração equivalente ao concreto referência, maior dureza superficial, maior resistividade e valores de A%, IV% e C% massa que o classificam como durável.

6. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Diante do discutido nesta pesquisa sugerem-se alguns pontos relevantes para a sua continuidade:

- Fazer estudo do traço que apresentou melhores resultados no estado endurecido, visando à encontrar o menor consumo de cimento com o qual o concreto ainda possa ser considerado de alto desempenho.
- Repetir o traço que apresentou melhores resultados alterando a ordem de mistura dos materiais na betoneira para analisar a influência da sequência nos estado fresco e endurecido do concreto.
- Fazer um estudo para comparação do método de empacotamento teórico usado nesta pesquisa, com a aproximação da curva alvo do EMMA, com o método de misturas sucessivas.
- Observando o grande incremento da resistividade elétrica do CAA-REF, de mais de 260% entre 28 e 90 dias recomenda-se o estudo do traço CAA-CM 37,5 por um tempo de cura de 90 dias ou mais para verificar se o crescimento também ocorre no concreto com resíduos metálicos na mesma proporção.
- Sendo a fluidez e viscosidade os fatores mais importantes do CAA no estado fresco, sugere-se analisar a reologia das pastas comparando suas tensões de escoamento e viscosidade plástica.
- Analisar a influência na zona de transição pasta-agregados e na microestrutura do concreto com a adição de resíduos metálicos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- AARTHI, K.; ARUNACHALAM, K. Durability studies on fibre reinforced self-compacting concrete with sustainable wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 247-255, 2018.
- ABRAHIM, S. N., LAJIS, M. A., ARIFFIN, S. A review on recycling aluminum chips by hot extrusion process. *Procedia CIRP*. v. 26, pp. 761–766. 2015.
- AGRAWAL, G.; KHARE, M. K. Material and Energy Wastes Minimization in a Machining System: A Review. **Journal of Materials and Environmental Science**. v. 4, n. 2, p. 251-256, 2013.
- AITCIN, P.C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. **Cement and concrete composites**, v. 25, n. 4-5, p. 409-420, 2003.
- ALMEIDA, M. A. M. Contribuição ao estudo da durabilidade e do transporte de fluidos em concretos contendo adições minerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás, 176 p, 2016.
- ALSUBARI, B.; SHAFIGH, P.; JUMAAT, M. Z. Utilization of high-volume treated palm oil fuel ash to produce sustainable self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**. V. 137, p. 982–996, 2016.
- ALYAMAC, K. E.; GHAFARI, E.; INCE, R. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. **Journal of Cleaner Production**. V. 144, p. 192–202, 2017.
- ALYAMAÇ, K. E; INCE, R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. **Construction and Building Materials**. V. 23, n. 3, p. 1201-1210, 2009.
- AL-JABRI, K. S., HISADA, M., AL-SAIDY, A. H., AL-ORAIMI, S. K. Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate. **Construction and building materials**, v.23, n. 6, p. 2132-2140.2009.
- AL-JABRI, K. S., HISADA, M., AL-ORAIMI, S. K., AL-SAIDY, A. H. Copper slag as sand replacement for high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.31, n.7, p.483-488. 2009.
- AL-JABRI, K. S., AL-SAIDY, A. H., TAHA, R. Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 933-938. 2011.
- AMBILY, P. S., UMARANI, C., RAVISANKAR, K., PREM, P. R., BHARATKUMAR, B. H., IYER, N. R. Studies on ultra-high performance concrete incorporating copper slag as fine aggregate. **Construction and building materials**, v. 77, p. 233-240. 2015.

ALNUAIMI, A. S. Effects of copper slag as a replacement for fine aggregate on the behavior and ultimate strength of reinforced concrete slender columns. **The Journal of Engineering Research [TJER]**, v. 9, n. 2, p. 90-102. 2012.

American Society for Testing and Materials - ASTM, C. 1621. **Standard test method for passing ability of self-consolidating concrete by J-ring, ASTM.** 2014.

American Society for Testing and Materials- ASTM C 1610/C 1610M, Standard Test Method for Static Segregation of Self- Consolidating Concrete Using Column Technique, Annual Book of ASTM Standards, , Philadelphia, USA, 2010.

American Society for Testing and Materials- ASTM C 1611/C 1611 M-09b. Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. West Conshohocken, PA. 2009.

American Society for Testing and Materials -ASTM E1876: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. 2015.

ANDRADE, J. J. O. Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco. 1997.

ANDREASEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. About the Relationship between Density and Particle Spacing in Products Made of Loose Particles. **Kolloid-Z.**, v. 50, p. 217-18, 1930.

AOKI, C. S. C. Eletrodeposição de NiP e NiP+ partículas por corrente pulsada. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Campinas. 117 p. 2003.

ARORA, A., AGUAYO, M., HANSEN, H., CASTRO, C., FEDERSPIEL, E., MOBASHER, B., NEITHALATH, N. Microstructural packing-and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, v. 103, p. 179-190, 2018.

Ashish D. K. Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. *Journal of Building Engineering*, v. 15, pp. 236–242, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT - NBR 16697 - Cimento Portland Requisito, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT - NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018, 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT - NBR 9204 - Concreto endurecido - Determinação da resistividade elétrica-volumétrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012, 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 12655 - Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT - NBR 9779 - Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção da água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 15823-1 - Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco, Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 15823-2 - Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams, Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 15823-3 - Concreto autoadensável. Parte 3 – Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 15823-4 - Concreto autoadensável. Parte 4 – Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 15823-5 - Concreto autoadensável. Parte 5 – Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 15823-6 - Concreto autoadensável. Parte 6 – Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR NM 30 - Agregado Miúdo - Determinação da Absorção de Água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM46 -Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR NM 53 - Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR. 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto-Procedimento, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 10004 - resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 10005 - procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR - 10006– Solubilização de resíduos, Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 10007 - Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 7682 - Cimento - Calda de cimento para injeção - Determinação do índice de fluidez. Rio de Janeiro:1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 7222 - Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 8953 - Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e Consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 9833 - Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 7584 -Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR NM 248, Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 11768 - Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2019.

ATZENI, C., MASSIDDA, L., SANNA, U. Use of granulated slag from lead and zinc processing in concrete technology. **Cement and concrete research**, v. 26, n. 9, p. 1381-1388. 1996.

BARBOZA, L. S. Produção de concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento e sua influência na aderência aço-concreto. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 263 p. 2018.

BARLUENGA, G.; PUENTES, J.; PALOMAR, I. Early age monitoring of self-compacting concrete with mineral additions. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 66–73, 2015.

BARROS, P. G. S. Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto autoadensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito. Dissertação de mestrado. **Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas**, Maceió, 121 p. 2008.

BELAIDI, A. S. E., AZZOUZ, L., KADRI, E., KENAI, S. Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 251-257, 2012.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 313/2002. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Diário Oficial da União, nº 226, Seção I, p. 85-91. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_2002_313.pdf> Acesso em 09 de novembro de 2018.

CALADO, C.; A., MONTEIRO, E., HELENE, P., & BARKOKÉBAS, B. Indicadores de durabilidade de concreto autoadensável em ambiente quente e agressivo. Comparativo com concreto convencional. In: **BAC2015, IV Congresso Ibero americano sobre Betão Autocompactável**. 2015. p. 309-318.

CAMPOS, R. S. Concreto autoadensável produzido com resíduos de construção e demolição: propriedades mecânicas e reológicas. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas-SP. 209p. 2017.

CANAKCI, A.; VAROL T. A novel method for the production of metal powders without conventional atomization process. **Journal of Cleaner Production**. v. 99, p.312-319, 2015.

CARRO-LÓPEZ, D.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., DE BRITO, J., MARTÍNEZ-ABELLA, F., GONZÁLEZ-TABOADA, I., SILVA, P. Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 491–501, 2015.

CASTRO, A. D; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

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

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos. 334 p.,2007

CAVALCANTE, D. J. H. Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 141 p. 2006.

CHAVAN, R. R., KULKARNI, D. B. Performance of copper slag on strength properties as partial replace of fine aggregate in concrete mix design. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*.//IV/J,p. 95, 98. 2013.

CHEN, Y.Y; TUAN, B. A; HWANG, C.L. Effect of paste amount on the properties of self-consolidating concrete containing fly ash and slag. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 340-346, 2013.

- CHEN, Z.; YANG, M. The Research on Process and Application of Self-Compacting Concrete. *Journal of Engineering Research and Applications*. v. 5, n. 8, pp.12-18. 2015.
- CHITHRA, S., KUMAR, S. S., CHINNARAJU, K. The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 794-804. 2016.
- COLLEPARDI, M. Ordinary and long-term durability of reinforced concrete structures. In: CANMET/ACI/JCI INTERNATIONAL CONFERENCE, 4th. 1998, Tokushima/Japan. Proceedings. Farmington Hills: ACI, 1998. V. 1, p. 87-106.
- LAGE, E. B. D., COSTA, J. M., AZZI, S. S., DE CAMPOS, E. G., DE ARAÚJO, F. M. Análise Patologia através do Ensaio não destrutivo utilizando Resistividade Elétrica Superficial do Concreto. *Construindo*, v. 9, n.3, p. 25-35. 2017.
- DACZKO, J. A. Self- consolidating concrete. Applying what we know. **CRC Press**. London. 1° Ed. 304 p. 2012.
- DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: **IBRACON**, v. 1, p. 345-379, 2005.
- DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G. JOHN, V. M. Influência do empacotamento e dispersão de partículas no consumo de cimento de concretos. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* [online]. 2017, vol.10, n.5, pp.998-1024.
- DANTAS, J. P. R. T. **Enrolamento de anéis de aço: otimização do processo**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra. Coimbra, 92 p. 2015.
- DASH, M. K.; PATRO, S. K.; RATH, A. K. Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete—A review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 5, n. 2, p. 484-516, 2016.
- DEBOUCHA, W., OUDJIT, M. N., BOUZID, A., BELAGRAA, L. Effect of incorporating blast furnace slag and natural pozzolana on compressive strength and capillary water absorption of concrete. **Procedia Engineering**, v.108, p. 254-261. 2015.
- DE CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil-Revisão. **Cerâmica**, v. 57, p. 63-75, 2011.
- DE LARRARD, F. Concrete mixture proportioning: a scientific approach. E & FN Spon, London, v. 440.1999.
- DEHWAH, H. A. F. Corrosion resistance of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 277–282, 2012.
- DEMIREL, B. The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete. **International journal of physical sciences**, v. 5, n. 9, p. 1372-1380, 2010.
- DEVI, V. S.; GNANAVEL, B. K. Properties of concrete manufactured using steel slag. *Procedia Engineering*, v. 97, p. 95-104, 2014.

- DOMONE, P. L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. **Cement and concrete composites**, v. 28, n. 2, p. 197-208, 2006.
- DINAKAR, P.; SETHY, K. P; SAHOO, U. C. Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag. **Materials & Design**, v. 43, p. 161-169, 2013.
- DUGUID, A; RADONJIC, M; SCHERER, G. W. Degradation of cement at the reservoir/cement interface from exposure to carbonated brine. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 5, n. 6, p. 1413-1428, 2011.
- DURGUN, M. Y.; ATAHAN, H. N. Rheological and fresh properties of reduced fine content self-compacting concretes produced with different particle sizes of nano SiO₂. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 431-443, 2017.
- EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete - Specification, Production and Use. The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, p. 63, 2005.
- FELEKOĞLU, B.; TÜRKEL, S.; BARADAN, B. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Building and Environment**, v. 42, n. 4, p. 1795-1802, 2007.
- FERRARA, L; PARK, Yon-Dong; SHAH, S. P. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 6, p. 957-971, 2007.
- FERRARESE, A. Efeito do desgaste do primeiro anel de pistão no seu desempenho de vedação e raspagem, Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 120 pg. 2004.
- FERREIRA, R. M. Avaliação de ensaios de durabilidade do betão. Dissertação de mestrado. Universidade do Minho. Guimarães. 246 p. 2000.
- FLATT, R. J. Towards a prediction of superplasticized concrete rheology. **Materials and structures**, v. 37, n. 5, p. 289-300, 2004.
- FREIRE, K. R. R. Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão de armaduras do concreto. Curitiba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 2005.
- FULLER, W.D.; THOMPSON, S.E. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v.33, p.222, 1907.
- FUNK, E.; DINGER, D.R., Coal grinding and particle size distribution studies for coal-water slurries at high solids content, Empire State Electric Energy Research Corporation, New York. 1980.
- GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 769-781, 2016.
- GETTU, R.; AGULLÓ, L. Estado del arte hormigón autocompactable y su caracterización (parte I). *Cemento Hormigón*.n. 861. p. 50-67.2004.

- GHODDOUSI, P.; SALEHI, A. M. The robustness of self consolidating concrete due to changes in mixing water. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 61, n. 2, p. 216-225, 2017.
- GILL, A S.; SIDDIQUE, R. Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 323-332, 2018.
- GLASSER, F. P.; MARCHAND, J.; SAMSON, E. Durability of concrete—degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 226-246, 2008.
- GOMES, P. C. C. Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 150 p. 2002.
- GOMES, P. C. C.; BARROS, A. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. First ed. São Paulo: Editora PINI LTDA, 2009.
- GRANATA, M. F. Pumice powder as filler of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 581-590, 2015.
- GÜNEYISI, E., GESOĞLU, M., ALGIN, Z., YAZICI, H. Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 622-630, 2016.
- GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M., BOOYA, E., MERMERDAŞ, K. Strength and permeability properties of self-compacting concrete with cold bonded fly ash lightweight aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 17-24, 2015.
- GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; MERMERDAŞ, K. Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin. **Materials and Structures**, v. 41, n. 5, p. 937-949, 2008.
- GUO, H. CAIJUN, S, XUEMAO, G., JIANPING, Z; YAHONG, D.; TUNG-CHAI, L.; HAIBO, Z.; YULI, W. Durability of recycled aggregate concrete—A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 251-259, 2018.
- HABERT, G.; DE LACAILLERIE, JB D.'ESPINOSE; ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. **Journal of cleaner production**, v. 19, n. 11, p. 1229-1238, 2011.
- HADDADOU, N.; CHAID, R.; GHERNOUTI, Y. Experimental study on steel fibre reinforced self-compacting concrete incorporating high volume of marble powder. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 19, n. 1, p. 48-64, 2015.
- HAMA, S. M.; HILAL, N. N. Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 2, p. 299–308, 2017.
- HEBHOU, H.; AOUN, M. BELACHIA, H. HOUARI, E.GHORBEL. Use of waste marble aggregates in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1167–1171, 2011.

- HELENE, P. R. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. São Paulo, 231, 14. 1993.
- HELENE, P. R.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto, Ed. PINI, S. Paulo, SP, 1992.
- HESAMI, S.; HIKOUEI, I. S.; EMADI, S. A. A. Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber. **Journal of cleaner production**, v. 133, p. 228-234, 2016.
- HILAL, A.A.; THOM, N. H.; DAWSON, A. R. On entrained pore size distribution of foamed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 227-233, 2015.
- IBRAHIM, A., MAHMOUD, E., YAMIN, M., PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and building materials**, v. 50, p. 524-529, 2014.
- IQBAL, S.; ALI, A., HOLSCHEMACHER, K., BIER, T. A. Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC). **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 325-333, 2015.
- ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. **Waste management**, v. 28, n. 11, p. 2041-2047, 2008.
- JALAL, M., MANSOURI, E., SHARIFIPOUR, M., POULADKHAN, A. R. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles. **Materials and Design**, v. 34, p. 389-400, 2012.
- JANOTKA, F. PUERTAS, M. PALACIOS, M. KULIFFAYOVA, C. VARGA Metakaolin sand-blended-cement pastes: Rheology, hydration process and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 791-802, 2010.
- JAU, WEN-CHEN; YANG, CHING-TING. Development of a modified concrete rheometer to measure the rheological behavior of conventional and self-consolidating concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 6, p. 450-460, 2010.
- KALPAKJIAN, S; SCHMID, S. Manufacturing Processes.5. ed. 1021 p. **Pearson**, 2008.
- KAMAL, M. M., SAFAN, M. A., ETMAN, Z. A., & KASEM, B. M. Mechanical properties of self-compacted fiber concrete mixes. **HBRC Journal**, v. 10, n. 1, p. 25-34, 2014.
- KANELLOPOULOS, A., PETROU, M. F., IOANNOU, I. "Durability performance of self-compacting concrete." **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 320-325, 2012.
- KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste—a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.
- KAPOOR, K.; SINGH, S. P.; SINGH, B. Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 67-76, 2016.

- KARMEGAM, A; KALIDASS, A D. ULAGANATHAN, D. Utilization of granite sawing waste in self-compacting concrete. *Građevinar*, v. 66, pp. 997-1006, 2014.
- KHAJURIA, C; SIDDIQUE, R. Use of iron slag as partial replacement of sand to concrete. **International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)**, v. 3, n. 6, p. 1877-1880, 2014.
- KHEDER, G. F., AL JADIRI, R. S. New Method for Proportioning Self-Consolidating Concrete Based on Compressive Strength Requirements. **ACI Materials Journal**, v. 107, n. 5, p. 490-497. 2010.
- KHODABAKHSHIAN, A., GHALEHNOVI, M., DE BRITO, J., SHAMSABADI, E. A. Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. **Journal of cleaner production**, v. 170, p. 42-60.2018.
- KOSTRZANOWSKA-SIEDLARZ, A.; GOŁASZEWSKI, J. Rheological properties of High Performance Self-Compacting Concrete: Effects of composition and time. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 705–715, 2016.
- KOTHAI, P. S.; MALATHY, R. Utilization of steel slag in concrete as a partial replacement material for fine aggregates. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 3, n. 4, p. 11585-11592, 2014.
- KOU, SHI-CONG; POON, CHI-SUN; ETXEBERRIA, M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 2, p. 286-291, 2011.
- KOVLER, K.; ROUSSEL, N. Properties of fresh and hardened concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 775–792, 2011.
- KUMAR, S.; KUMAR, A.; KUJUR, J. Influence of nanosilica on mechanical and durability properties of concrete. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings**, p. 1-8, 2018.
- LAGERBLAD, B. CO₂ uptake during the concrete life cycle: Carbon dioxide uptake during concrete life cycle–State of the art, Swedish. **Cement and Concrete Research Institute**, p. 6-44, 2005.
- LAMOGLIA, M. S. Desenvolvimento dos parâmetros do processo de “Recozimento para alívio de tensões” e de “Nitretação Gasosa” na produção de anéis de pistão em Aço AISI 420. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. 138 p. 2017.
- LANGAROUDI, M. A. M.; MOHAMMADI, Y. Effect of nano-clay on workability, mechanical, and durability properties of self-consolidating concrete containing mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 619-634, 2018.
- LEITE, M. B.; MOLIN, D. D. Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D. **Sitientibus, Feira de Santa** v. 26, n. 75, p. 111–130, 2002.

LENZ, L. A. Avaliação da influência do empacotamento do esqueleto granular no módulo de elasticidade de concretos convencionais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 162 p. 2016.

LEVY, S. M.; HELENE, P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. **Cement and concrete research**, v. 34, n. 11, p. 1975-1980, 2004.

LISBÔA, E. M. Obtenção do concreto autoadensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 144 p. 2004.

LIU, Y.; XIE, Y.; LONG, G. Progress of research on self-compacting concrete. **Journal-Chinese Ceramic Society**, v. 35, n. 5, p. 671-678, 2007.

LONDERO, C. Dosagem de concreto ecológico com base em estudo de empacotamento de partículas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 168 p. 2016.

LONDERO, C.; LENZ, L. A.; SANTOS, Í. M. R. 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* [online]. v.63, n.365, 2017.

MACIEL, M. H.; BERNARDO, H. M., SOARES, G. S., DE OLIVEIRA ROMANO, R. C., CINCOTTO, M. A., PILEGGI, R. G. Efeito da variação do consumo de cimento em argamassas de revestimento produzidas com base nos conceitos de mobilidade e empacotamento de partículas. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 245-259.

MADANI, H.; ROSTAMI, J., NOROUZIFAR, M. N., MALEH, H. K., MALEH, H. K. An Investigation on the Effect of Aggregates Packing Density on the Properties of High-Performance Concrete Mixtures. **AUT Journal of Civil Engineering**, v. 1, n. 2, p. 205-214, 2017.

MAHLE. Manual técnico: Curso Mahle Metal Leve Motores De Combustão Interna. 1 ed.: Mahle Aftermarket, 2016. 230 p.

MARCHON, D. KAWASHIMA, S., BESSAIES-BEY, H., MANTELLATO, S. NG, S. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 96-110. 2018.

MARIANO, R. D. Efeito da adição do pó de retífica de compósitos fenólicos nas propriedades de matrizes cimentícias. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. 161 p. 2017.

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

MAZZUCCO, G., POMARO, B., SALOMONI, V. A., MAJORANA, C. E. Numerical modelling of ellipsoidal inclusions. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 317-324, 2018.

MEENAKSHI, S. S., ILANGO VAN, R. Performance of Copper slag and ferrous slag as partial replacement of sand in Concrete. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, v. 1, n. 4, p. 918- 927, 2011

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concrete – Microstructure, Properties And Materials*, (fourth ed., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade da Califórnia em Berkeley, New York) Second ed., IBRACON, Brasil, 2014.

MELO, K. A. Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de fíler calcário. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 183 p. 2005

MERCOSUL NM 78:96 - Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. 1996

MOKHTAR, M. M. ABO-EL-ENEIN, S. A., HASSAAN, M. Y., MORSY, M. S., KHALIL, M. H. Mechanical performance, pore structure and micro-structural characteristics of graphene oxide nano platelets reinforced cement. *Construction and Building Materials*, v. 138, p. 333-339, 2017.

MORRISON, C., HOOPER, R., LARDNER, K. The use of ferro-silicate slag from ISF zinc production as a sand replacement in concrete. *Cement and Concrete research*, v. 33, n.12, p. 2085-2089. 2003.

Neville, A. (1982). *Cements of Different Types. Properties of Concrete*, 63-117.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto-5ª Edição*. Bookman Editor, 912 p, 2015.

NIE, D.; AN, X. Optimization of SCC mix at paste level by using numerical method based on a paste rheological threshold theory. *Construction and Building Materials*, v. 102, p. 428-434, 2016.

NIKBIN, I.M., BEYGI, M.H.A., KAZEMI, M.T., AMIRI, J.V., RAHMANI, E., RABBANIFAR, S., ESLAMI, M., 2014. Effect of coarse aggregate volume on fracture behavior of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 52, p. 137-145, 2014.

OKAMURA H., OZAWA K., *Mix Design for Self-Compacting Concrete*, Concrete Library of Japanese Society of Civil Engineers. n. 25. p. 107-120. 1995.

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

OLLIVIER, J. P.; TORRENTI, J. M.; CARCASSÈS, M. *Physical Properties of concrete and concrete constituents*. 1 ed. ISTE Ltd, and John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 332 p. 2012.

PAN, Z., ZHOU, J., JIANG, X., XU, Y., JIN, R., MA, J., ZHUANG, Y; DIAO, Z., ZHANG, S., SI, Q., CHEN, W. Investigating the effects of steel slag powder on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 200, p. 570-577, 2019.

PANDA, C. R., MISHRA, K. K., PANDA, K. C., NAYAK, B. D., NAYAK, B. B. Environmental and technical assessment of ferrochrome slag as concrete aggregate material. *Construction and Building Materials*, v.49, p. 262-271. 2013.

PAVLÍKOVÁ, M., BRTNÍK, T., KEPPERT, M., CERNY, R, Effect of metakaolin as partial Portland-cement replacement on properties of high performance mortars. **Cement Wapno Beton**, v. 14, n. 76, p. 113-122, 2009.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto autoadensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 283 p, 2010

POLDER, R., ANDRADE, C., ELSENER, B., VENNESLAND, Ø. GULIKERS, J., WEIDERT, R., RAUPACH, M. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. **Materials and Structures**, v. 33, n.10, p. 603-611.2000.

POOVIZHI, T., KATHIRVEL, P. Behaviour of concrete with partial replacement of copper slag as cement and fine aggregate. **Transactions on Engineering and Sciences**, v.3, n.2, p. 30-35. 2015.

POPOVICS, J. S. **A Study of Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete**. University of Illinois, Urbana, IL. ACI-CRC Final Report. 2008.

POSSAN, E; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Revista técnico-científica**, v. 1, n. 1, 2013.

QASRAWI, H.; SHALABI, F.; ASI, I. Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1118-1125, 2009.

RATH, S., PUTHIPAD, N., ATTACHAIYAWUTH, A., Ouchi, M. Critical size of entrained air to stability of air volume in mortar of self-compacting concrete at fresh stage. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 15, n. 1, p. 29-37, 2017.

RECENA, F. A. P. Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante. Tese de doutorado. 263 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

REHMAN, S.; IQBAL, S.; ALI, A. Combined influence of glass powder and granular steel slag on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 153-160, 2018.

ROMANO, R. C. O.; TORRES, D. R.; PILEGGI, R. G. Impact of Aggregate Grading and Air-Entrainment on the Properties of Fresh and Hardened Mortars. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 219-226, 2015.

RODRIGUES, M. A., FILHO, J. D. A. M. FABRICAÇÃO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MARMORARIAS COMO ADIÇÃO MINERAL. REEC- **Revista Eletrônica de Engenharia civil**, v.14, n.1, p.50-71. 2017.

ROSE, A. L., SUGANYA, P. Performance of copper slag on strength and durability properties as partial replacement of fine aggregate in concrete. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v.5, n.1, p. 434-437.2015.

SAAK, A.W.; JENNINGS, H.M.; SHAH, S.P., New methodology for designing self-compacting concrete. **ACI Materials Journal**, v. 98, n.6, p. 429-439.2001.

- SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, v. 23, n. 6, p. 441–454, 2001.
- SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 19-32, 2016.
- SAFIUDDIN, M.; WEST, J. S.; SOUDKI, K. A. Durability performance of self-consolidating concrete. **Journal of Applied Sciences Research**. v. 4, n. 12, p. 1834-1840, 2008.
- SBIA, L. A., PEYVANDI, A., SOROUSHIAN, P., BALACHANDRA, A. M., SOBOLEV, K. Evaluation of modified-graphite nanomaterials in concrete nanocomposite based on packing density principles. **Construction and building materials**, v. 76, p. 413-422, 2015.
- SHAHIDAN, S.; ISHAM, I.; JAMALUDDIN, N. A review on waste minimization by adopting in self-compacting concrete. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, v. 47. 2016.
- SHAIBANI, M. E.; GHAMBARI, M. Characterization and comparison of gray cast iron powder produced by target jet milling and high energy ball milling of machining scraps. **Powder Technology**, v. 212, n. 1, p. 278-283, 2011.
- SHARMA, R., KHAN, R. A. Influence of copper slag and metakaolin on the durability of self-compacting concrete. *Journal of cleaner production*, v.171, p.1171-1186. 2018.
- SHEEN, Y.N; LE, D.H; SUN, T. H. Innovative usages of stainless steel slags in developing self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 268-276, 2015.
- SHEHATA, L.D. Deformações instantâneas de concreto. In: ISAIA, G.C (Ed.) *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 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.
- SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Effect of iron slag as partial replacement of fine aggregates on the durability characteristics of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 88-95, 2016.
- SINGH, M; SIDDIQUE, R. Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 91, p. 269-278, 2015.
- SOUNTHARARAJAN, V. M.; SIVAKUMAR, A. Effect of the lime content in marble powder for producing high strength concrete. **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 8, n. 4, p. 260-264, 2013.
- TANG, S. W., YAO, Y., ANDRADE, C., LI, Z. J. Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research*, v. 78, p. 143-154, 2015.
- TEIXEIRA, A. Caracterização e aproveitamento de cavacos dos processos de retificação de anéis de pistão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. 117 p. 2007.
- TENNICH, M.; OUEZDOU, M. B.; KALLEL, A. Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 335-342, 2017.

- TOPCU, I. B.; BILIR, T.; UYGUNOĞLU, T. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1947-1953, 2009.
- TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos autoadensáveis**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 149 p. 2004.
- TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. Dal. Concreto autoadensável. 1º Ed. Editora Pini; São Paulo, 240 p. 2008.
- UYSAL, M. Self-compacting concrete incorporating filler additives: Performance at high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 701–706, 2012.
- UYSAL, M.; SUMER, M. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 11, p. 4112–4120, 2011.
- Valcuende, M., Benito, F., Parra, C., Miñano, I. Shrinkage of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 1-9.2015.
- VARDHAN, K., GOYAL, S., SIDDIQUE, R., & Singh, M. Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 615-621, 2015.
- VARSHNEY, A. GOHIL, S., CHALKE, B. A., BAPAT, R. D., MAZUMDER, S., BHATTACHARYA, S., GHOSH, S. Rheology of hydrating cement paste: Crossover between two aging processes. **Cement and Concrete Research**, v. 95, p. 226-231, 2017.
- VALCUENDE, M., BENITO, F., PARRA, C., & MIÑANO, I. Shrinkage of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 1-9. 2015.
- VELUMANI, M., NIRMALKUMAR, K. Durability and characteristics of copper slag as fine aggregate and fly ash as cement in concrete. In Second International Conference on Current Trends In Engineering and Technology-ICCTET .IEEE. p. 222-227. 2014.
- VISHWAKARMA, V.; RAMACHANDRAN, D. Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives – A review. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 96–103. 2018.
- VUPPUTURI, S. FATHEPURE, B. Z., WILBER, G. G., SUDOJ, E., NASRAZADANI, S., LEY, M. T., RAMSEY, J. D. Isolation of a sulfur-oxidizing *Streptomyces* sp. from deteriorating bridge structures and its role in concrete deterioration. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 97, p. 128-134, 2015.
- WALLEVIK, O. H.; WALLEVIK, J. E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1279-1288, 2011.
- WEEKS, C., HAND, R. J., SHARP, J. H. Retardation of cement hydration caused by heavy metals present in ISF slag used as aggregate. **Cement and concrete composites**, v. 30 n. 10, p. 970-978. 2008.

- WU, W., ZHANG, W., MA, G. Mechanical properties of copper slag reinforced concrete under dynamic compression. *Construction and Building Materials*, v.24, n.6, p. 910-917.2010.
- WU, W., ZHANG, W., MA, G. Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete. *Materials & Design*, v.31, n.6, p. 2878-2883.2010.
- XIAO, J., LI, L., SHEN, L., POON, C. S. Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading. *Cement and Concrete Research*, v. 71, p. 46-55, 2015.
- YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. **Cement and concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 532-539, 2005.
- YUKSEL, I., OZKAN, O., BILIR, T. Use of granulated blast-furnace slag in concrete as fine aggregate. **Materials Journal**, v.103, n. 3, p. 203-208. 2006.
- YÜKSEL, İ., SIDDIQUE, R., ÖZKAN, Ö. Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. **Construction and building materials**, v. 25, n. 2, p. 967-972.2011.
- YÜKSEL, İ., BILIR, T., ÖZKAN, Ö. Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate. **Building and Environment**, v. 42, n.7, p.2651-2659.2007.
- ZHAO, H.; SUN, W., WU, X., GAO, B. The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p. 66-74, 2015.