



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA
DOUTORADO

MARIA AUXILIADORA DE BARROS MARTINS

**Propriedades reológicas e durabilidade do concreto autoadensável de alta
resistência com resíduo de corte mármore e granito e areia de exaustão de
fundição**

Itajubá, 2021

MARIA AUXILIADORA DE BARROS MARTINS

Propriedades reológicas e durabilidade do concreto autoadensável de alta resistência com resíduo de corte mármore e granito e areia de exaustão de fundição

Tese submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação de doutorado em Materiais para Engenharia da Universidade Federal de Itajubá, sob orientação da Prof^a. Dr^a. Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo e co-orientação da Prof^a. Dr^a. Regina Mambeli Barros, como parte dos requisitos para título de doutorado em Materiais para Engenharia.

Área de Concentração: Não metais

Itajubá, 2021

EPÍGRAFE

“Todo o bem consiste em amar a Deus. E amar a Deus consiste em fazer a sua vontade”

Santo Afonso Maria Ligório

AGRADECIMENTOS

“Somos gratos, mas primeiro com Deus, por isso decidamos não negar nada a Deus, escolhendo sempre as coisas de seu maior gosto.” (Santo Afonso de Ligório)

À Prof^a. Dr^a. Mirian de Lourdes Mota Melo Noronha e Prof^a. Dr^a. Regina Mambeli Barros, pela amizade, confiança, incentivo, dedicação e valiosa orientação e co-orientação que foram fundamentais para realização desta pesquisa.

À Prof^a. Dr^a Rosa Cristina Cecche Lintz, à Prof^a. Dr^a Luísa Andréia Gachet, à Prof^a Dr^a. Valquíria Claret dos Santos, ao Prof. Dr. Carlos Martinez e Prof. Dr. Paulo Cesar Gonçalves, que fizeram parte da banca de qualificação e defesa e muito contribuíram com seus conhecimentos e sugestões.

À Universidade Federal de Itajubá, pela oportunidade de realização do curso de doutorado e suporte técnico.

Aos professores do curso de doutorado que contribuíram para meu crescimento científico e intelectual juntamente aos meus colegas que me acolheram.

Aos meus filhos, Isabella, Rafael e Renata, por estarem sempre ao meu lado, pelo incentivo, apoio e compreensão nas horas da minha ausência.

Aos amigos e colegas de profissão e do curso de doutorado, Fernando Batista Pinto e Demarcus Werdini, pelo trabalho em equipe, pelos cafés, pela troca de conhecimentos e habilidades, pelo incentivo e apoio para enfrentar este desafio.

Ao técnico do laboratório de Materiais de Construção Civil da UNIFEI, Fabiano Nazário, que muito me ajudou nos experimentos com toda paciência e dedicação.

Aos técnicos Claudemiro, João Vitor e Jonas que colaboraram nos experimentos laboratoriais.

À FEPI pela disponibilização do uso do laboratório de construção civil;

Aos meus familiares, meus irmãos e amigos, os quais sempre posso contar, por estarem comigo nos momentos difíceis e nas vitórias, sempre demonstrando confiança e carinho.

À Empresa de Fundação que cedeu o resíduo para a pesquisa.

À ADITIBRÁS pelo fornecimento do aditivo superplastificante;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro (cód. 001) como bolsa auxílio para pesquisa de doutorado.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O concreto autoadensável, CAA, é um concreto que tem características peculiares de fluidez e viscosidade. Para adquirir tais propriedades, utiliza, em sua composição, adições minerais, materiais finos, que, em grande parte, podem ser resíduos industriais e, por isso, um material sustentável. Embora já esteja bastante difundido o uso de areia descartada de fundição (ADF) na produção do concreto, observa-se uma lacuna quanto à areia de exaustão de fundição (AEF) e a sua influência na armadura e, dessa forma, produzir um concreto que atenda às prerrogativas de resistência, durabilidade, maior tempo de vida útil e sustentabilidade. Nesta pesquisa, foi utilizado um valor fixo em todos os traços de resíduo de corte de mármore e granito, RCMG, como adição mineral para melhorar a viscosidade da mistura, e areia de exaustão de fundição (AEF) como substituto parcial (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) da areia natural. A AEF compõe as ADFs, que correspondem, em média, a 80% dos resíduos gerados na indústria de fundição. Foi avaliada a influência dos materiais na reologia do concreto, na resistência mecânica e na durabilidade. Os parâmetros reológicos foram testados pelos métodos empíricos. As propriedades mecânicas foram avaliadas pela resistência à compressão e resistência à tração por compressão e, como indicadores de durabilidade, foram utilizados os testes de absorção de água por imersão e por capilaridade, a resistividade elétrica volumétrica, a resistência ao ataque aos sulfatos e aos ácidos, a permeabilidade ao cloreto e o potencial de corrosão. No estado fresco, todas as misturas apresentaram características de fluidez e viscosidade requeridas pela ABNT para o CAA. Quanto a compressão todas as misturas foram classificadas de alta resistência. As misturas apresentaram boa resistência ao ataque ácido e ao sulfato, baixa absorção por imersão em água e por capilaridade. Devido a muito baixa permeabilidade aos íons de cloreto e pela alta resistividade elétrica, as misturas se mostraram com probabilidade de corrosão desprezível e no teste de potencial de corrosão a probabilidade variou entre incerta e baixa. Estes resultados indicaram que o CAA com RCMG e AEF apresenta menor permeabilidade aos agentes deletérios e, conseqüentemente, maior durabilidade quando comparado ao concreto referência. Todas as propriedades foram melhoradas com 30% do resíduo AEF embora tenham sido obtidos bons resultados com até 40%. Neste sentido a utilização dos resíduos traz benefícios ambientais que se traduzem tanto na redução de resíduos depositados em aterros quanto na redução de extração da areia natural.

Palavras-chave: Concreto autoadensável; resíduos industriais, areia de exaustão de fundição; areia descartada de Fundição; durabilidade; corrosão.

ABSTRACT

Self-compacting concrete, SCC, is practically a new concrete that has peculiar characteristics of fluidity and viscosity. To acquire such properties, it uses in its composition, mineral additions, fine materials, which, in large part, are industrial waste and, therefore, a sustainable material. Although the use of waste foundry sand (WFS) in concrete is already widespread, there is a gap regarding the waste foundry exhaust sand (WFES) and its influence on the reinforcement and, thus, producing a concrete that meets the prerogatives of compressive strength, durability, longer useful life and sustainability. In this research, the marble and granite processing waste residue, MGPW, was used as a mineral addition to improve the mixture viscosity, and waste foundry exhaust sand (WFES) as a partial substitute (10%, 20%, 30%, 40% and 50%) of natural sand. Foundry Exhaust Sand makes up the WFSs, which correspond, on average, to 80% of the waste generated in the foundry industry. The influence of materials on concrete rheology, strength and durability was evaluated. Rheological parameters were tested by empirical methods. Mechanical properties were evaluated by compressive strength and splitting tensile strength. As indicators of durability, the tests of water absorption by immersion and capillarity, resistance to sulfates and acids attacks, bulk electrical resistivity, chloride permeability and corrosion potential were used. In fresh state, all mixtures presented fluidity and viscosity characteristics required by brazilian standard for SCC. As for compressive strength, all mixtures were classified as high strength. Mixtures showed good resistance to acid and sulphate attacks, low absorption by immersion in water and by capillarity. Very low permeability to chloride ions and high electrical resistivity, indicates the mixtures showed a negligible probability of corrosion and in the corrosion potential test the probability varied between uncertain and low. These results indicated that SCC with MGPW and FES has lower permeability to harmful agents and, consequently, greater durability when compared to reference concrete. All properties were improved with 30% of FES waste, although good results were obtained with up to 40%. In this sense, the use of these waste brings environmental benefits that translate into both the reduction of waste deposited in landfills and the reduction in the extraction of natural sand. the results show that the wastes, WFES and MGPW, can be used without affecting the concrete durability.

Keywords: Self-compacting concrete; waste foundry exhaust sand; Waste foundry sand; durability; corrosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática da evolução dos conceitos relativos à estrutura.....	16
Figura 2: Comparação das proporções da mistura do CCV e CAA	19
Figura 3: Representação dos compostos do cimento hidratado	21
Figura 4: Adições minerais reativas e inertes	22
Figura 5: Variações dos parâmetros reológicos em função dos diferentes componentes do CAA.....	26
Figura 6: Cone de Marsh e Kantro, equipamentos utilizados para ensaio da pasta	27
Figura 7: Curvas de empacotamento entre misturas (a) curva $q=0,23$ e (b) curva $q=0,37$	30
Figura 8: Curva de saturação do superplastificante	31
Figura 9: Equipamento para o teste do mini-slump.....	31
Figura 10: Desenho esquemático para teste espalhamento e T_{500}	33
Figura 11: Desenho esquemático do Funil V	34
Figura 12: Desenho esquemático da Caixa L	35
Figura 13: Sequência do processo de fundição em caixa de areia	40
Figura 14: Qualidade do concreto: durabilidade, mecanismos de deterioração e transporte	46
Figura 15: Representação esquemática do modelo de Tuutti para vida útil de estruturas de concreto armado.	48
Figura 16: Distribuição do tamanho de poros da pasta de cimento	49
Figura 17: Representação esquemática dos poros a) Poros capilares interconectados por grandes aberturas b) poros segmentados e parcialmente conectados	50
Figura 18: Destaque da Zona de transição entre argamassa e agregado graúdo	50
Figura 19: Representação esquemática da evolução da deterioração da estrutura de concreto	53
Figura 20: Esquema da ação do ácido no concreto.....	55
Figura 21: (a) Esquema do equipamento pra ensaio de passagem de íons de cloreto e (b) esquema elétrico.	61
Figura 22: Desenho ilustrativo do sistema de eletrodos e esquema elétrico para avaliar a resistividade elétrica volumétrica do concreto	65
Figura 23: Esquema do ensaio de Potencial de Corrosão.....	67
Figura 24: Sequência dos ensaios dos experimentos	69
Figura 25: a) Máquina de corte de mármore e granito; b) RCMG em forma de lama, seco em estufa e peneirado	72
Figura 26: Amostra do resíduo AEF.....	73
Figura 27: Micrografia MEV BSD das partículas da AEF aumento de 100x.....	73
Figura 28: Curvas da Distribuição Granulométrica dos materiais finos	74
Figura 29: Difratoograma da AEF.....	75
Figura 30: Sequência para definição do traço do CAA	81
Figura 31: Realização do ensaio de espalhamento da pasta	83
Figura 32: a) Ensaio do mini Funil V e b) mini tronco de cone para espalhamento da argamassa	84
Figura 33: Ensaio no estado fresco: a) Espalhamento, b) Funil V, c) Caixa L	87
Figura 34: a) Corpos de prova nos moldes cilíndricos por 24 h. b) Câmara úmida e Tanque de cura em água	88
Figura 35: Ensaio de resistência à compressão axial.....	89
Figura 36: a) Amostras na estufa a 105°C; b) amostras totalmente imersas em água	90

Figura 37: Ensaio de absorção por capilaridade a) Dessecador b) Execução de ensaio	91
Figura 38: Ensaio de tração por compressão diametral	92
Figura 39: a) Sulfato de Magnésio b) Amostras imersas na solução de sulfato de magnésio	92
Figura 40: Amostras submetidas ao ataque ácido.....	93
Figura 41: Ensaio da resistividade elétrica volumétrica	94
Figura 42: Ensaio da permeabilidade aos íons de cloreto.....	95
Figura 43: Ensaio do Potencial de Corrosão.....	96
Figura 44: Imagens MEV SE da areia natural e areia de exaustão de fundição aumento de 250x	97
Figura 45: Espalhamento de cada mistura: AEF 0, AEF 10, AEF 20, AEF 30, AEF 40 e AEF 50.	100
Figura 46: Gráfico da resistência à compressão das misturas aos 7, 28 e 90 dias	102
Figura 47: Análise de variância para resistência à compressão axial aos 28 dias de cura	103
Figura 48: Absorção por imersão e índice de vazios das misturas	104
Figura 49: Análise de variância a) Absorção por imersão b) Índice de vazios.....	105
Figura 50: Massa específica das misturas.....	106
Figura 51: Absorção por capilaridade das misturas.....	107
Figura 52: Análise de variância da absorção por capilaridade	107
Figura 53: Tração por compressão diametral	108
Figura 54: Análise de variância da Tração por compressão diametral	109
Figura 55: Amostras de cada mistura imersas no sulfato	110
Figura 56: Análise visual dos corpos de prova a) AEF 0 b) AEF 10 c) AEF 20 d) AEF 30 e) AEF40	110
Figura 57: Análise de variância da variação de massa das misturas imersas a) solução de sulfato e b) na água.	112
Figura 58: Resistência ao ataque por sulfato - variação da resistência à compressão	113
Figura 59: Análise de variância da resistência a compressão das misturas mantidas: a) sulfato e b) água	115
Figura 60: Resistência ao ataque ácido das misturas - variação da resistência à compressão	116
Figura 61: Análise de variância da resistência a compressão das misturas mantidas a) ácido; b) câmara úmida	116
Figura 62: Resistência ao ataque ácido das misturas - variação de massa.....	117
Figura 63: Análise de variância da variação de massas das amostras mantidas a) ácido e b) câmara úmida	118
Figura 64: Difração de raios X das misturas mantidas em câmara úmida.	119
Figura 65: Difração de raios X das misturas mantidas em ácido.....	120
Figura 66: Ensaio da Resistividade Elétrica Volumétrica	121
Figura 67: Resistividade Elétrica Volumétrica das misturas	121
Figura 68: Análise de variância da Resistividade Elétrica Volumétrica a) câmara úmida b) laboratório.....	122
Figura 69: Comparação da permeabilidade aos íons de Cloreto das misturas	122
Figura 70: Análise de variância da permeabilidade aos íons de cloreto	124
Figura 71: Relação entre a Resistividade Elétrica e penetração de ions de Cloreto	124
Figura 72: Processo de aceleração de corrosão das amostras imersas em cloreto de sódio.....	125
Figura 73: Evolução do potencial de Corrosão das barras de cada mistura.....	125
Figura 74: Barras de aço para analise em microscópio óptico.....	126
Figura 75: Análise microscópica das barras de aço com aumento de 6,7x e 10x respectivamente	127

LISTA de TABELAS

Tabela 1: Principais componentes do cimento	20
Tabela 2: Classificação dos tipos de adição mineral	22
Tabela 3: Métodos de ensaio do CAA no estado fresco de acordo com propriedades avaliadas	35
Tabela 4: Classificação do CAA de acordo com suas características no estado fresco	36
Tabela 5: Pesquisas com uso de areia descartada de fundição em concreto convencional.....	42
Tabela 6: Classe de agressividade e correspondência com qualidade do concreto e cobrimento	47
Tabela 7: Relação entre o pH e o grau de ataque ao concreto	56
Tabela 8: Penetrabilidade de íons de Cloreto baseado na Carga passante	62
Tabela 9: Relação entre resistividade elétrica e probabilidade de corrosão.....	64
Tabela 10: Relação entre Potencial de Corrosão e probabilidade de corrosão	67
Tabela 11: Ensaio aplicados componentes do concreto conforme as normas ABNT	70
Tabela 12: Características físicas e químicas do CP V ARI.....	71
Tabela 13: Propriedades da sílica ativa	71
Tabela 14: Distribuição granulométrica em μm dos materiais finos	74
Tabela 15: Fluorescência de raios X da AEF	75
Tabela 16: Concentração – Limite máximo no extrato lixiviado do Resíduo.....	76
Tabela 17: Concentração – Limite máximo no extrato solubilizado do Resíduo Concentração – Limite máximo no extrato lixiviado do Resíduo.....	77
Tabela 18: Distribuição granulométrica dos agregados.....	78
Tabela 19: Informações do aditivo superplastificante	79
Tabela 20: Faixa típica dos componentes do CAA em massa (kg/m^3).....	80
Tabela 21: Faixa típica dos componentes do CAA em % volume.....	80
Tabela 22: Variação da dosagem do superplastificante para definir a composição da pasta	82
Tabela 23: Composição da pasta para o volume de 1,4 l.....	83
Tabela 24: Traço para composição da argamassa.....	84
Tabela 25: Parte da planilha na qual foram inseridos os dados do EMMA para dosagem do CAA.....	85
Tabela 26: Traços para composição do CAA	86
Tabela 27: Ensaio do CAA no estado fresco	87
Tabela 28: Ensaio aplicados ao CAA no estado endurecido, conforme as normas brasileiras e americanas, para resistência mecânica e durabilidade.	88
Tabela 29: Características físicas da AEF e areia natural.....	97
Tabela 30: Massa específica e índice de ar de cada mistura de CAA.....	99
Tabela 31: Propriedades reológicas de cada mistura do CAA.....	99
Tabela 32: Variação de massa das amostras mantidas em Sulfato e água (%)	112

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Principais mecanismos de deterioração do concreto	49
--	----

SIGLAS e ABREVIACÕES

A	Área da seção
ABCP	Associação Brasileira e Cimento Portland
ABIFA	Associação Brasileira da Indústria de Fundição
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADF	Areia Descartada de Fundição
AEF	Areia de Exaustão de Fundição
ANEPAC	Associação Brasileira de Entidades de Produtores de Agregados para a Construção civil
ASTM	American Society for Testing and Materials
AUF	Areia Usada de Fundição
CAA	Concreto Autoadensável – ABNT NBR 15823-1
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CC	Construção Civil
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CCV	Concreto Convencional Vibrado
CP	Cimento Portland
CPV ARI	Cimento Portland de Alta Resistencia Inicial
CV	Cinzas Volantes
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
DRX	Difração de Raios X
EFNARC	European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
EMMA	Elkem Materiais Mixture Analyzer
EPD	Environmental of Product Declaration
F	Força
FRX	Fluorescência de Raios X
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
MEC	Método do Empacotamento Compressível
MF	Modulo de Finura
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MPa	MegaPascal
MK	Metacaulim
NBR	Norma Brasileira Registrada
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PET	Polietileno tereftalato
RAA	Reação Álcali Agregado
RCC	Resíduo de Construção Civil
RCMG	Resíduo Corte de Mármore e Granito
SA	Sílica ativa
SP	Aditivo Superplastificante
a/c	Relação água e cimento
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Aluminato ferroso tetracálcico
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
CO _{2eq}	Gás Carbônico equivalente
ddp	Diferença de potencial
F _{cj}	Resistência característica à compressão do concreto aos <i>j</i> dias
F _{ck}	Resistencia característica à compressão do concreto
τ	Tensão de cisalhamento
λ	Taxa de cisalhamento
η	Viscosidade aparente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	15
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	17
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 O CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	18
2.1.3 PROPRIEDADES RELEVANTES DOS COMPONENTES PARA CAA	18
2.1.3.1 Cimento Portland	19
2.1.3.2 Adições minerais	21
2.1.3.3 Agregados.....	23
2.1.3.5 Aditivos.....	24
2.1.3.6 Água	24
2.1.4 <i>Reologia do Concreto</i>	25
2.1.4.1 Parâmetros reológicos.....	25
2.1.4.3 Reologia da pasta	27
2.1.5 <i>Métodos de dosagem para CAA</i>	28
2.1.5.1 Método do empacotamento dos agregados	28
2.1.6 <i>Métodos de ensaio no estado fresco</i>	32
2.1.6.1 Espalhamento, <i>Slump Flow</i> , e T_{500}	33
2.1.6.2 Funil V.....	33
2.1.6.3 Caixa L	34
2.2 RESÍDUOS UTILIZADOS PARA COMPOSIÇÃO DO CAA	36
2.2.1 <i>Resíduo de corte de mármore e granito (RCMG)</i>	37
2.2.2 <i>Areia de exaustão de Fundição</i>	39
2.2.2.1 A indústria de fundição no Brasil.....	39
2.2.2.2 Areia Descartada de Fundição (ADF)	40
2.2.2.3 Areia do Sistema de Exaustão da Fundição (AEF).....	44
2.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CONCRETO	45
2.3.1 <i>Durabilidade e vida útil do concreto</i>	47
2.3.2 <i>Mecanismos de Transporte dos agentes deletérios</i>	48
2.3.2.1 Absorção.....	51
2.3.2.2 Difusão iônica	51
2.3.2.3 Permeabilidade	52
2.3.2.4 Migração	52
2.3.3 <i>Principais meios de deterioração do concreto</i>	52
2.3.3.1 Ação dos íons de cloreto	54
2.3.3.2 Ataque ácido	55

2.3.3.3 Ataque por sulfatos	56
2.4 CORROSÃO DAS ARMADURAS	58
2.4.1 Proteção química e física	59
2.4.2 Fatores que influenciam na corrosão das armaduras.....	59
2.4.3 Técnicas de análise do concreto e monitoramento quanto à possibilidade de corrosão	60
2.4.3.1 Difusão de íons de cloreto	61
2.4.3.2 Resistividade Elétrica.....	63
2.4.3.3 Potencial do eletrodo ou de corrosão	66
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
3.1 MATERIAIS	70
3.1.1 Cimento	70
3.1.2 Sílica ativa (SA).....	71
3.1.3 Resíduo de Corte de mármore e granito (RCMG).....	71
3.1.4 Areia de exaustão de Fundição (AEF).....	72
3.1.5 Agregados naturais.....	78
3.1.6 Aditivo superplastificante	79
3.1.7 Água.....	79
3.2 METODOLOGIA	80
3.2.1 Obtenção do traço do CAA.....	80
3.2.1.1 Composição da pasta	82
3.2.1.2 Composição da argamassa	83
3.2.1.3 Composição do CAA	85
3.2.2 Concreto fresco	86
3.2.3 Concreto endurecido	87
3.2.3.1 Resistência à compressão.....	89
3.2.3.2 Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica	89
3.2.3.3 Absorção por capilaridade.....	90
3.2.3.4 Resistência à tração por compressão diametral.....	91
3.2.3.5 Resistência ao ataque aos sulfatos	92
3.2.3.6 Resistência ao ataque ácido	92
3.2.3.7 Resistividade Elétrica Volumétrica (REV).....	93
3.2.3.8 Permeabilidade rápida aos íons de cloreto	94
3.2.3.9 Potencial de corrosão	95
3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	96
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DAS AREIAS	97
4.2 COMPOSIÇÃO DO CAA	98
4.2.1 Propriedades do CAA no estado fresco	98

4.2.2 <i>Propriedades do CAA no estado endurecido</i>	101
4.2.2.1 Resistência à compressão.....	101
4.2.2.2 Absorção por imersão em água.....	104
4.2.2.3 Absorção por capilaridade.....	106
4.2.2.4 Resistência à tração por compressão diametral.....	108
4.2.2.5 Resistência aos sulfatos.....	109
4.2.2.6 Resistência ao ataque ácido	115
4.2.2.7 Resistividade elétrica volumétrica.....	120
4.2.2.8 Permeabilidade rápida de íons de cloreto.....	122
4.2.2.9 Relação entre a resistividade elétrica e difusão de íons de cloreto	124
4.2.2.10 Potencial de Corrosão	125
CONCLUSÃO	131
REFERÊNCIAS	133

1 INTRODUÇÃO

Os materiais cimentícios estão entre os mais importantes materiais da indústria da construção civil, sendo que o concreto é o material construtivo mais utilizado no mundo depois da água (BHARDWAJ; KUMAR, 2017). Superando o aço e a madeira, o concreto possui duas características básicas para ser considerado um bom material: resistência e durabilidade. Além das vantagens de ser moldado em diversas formas e com rapidez, é considerado pela Declaração Ambiental do Produto, *Environmental of Product Declaration* (EPD) como o melhor, mais durável e sustentável material estrutural. Entretanto, a durabilidade depende do projeto, da fabricação, da ação do tempo e do meio ambiente, sendo que o maior problema causado é a corrosão das armaduras (SOARES; VASCONCELOS; NASCIMENTO, 2015). Apesar de as razões para a predominância do uso do concreto serem diversas, o maciço ciclo de produção e consumo de concreto têm impactos ambientais significativos (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O concreto consome muitos recursos naturais, como areia e brita, que compõem cerca de 80% da mistura. Consta, no relatório da Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC), que, em 2019, a produção de agregados no Brasil foi de 514 milhões de toneladas (ANEPAC, 2020).

O concreto autoadensável (CAA) foi desenvolvido no Japão em 1988, devido à necessidade de produzir concretos mais duráveis, com características únicas de fluir, preencher as formas e compactar sob seu próprio peso, mantendo a homogeneidade da mistura (OKAMURA; OUCHI, 2003). Esse produto relativamente novo trouxe vantagens para a construção civil, como: a economia de energia com a redução da mão de obra e da necessidade de vibração, menor tempo de execução e ambiente de trabalho mais saudável em consequência da diminuição de ruídos, melhor acabamento e maior durabilidade (GOMES; BARROS, 2009, EFNARC, 2005), além do benefício adicional de menor custo de moldagem (CHEN, YANG, 2015).

O CAA utiliza grande quantidade de finos em sua composição para alcançar suas propriedades no estado fresco. Nesse caso, há necessidade da diminuição da quantidade do agregado graúdo para obter a viscosidade necessária. A adição de finos minerais proporciona o alcance das propriedades de autoadensabilidade, além de reduzir a permeabilidade do concreto e, conseqüentemente, aumentar a durabilidade e a resistência mecânica. O tamanho reduzido das partículas preenche os espaços vazios e diminui o tamanho dos poros, formando uma estrutura mais densa (DAL MOLIN, 2005). Conforme Mehta e Monteiro (2014), muitas adições

minerais são resíduos industriais gerados em grande quantidade que, ao serem descartados em aterros, são considerados um problema ambiental.

Devido ao aumento da demanda por projetos de construção que, conseqüentemente, aumentarão a quantidade de matéria-prima utilizada, a incorporação de subprodutos na indústria de concreto tornou-se uma prática comum nas últimas décadas. Vários tipos de resíduos podem ser recuperados e reutilizados em materiais cimentícios (VISHWAKARMA; RAMACHANDRAN, 2018).

Neste contexto, a areia de fundição, composta por areia de sílica de boa qualidade, argila, carvão e água, é utilizada como material de moldagem por indústrias de fundição de metais ferrosos e não ferrosos (SIDDIQUE; SINGH, 2011). Pode ser reutilizada várias vezes em fundições, mas, após um certo período, torna-se um resíduo, conhecido como areia descartada de fundição, ADF (DAYTON *et al.*, 2010). A areia de exaustão é um material fino proveniente do sistema de exaustão do setor de desmoldagem e limpeza de peças metálicas fundidas em caixa de areia, a fim de evitar partículas suspensas no ambiente, sendo captada por filtros tipo manga (MARTINS *et al.*, 2019, RIBEIRO *et al.*, 2006, 2007) e compõe as ADF.

As ADF constituem o maior problema para as indústrias de fundição devido ao grande volume descartado e a necessidade de aterros especiais para a disposição desses resíduos, envolvendo alto custo para descarte (SINGH; SIDDIQUE, 2012; SIDDIQUE; SANDHU, 2013). Estima-se que 10 milhões de toneladas de ADF são geradas no mundo, sendo que 2/3 são dispostas em aterros (DIAZ PAGE *et al.*, 2017). O aumento das restrições ambientais e consequente aumento de custos para o descarte tem incentivado as pesquisas a fim de explorar soluções alternativas para a disposição dos resíduos (SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016).

É essencial para a estrutura de concreto ser avaliada não só quanto à resistência mecânica, mas também quanto à durabilidade, ou à vida útil projetada. Muitas vezes, a questão da durabilidade é deixada em segundo plano, pois supõe-se que concreto de alta resistência à compressão, seja um concreto durável (KANELLOPOULOS; PETROU; IOANNOU, 2012). A durabilidade do concreto está diretamente associada à facilidade com que os agentes agressivos penetram o material e sua propensão à deterioração. A permeabilidade e porosidade que se referem ao tamanho e à distribuição dos poros são fatores importantes para determinar a resistência do concreto aos agentes agressivos (NEVILLE; BROOKS, 2013). Segundo Mehta, Monteiro (2014), a forma mais eficaz para incrementar a durabilidade é a redução da permeabilidade de fluidos no concreto por meio de uma dosagem adequada e baixa relação água/cimento (a/c).

Partindo da premissa de que a determinação do ingresso de fluidos pode ser um indicador que expressa as características da microestrutura e que está relacionada à durabilidade, além do que a incorporação de adições no concreto pode reduzir a permeabilidade e aumentar a resistência aos ataques químicos, o autor propõe usar o resíduo de corte de mármore e granito, RCMG, como *filler* e a AEF em substituição parcial da areia natural na produção do CAA.

1.1 JUSTIFICATIVA

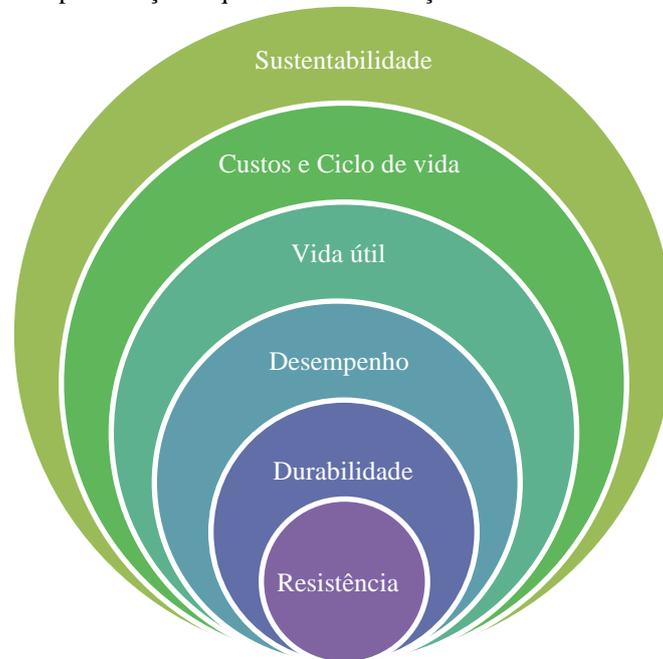
Diante do fato de que estudos já foram realizados com diversos resíduos sendo usados em substituição ou adição no CAA, inclusive a ADF, ainda há uma lacuna sobre o uso da areia de exaustão da fundição e sua influência na armadura. Nesse contexto, o presente estudo se apoia na hipótese de que há a possibilidade de uso da areia de exaustão da fundição, com resultados satisfatórios nas propriedades de estado fresco e endurecido para o desenvolvimento do CAA com armadura. Desse modo, há que se ampliar o seu uso na construção civil, como alternativa, e, além disso, procura-se aliar a redução dos resíduos encaminhados para aterros industriais, minimizando os impactos ambientais e, conseqüentemente, a diminuição de custos para a indústria de fundição.

Conforme mencionado anteriormente, é fundamental para o concreto ter um bom desempenho não somente quanto à resistência, mas também quanto à durabilidade. Embora o CAA seja usado em muitos países, existe uma lacuna fundamental nas pesquisas sobre a durabilidade. Nas últimas décadas, observou-se um enorme gasto com reparos e manutenção de estruturas devido a falhas e degradação precoce nas estruturas. Estes gastos consomem uma grande parcela de orçamento, além de colocar em risco vidas humanas. Daí a necessidade de estudar, aperfeiçoar e desenvolver obras mais duráveis com a vida útil prolongada, buscando economia e redução de energia objetivando obras mais sustentáveis. Diante disso, tornou-se necessário o estudo da durabilidade e os mecanismos de deterioração do concreto (ANDRADE, 2005).

Inicialmente e por muito tempo, a principal característica para especificação do projeto de concreto era a **resistência** à compressão. Depois, procurou-se a **durabilidade**, buscando o conceito do melhor **desempenho** das estruturas e dos materiais constituintes. Mais tarde, surgiu o conceito de **vida útil** e, atualmente, a **preservação do meio ambiente**. Nesse sentido, a análise **de ciclo de vida e custos** são preponderantes para vencer a competitividade e alcançar a **sustentabilidade** (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011). A evolução dos conceitos

relativos ao projeto estrutural do concreto foi descrita por Possan (2010) como representada na Figura 1.

Figura 1: Representação esquemática da evolução dos conceitos relativos à estrutura



Fonte: Adaptado de Possan, 2010

O CAA tem se mostrado um concreto com maior resistência e com baixa permeabilidade e esses fatores proporcionam um aumento da durabilidade e vida útil. Dessa forma, nesta pesquisa, busca-se um concreto que atenda às prerrogativas de resistência, durabilidade, maior tempo de vida útil e sustentabilidade. Sendo assim, o autor percebeu a necessidade de ampliar o uso da ADF, avaliando as propriedades mecânicas e alguns indicadores de durabilidade do CAA com RCMG e AEF, visto que este último compõe a ADF que é o principal resíduo da indústria de fundição de metais, ou seja, correspondem a aproximadamente 70% do total de resíduos gerados conforme Alonso-Santurde *et al.* (2012). A utilização dos resíduos traz benefícios ambientais que se traduzem tanto na redução de resíduos depositados em aterros quanto na redução de extração da areia natural, além do custo final da obra.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo analisar as propriedades no estado fresco e endurecido e potencial corrosivo e, conseqüentemente, os efeitos na durabilidade, do CAA com o uso do RCMG como *filler* e da Areia de Exaustão de Fundição em substituição parcial da areia natural.

1.2.2 Objetivos Específicos

Constituem-se em objetivos específicos da presente tese de Doutorado:

- 1- Encontrar a dosagem ideal do CAA utilizando RCMG como adição mineral e a AEF como substituta parcial da areia natural;
- 2- Verificar as propriedades do CAA com o uso de AEF no estado fresco: adensabilidade, viscosidade, espalhamento e resistência à segregação;
- 3- Verificar a propriedade de resistência à compressão do CAA com o uso de AEF aos 7, 28 e 90 dias;
- 4- Avaliar o acesso dos agentes agressivos que provocam a deterioração do concreto por meio da absorção de água por imersão e por capilaridade, da resistência aos sulfatos e resistência ao ataque ácido;
- 5- Aplicar as técnicas da difusão de íons de cloreto, a resistividade elétrica volumétrica e o potencial de corrosão a fim de avaliar a menor ou maior possibilidade de ocorrer corrosão nas armaduras do concreto com a utilização dos resíduos RCMG e AEF;
- 6- A partir destes dados e comprovação da hipótese da possibilidade do uso da areia de exaustão da fundição, com resultados satisfatórios nas propriedades de estado fresco e endurecido para o desenvolvimento do CAA.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O CONCRETO AUTOADENSÁVEL

O CAA é usado em estruturas com grande densidade de armaduras, as quais apresentam dificuldade para adensamento utilizando vibradores mecânicos ou manuais. Deve apresentar, no estado fresco, as características de fluidez, facilidade de passagem entre as armaduras, viscosidade e resistência à segregação (EFNARC, 2005, 2006; CHOPRA; SIDDIQUE; KUNAL, 2015). Essas características de fluidez, viscosidade e coesão são obtidas com a utilização de adições minerais de baixa granulometria e aditivos químicos, em especial os aditivos superplastificantes e os modificadores de viscosidade (EFNARC, 2002). A habilidade de passagem por obstáculos é governada pela viscosidade da pasta e da argamassa. A estabilidade da mistura, ou resistência à segregação, é garantida pela viscosidade e coesão do concreto. Essas características estão relacionadas com as propriedades reológicas da mistura, ou seja, a deformabilidade depende da tensão mínima necessária para que o concreto flua e da viscosidade plástica que impede a segregação (GOMES; BARROS, 2009).

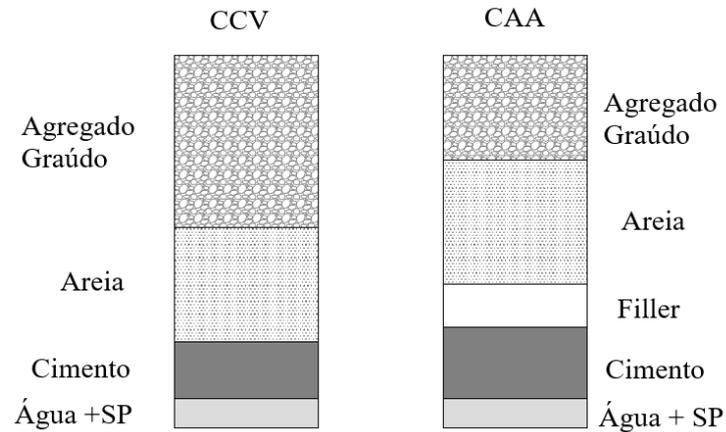
A necessidade de utilizar materiais finos na composição do CAA tem estimulado o uso de resíduos industriais e esse fato torna possível a obtenção de um concreto sustentável ou ambientalmente amigável (MEHTA, 2002; MALHOTRA, 2002)

A grande quantidade de finos necessária para obtenção de uma mistura homogênea e coesa, além de melhorar propriedades reológicas, como a trabalhabilidade, possibilita a diminuição o calor de hidratação do cimento, pois a quantidade de cimento pode ser reduzida (BOUKHELKHAL *et al.*, 2015).

2.1.3 Propriedades relevantes dos componentes para CAA

O CAA é composto pelos mesmos materiais que os do concreto convencional vibrado (CCV): cimento, areia, brita e água, com alteração da dosagem e uso imprescindível de aditivos para maior trabalhabilidade e fluidez. Podem ser aditivos minerais, como sílica ativa, cinza volante, escória granulada de alto-forno, pozolana, cinza de casca de arroz, resíduo de corte de mármore ou granito, entre outros, ou aditivos químicos, como superplastificantes e, às vezes, os modificadores de viscosidade (KHAN, 2017, KANELLOPOULOS; PETROU; IOANNOU, 2012). As proporções dos componentes das misturas do CCV e CAA estão mostradas na Figura 2.

Figura 2: Comparação das proporções da mistura do CCV e CAA



Fonte: Okamura; Ouchi, 2003. Adaptado

No CAA, o volume de agregado é menor, devido à menor quantidade de agregado graúdo, e, conseqüentemente, maior conteúdo de pasta, ou seja, de cimento e finos (OKAMURA; OUCHI, 2003).

2.1.3.1 Cimento Portland

O cimento Portland (CP) é o material mais importante do concreto. No entanto, a sua fabricação traz efeitos negativos ao meio ambiente devido às altas emissões de gases de efeito estufa (GEE) mensuradas em dióxido de carbono equivalente, CO_{2eq} (JANOTKA, 2010). Estima-se que tal indústria produza 7% do CO_2 antropogênico global, ainda, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, no Brasil, esse índice é bem menor, em torno de 2,6%, devido a uma série de ações de sustentabilidade implantadas ao longo dos últimos anos pela indústria (CIRILO, 2019). As emissões de CO_{2eq} na indústria são provenientes de duas fontes: da queima do clínquer (combustão) e da carbonatação do calcário (calcinação). Para cada tonelada de clínquer, são emitidos 0,8t de CO_{2eq} . Em decorrência das mudanças climáticas, os concretos ambientalmente amigáveis ganharam bastante atenção nas últimas décadas (NICOARA et al., 2020, CIRILO, 2019, YIN; AHAMED; LISAK, 2018, NOVAK; SCHNEIDER; LANG, 2005). A substituição de parte do cimento por materiais cimentícios suplementares (MCS) é uma medida para redução do uso do cimento no concreto (El MIR; NEHME, 2017).

A matéria prima para produzir cimento Portland consiste, principalmente, de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Esses componentes se interagem no forno e formam outros

produtos mais complexos, tais como os óxidos, constituintes mais importantes listados na Tabela 1.

Tabela 1: Principais componentes do cimento

Componente	Composição	Abreviatura
Silicato tricálcico	3 CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2 CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3 CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminato ferroso tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Fonte: Adaptado de Neville e Brooks (2013)

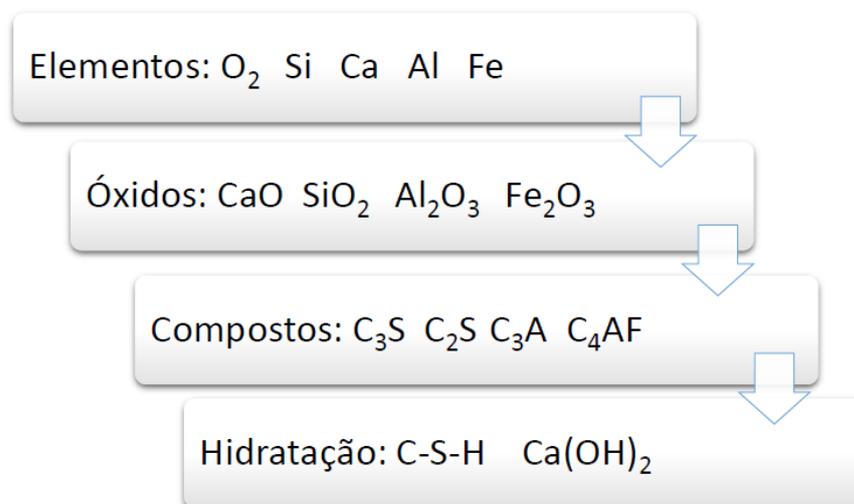
Onde: CaO = C; SiO₂ = S; Al₂O₃ = A; Fe₂O₃ = F

Os silicatos C₃S e C₂S são os componentes mais importantes, pois são responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada. A hidratação dos silicatos acontece algumas horas depois da hidratação do cimento e formam os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e hidróxido de cálcio hidratado Ca(OH)₂. A hidratação dos aluminatos, C₃A e C₄AF na presença do gesso formam a etringita primária, não tem efeito deletério na estrutura e começa logo após a hidratação do cimento sendo responsável pela pega, ou endurecimento (NEVILLE; BROOKS, 2013).

O silicato C₃A pouco contribui para resistência final; além disso, quando associado aos sulfatos, formam sulfoaluminato de cálcio (etringita), muito prejudicial ao concreto endurecido. No entanto, facilita a combinação do óxido de cálcio com a sílica na produção do cimento. Quanto maior a finura do cimento, maior a quantidade de C₃A disponível nas primeiras idades, sendo necessário o aumento do teor de sulfato de cálcio e, conseqüentemente, maior a possibilidade da formação da etringita (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A quantidade de C₃A é importante quando se trata da corrosão de armadura, pois determina a capacidade de combinação com os íons de cloreto (Cl⁻). Quanto maior a quantidade de C₃A, menor a concentração de íons de cloro livres no concreto devido à formação de cloro aluminatos e menor ocorrência de corrosão (SILVA; LIBORIO, 2005). O aluminato C₄AF aparece em pequena quantidade em relação aos outros três componentes; porém, ele reage com o gesso para formar o sulfato ferroso de cálcio e pode acelerar a hidratação dos silicatos. Em contato com a água, os silicatos e aluminatos do cimento Portland se hidratam formando compostos hidratados os quais proporcionarão a resistência, como esquematizado na Figura 3 (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Figura 3: Representação dos compostos do cimento hidratado



Fonte: Adaptado de Neville; Brooks (2013)

Segundo Neville, Brooks (2013), a composição química, o tamanho de grão e a distribuição granulométrica do cimento são fatores importantes que interferem na resistência inicial e final do concreto; quanto mais fino, mais rápida será a reação de hidratação. Além disso, o tipo de cimento utilizado influencia na durabilidade. O cimento Portland comum, cimento Portland com escória ou pozolânico restringe a passagem dos íons de cloreto, reduzindo a ocorrência de corrosão. Os cimentos resistentes aos sulfatos, com baixo teor de C_3A , podem aumentar o risco de corrosão (NEVILLE; BROOKS, 2013).

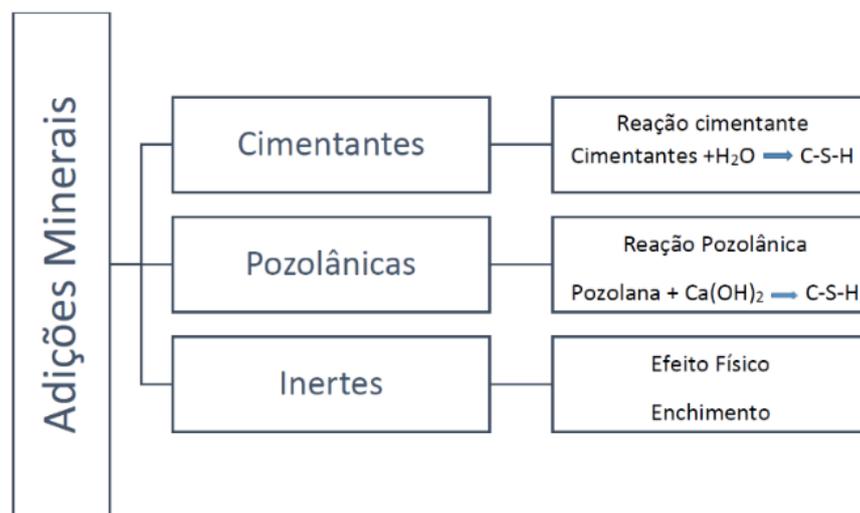
Para a confecção do CAA, podem ser utilizados os mesmos cimentos utilizados nos concretos convencionais, desde que atenda aos critérios de resistência. Normalmente, o mais utilizado é o cimento de alta resistência inicial (CPV ARI), por ser mais fino e apresentar maiores resistências iniciais (TECNOSIL, 2019). São indicados cimentos com menos de 10% de C_3A , pois, acima disso, podem causar a perda de trabalhabilidade. Além disso, Gomes, Barros (2009) preconizaram que a quantidade de cimento na mistura deve ser em torno de 200 a 450 kg/m^3 e Khayat *et al.* (1999) limitaram o consumo de cimento entre 350 a 550 kg/m^3 .

2.1.3.2 Adições minerais

Adições minerais são materiais finos que podem ser adicionados ao concreto para melhorar propriedades de autoadensabilidade. São classificadas como reativas ou inertes (FIGURA 4), onde as reativas são os cimentantes e pozolânicos e as inertes são os finos de granulometria menores que $0,125 \text{ mm}$ (*fillers*). Os materiais pozolânicos têm módulo de finura

igual ou menor que o cimento e propriedades cimentantes e por isso, podem substituir parcialmente o cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014) e são conhecidos como Material Cimentício Suplementar, MCS. Estes não contêm os silicatos e aluminatos e por isso contribuem para retardar a pega (AICTICIN, 2004). Os *fillers* também atuam como material de enchimento, ou seja, tornam o concreto mais denso e menos permeável. O uso de materiais finos aumenta a viscosidade da pasta e reduz a probabilidade de segregação (EFNARC, 2005).

Figura 4: Adições minerais reativas e inertes



Fonte: Adaptado de Dal Molin (2011)

Na Tabela 2, são apresentados alguns tipos mais comuns de adições minerais e as suas classificações, como cimentante, pozolânico ou filler.

Adição Mineral	Classificação
Escória Granulada de Alto Forno (EGAF)	Cimentantes
Cinzas Volantes (CV) (CaO >10%)	Cimentantes e Pozolânicas
Sílica Ativa (SA), Metacaulim, Cinza de casca de Arroz (CCA amorfa)	Super pozolânicas
CV (CaO <10%), argilas calcinadas, cinzas vulcânicas	Pozolanas comuns
EGAF, CCA cristalizada	Pozolanas pouco reativas
Calcário, Pó de Quartzo (PQ), Pó de Pedra (Pp)	Filler

Fonte: Adaptado de Mehta, Monteiro (2008)

A utilização de adições minerais tais como cinzas volantes, sílica ativa, cinza de casca de arroz e metacaulim, reduz custo do CAA, devido à redução do consumo de cimento. Conseqüentemente, há a diminuição do impacto ambiental causado pela emissão de CO_{2eq} na produção do cimento, além de melhorar propriedades mecânicas do concreto (GÜNEYISI *et al.*, 2015). Finalmente, há possibilidade de aumento da mistura sem aumentar o custo e, com a redução da dosagem do superplastificante, necessária para obter a fluidez do CAA (SIDDIQUE; AGGARWAL; AGGARWAL, 2012), há o aumento significativo da trabalhabilidade e diminuição considerável da permeabilidade ao cloreto (UYSAL, 2012).

A distribuição do tamanho de partícula, a forma e absorção de água dos finos podem afetar a demanda de água e, portanto, a trabalhabilidade do CAA. Os finos à base de carbonato de cálcio são amplamente utilizados e podem proporcionar excelentes propriedades reológicas e um bom acabamento. O tamanho deve ser menor que 0,125 mm e, geralmente, é desejável que mais de 70% passe na peneira de 0,063 mm (EFNARC, 2005, 2006).

2.1.3.3 Agregados

Os agregados sempre foram considerados como materiais de “enchimento” para o concreto, diminuindo o volume da pasta com o objetivo de reduzir custos. Atualmente, observa-se que os agregados têm grande influência na mistura (METHA; MONTEIRO, 2014). São também responsáveis pela estabilidade dimensional, massa unitária e módulo de elasticidade do concreto (SILVA; LIBORIO, 2005).

As propriedades físicas, como a massa específica, a textura e a granulometria dos agregados influenciam significativamente em concretos de alto desempenho (CAD) e CAA. A forma e a textura superficial influenciam mais as propriedades no concreto fresco do que no endurecido. São características importantes para aderência entre pasta e agregados, trabalhabilidade e compacidade do concreto. As partículas lisas e arredondadas requerem menores quantidades de pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis e, portanto, diminuem o custo do concreto. Partículas chatas e alongadas retêm mais água e aumentam a porosidade na zona de transição. Por sua vez, partículas angulosas requerem mais água de amassamento, devido à maior área superficial (SILVA; LIBORIO, 2005, MEHTA; MONTEIRO, 2008). A escolha dos agregados graúdos bem graduados e menos alongados influencia na trabalhabilidade e isso implica a redução do teor de água e da pasta (CHEN; YANG, 2015). Os agregados graúdos devem ter dimensão máxima de 20 mm de acordo com EFNARC (2002).

2.1.3.5 Aditivos

O uso de aditivos superplastificantes (SP), também conhecidos como redutores de água, aumentou nos últimos anos, especialmente em obras de grande porte ou naquelas que exigem o uso de concretos especiais, como CAA ou concreto de alto desempenho (SANTOS *et al.*, 2017b).

Os aditivos plastificantes ou superplastificantes são imprescindíveis para a redução do consumo de água (SILVA; LIBORIO, 2005). Consistem de tensoativos aniônicos de cadeia longa e massa molecular elevada. Quando absorvido pelas partículas de cimento, o tensoativo confere uma forte carga negativa, a qual auxilia a reduzir consideravelmente a tensão superficial da água circundante e aumentar acentuadamente a fluidez do sistema. Provocam a defloculação e a dispersão das partículas do cimento e aumentam a quantidade de partículas efetivamente hidratadas. A defloculação se deve à redução das forças de atração entre partículas com cargas opostas. Já a dispersão ocorre pela introdução da força repulsiva entre partículas, devido à alta carga negativa conferida às partículas de cimento pela absorção do aditivo. Quanto maior a absorção, melhor será a dispersão das partículas de cimento e mais homogênea será a microestrutura da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A ação do superplastificante permite que, para uma mesma relação água/aglomerante e mesmo teor de água na mistura, obtenha um aumento considerável da trabalhabilidade do concreto, mantendo a mistura coesiva. Ou permite obter concretos com trabalhabilidade normal, mas com uma resistência extremamente alta, devido a uma substancial redução da relação água/aglomerante. Esses aditivos reduzem o consumo de água entre 5% a 10%, proporcionando boa fluidez sem causar segregação (NEVILLE; BROOKS, 2013)

Independentemente do tipo de cimento utilizado, os aditivos apresentam comportamentos semelhantes quanto ao início de pega. O uso de aditivos em excesso pode causar alguns problemas, como: retardamento da pega, perda de trabalhabilidade e incorporação excessiva de ar (FRACALOSSO *et al.*, 2012).

2.1.3.6 Água

A água utilizada na composição do concreto deve ser de boa qualidade, livre de matéria orgânica, de resíduos sólidos, de sulfatos, de cloretos e açúcar; além disso, o pH deve ser entre 6 e 8. As impurezas podem interferir no endurecimento do cimento, afetar a resistência e provocar a corrosão das armaduras (NEVILLE; BROOKS, 2010). Normalmente, o teor de água não deve exceder 200 kg/m³ (EFNARC, 2002).

2.1.4 Reologia do Concreto

Reologia é a ciência que estuda as deformações e o escoamento de um fluido quando submetido a tensões. Para compreender os fundamentos da reologia, é preciso entender a diferença entre os materiais sólidos e líquidos. Nos fluidos ideais, gases e líquidos, quando uma tensão é aplicada, deformam-se irreversivelmente, ou seja, a energia se dissipa em forma de calor e não se recupera após a retirada da tensão. Os sólidos ideais se deformam elasticamente e recuperam a energia quando a tensão é retirada. Nos líquidos, a tensão de cisalhamento provoca uma taxa de deformação dada pela velocidade (V) e a distância percorrida (S), V/S dados $(\text{m/s})/\text{m} = \text{s}^{-1}$ (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

O concreto, no estado fresco, pode ser estudado a partir dos conceitos de reologia cujo comportamento se aproxima de um fluido (FERRARIS *et al.*, 2001). É importante analisar as propriedades reológicas do concreto fresco, especialmente CAD e CAA, pois as características de fluidez e homogeneidade devem ser mantidas durante o preparo, o transporte e a aplicação. Além disso, essas características influenciarão na resistência e durabilidade do concreto no estado endurecido (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

O comportamento de escoamento do concreto fresco é descrito por equações que relacionam a tensão de escoamento (τ) e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), chamada de viscosidade aparente (η). A tensão de escoamento e a taxa de cisalhamento são obtidas por meio de equipamentos mais sofisticados, como o reômetro, no qual o concreto fresco é considerado um fluido viscoelástico. No entanto, o reômetro não é muito utilizado, pois exige um equipamento mais robusto e de alto custo; então, o estudo reológico do concreto é feito por métodos empíricos, como o espalhamento, que utiliza o tronco de cone no qual se verifica a fluidez. A viscosidade pode ser avaliada pelo funil V, a habilidade de passagem pelo Anel J ou Caixa L e, finalmente, a segregação é observada no ensaio de espalhamento ou tubo U (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011, EFNARC, 2005).

2.1.4.1 Parâmetros reológicos

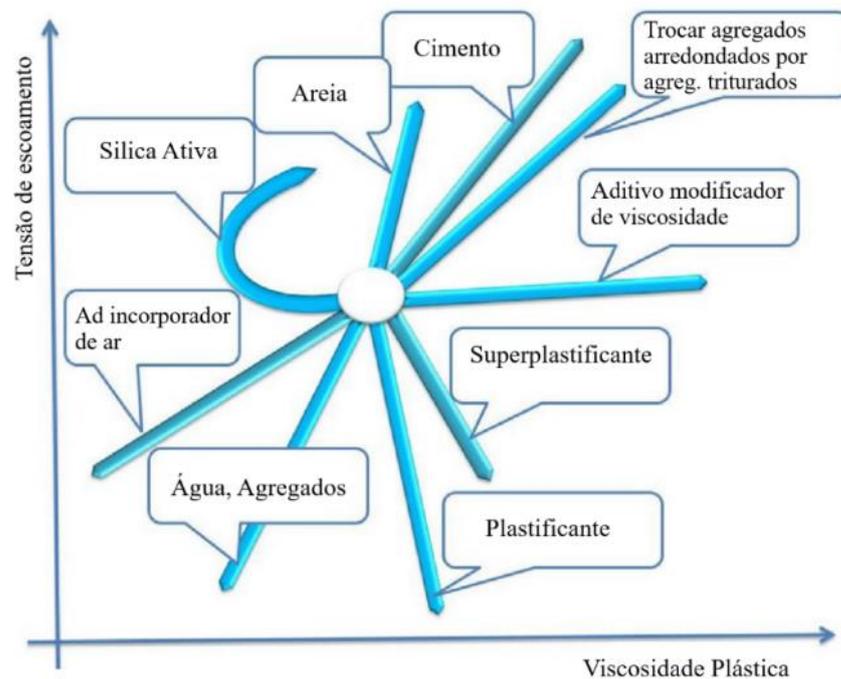
Ferraris, De Larrard (1998) preconizaram que, embora os valores absolutos das propriedades reológicas medidas por diferentes dispositivos de teste sejam diferentes, existe uma relação entre esses valores medidos. Os parâmetros reológicos do concreto fresco podem ser medidos indiretamente pelos testes do Tronco de cone, Funil V, Caixa L entre outros.

A tensão de escoamento é uma característica comum do concreto fresco e materiais granulares e está relacionada com o abatimento ou espalhamento do concreto. Resulta do atrito

intergranular, sendo que o tamanho e a morfologia dos sólidos alteram a tensão de escoamento. A viscosidade plástica relaciona o concreto fresco com outros materiais viscosos, está associada a aplicação, bombeamento e segregação estando relacionada ao teor de água da mistura. É governada pela razão de materiais sólidos e a densidade de empacotamento. (De LARRARD; SEDRAN, 2002, PARK; NOH; PARK, 2005). Segundo Khayat, Schutter (2014), quanto maior o espalhamento menor a tensão de escoamento e quanto maior o tempo de espalhamento T500 e do Funil V maior a viscosidade plástica.

O comportamento do CAA, no estado fresco, é influenciado pela proporção da mistura, pela temperatura ambiente e pelo próprio processo de mistura. A grande variedade de materiais cimentícios e suas diferentes proporções afetam suas características de autoadensabilidade e de reologia (KOSTRZANOWSKA-SIEDLARZ; GOŁASZEWSKI, 2016). A influência de componentes da mistura e propriedades reológicas estão mostradas na Figura 5.

Figura 5: Variações dos parâmetros reológicos em função dos diferentes componentes do CAA.



Fonte: Kostrzanowska-Siedlarz, Gołaszewski (2016)

Observando a Figura 5, pode-se verificar que o aumento do volume de areia, o aumento do cimento e a utilização de agregados triturados aumentam a tensão de escoamento e a viscosidade plástica em intensidades diferentes. O uso de aditivos plastificantes e superplastificantes reduzem a tensão de escoamento e pouco aumentam a viscosidade. A maior

redução da tensão de escoamento e da viscosidade é obtida pelo aumento da relação a/c. A influência da sílica ativa é mais complexa: um volume muito baixo, de 3% a 5%, causa diminuição na tensão de escoamento e na viscosidade, um volume baixo de 5% a 10% resulta no aumento da tensão e da viscosidade e uma quantidade de 10% a 15% resulta na redução da viscosidade (KOSTRZANOWSKA-SIEDLARZ; GOŁASZEWSKI, 2016).

2.1.4.3 Reologia da pasta

O concreto fresco é um material bifásico composto pela fase matriz, pasta de cimento, e fase agregados, onde o escoamento depende da viscosidade da matriz e do volume de agregados (YEN *et al.*, 1999). A pasta de cimento envolve os agregados; portanto, as propriedades reológicas do concreto podem ser relacionadas com as propriedades reológicas da pasta de cimento, que, por sua vez, é responsável pela fluidez e coesão do concreto (AGUILÓ *et al.*, 1999). No entanto esta relação é complexa, pois os agregados também interferem na reologia (FERRARIS *et al.*, 2001). Porém, a reologia da pasta pode ser usada para controlar as adições químicas e minerais, avaliar a dosagem do aditivo superplastificante e o seu tempo de ação. Estes parâmetros podem ser estudados pelo ensaio do espalhamento e cone de Marsh (JIANG *et al.*, 1999) (FIGURA 6).

Figura 6: Cone de Marsh e Kantro, equipamentos utilizados para ensaio da pasta



Fonte: Acervo próprio autor

Segundo Okamura, Ouchi (2003), é necessário que a pasta tenha alta viscosidade para evitar o bloqueio dos agregados graúdos. O concreto, ao passar por obstáculos, a pasta de alta viscosidade reduz a tensão interna devido à aproximação das partículas do agregado graúdo. A

alta deformabilidade só pode ser alcançada com a utilização de aditivo superplastificante e mantendo a relação água/cimento baixa. O uso de materiais finos aumenta a viscosidade da pasta e reduz a probabilidade de segregação (CALADO *et al.*, 2015).

2.1.5 Métodos de dosagem para CAA

O método de dosagem da mistura é um passo muito importante na produção e aplicação do concreto. Consiste na seleção de matérias-primas em proporções ótimas para alcançar as propriedades necessárias em estados frescos e endurecidos para aplicações específicas. O CAA é uma mistura muito sensível, fortemente dependente da composição e das características dos seus constituintes (KHAN, 2017).

Muitos métodos de projeto de mistura de CAA foram propostos com base em diferentes princípios ou parâmetros de controle. No entanto, há uma falta de critério uniforme, parâmetros específicos ou fatores para avaliar a dosagem, o que dificulta comparar a eficácia de diferentes métodos e propriedades do CAA (SHI *et al.*, 2015).

Shi *et al.* (2015) classificaram os métodos de dosagem da mistura de CCA em cinco categorias, com base em seus princípios de projeto: método de dosagem empírico, método de resistência à compressão, método de empacotamento dos agregados (MEC), métodos baseados em modelo fatorial estatístico e método baseado na reologia de pasta. Neste estudo foi descrito apenas o método de empacotamento dos agregados.

2.1.5.1 Método do empacotamento dos agregados

Este método de dosagem determina a proporção da mistura obtendo o menor volume de vazios entre os agregados com base no modelo de empacotamento. Em seguida, calcula-se o volume da pasta para preencher os vazios entre os agregados e dar trabalhabilidade ao concreto (SHI *et al.*, 2015). Peterson; Billberg; Van (1996), Sedran; De Larrard (1999), Su; Hsu; Chai (2001) propuseram métodos de dosagem baseados no empacotamento compressível.

O método do empacotamento compressível (MEC) é uma ferramenta de dosagem baseado no estudo do De Larrard (1999) sobre empacotamento de misturas secas em todos os componentes utilizados no concreto. Este define as proporções e tamanhos de partícula ideais dos materiais particulados de tal forma que os vazios entre partículas sejam preenchidos sucessivamente por partículas menores, aumentando a compacidade da mistura e diminuindo o risco de segregação. O método pode ser usado para dosagem de concreto convencional, concreto de alto desempenho e concreto autoadensável (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

A distribuição do tamanho das partículas dos componentes do concreto é de grande importância para obter o melhor empacotamento possível. A densidade de empacotamento tem grande influência nas características físicas do concreto pois define as propriedades reológicas da mistura, a quantidade de pasta de cimento e a porosidade do concreto. A diminuição dos vazios entre os agregados reduz o consumo da pasta necessária para fluidez e trabalhabilidade evitando o atrito entre os agregados (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009, OKAMURA, OUCHI (2003). O preenchimento sucessivo de vazios por partículas menores reduz o volume de vazios e aumenta a densidade de empacotamento dos agregados (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Um dos conceitos mais importantes para o desenvolvimento do MEC é o da compactação virtual de empacotamento de uma mistura granular monodispersa, ou seja, o emprego de curvas granulométricas visando o empacotamento máximo entre partículas. No entanto, o empacotamento máximo gera concretos ásperos e pouco trabalháveis.

Foram criados alguns modelos matemáticos como ferramentas para calcular a densidade de empacotamento a fim de otimizar as misturas granulares do concreto. Os modelos expressam a distribuição granulométrica de material granular através da porcentagem das partículas menores que determinado tamanho os quais são em função do coeficiente de distribuição de partículas, q , cujo valor varia para cada modelo (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Os modelos, inicialmente se dividiram em duas linhas: o modelo de Furnas que considera as partículas individualmente (1) e o modelo de Andreasen que considera as partículas como distribuições contínuas e infinitamente pequenas (2).

$$CPFT\% = \left(\frac{D^{logr} - D_S^{logr}}{DL^{logr} - D_S^{logr}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$CPFT\% = \left(\frac{D}{DL} \right)^q \times 100 \quad (2)$$

Estas equações foram modificadas por Funk, Dinger e Funk Jr. (1980) é denominada de equação de Andreasen modificada (3).

$$CPFT = \left(\frac{D^q - D_S^q}{DL^q - D_S^q} \right) \quad (3)$$

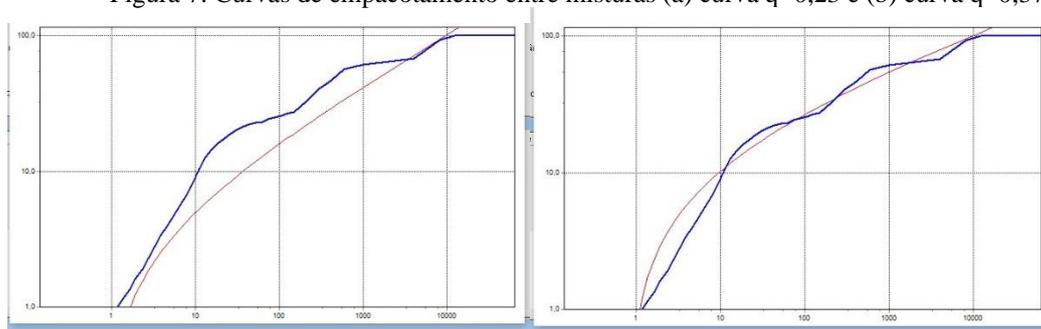
Onde: CPFT: Porcentagem de partículas menores que diâmetro D ; D : Diâmetro da partícula analisada; D_L : Diâmetro da partícula maior; D_S : Diâmetro da partícula menor; r : Razão dos volumes de partículas entre 2 malhas de peneiras consecutivas; q : módulo do coeficiente de distribuição de partículas.

O coeficiente “q” foi determinado por simulações computacionais, o qual De Larrard adotou o valor $q=0,20$; Castro, Pandolfelli (2009) afirmaram que $q \leq 0,37$ favorece o empacotamento máximo das partículas finitas e $q > 0,37$ provoca porosidade residual; para concreto convencional adota-se o valor $q=0,30$ e o mais indicado para CAA é o valor $q \leq 0,25$, o qual permite a produção de concretos mais econômicos e com boa facilidade de escoamento.

A curva ótima depende da aplicação e da adequação das formas dos agregados ao modelo adotado. Funk, Dinger, Funk Jr. (1980) concluíram que para a fração mais fina usa-se $q=0,37$ a fim de melhorar a resistência, a fluidez e a capacidade de sustentar as partículas mais grossas, ou seja, material mais fino serve de lubrificante facilitando a movimentação das partículas mais grossas. Enquanto que, para a fração mais grossa adota-se $q=0,22$. Quanto menor o valor de q maior a quantidade de finos.

As figuras 7a e 7b mostram um comparativo para uma mesma mistura onde em (a) adotou-se $q=0,23$ e em (b) adotou-se $q=0,37$. A curva ideal está em vermelho e a curva azul formada pela composição da mistura.

Figura 7: Curvas de empacotamento entre misturas (a) curva $q=0,23$ e (b) curva $q=0,37$



Fonte: Próprio autor

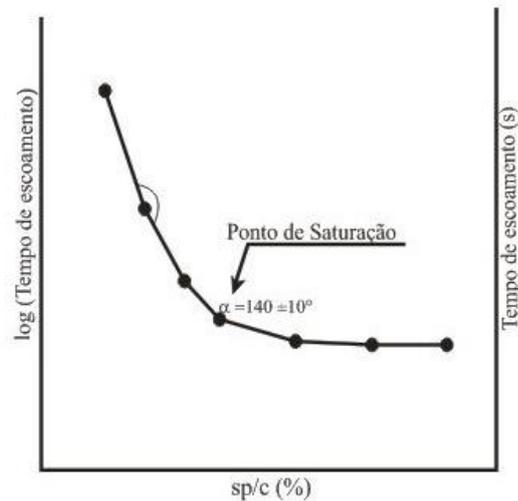
Nota-se que para $q=0,23$ a inclinação da curva é menor e seria necessário maior quantidade de finos; para $q=0,37$ a inclinação da curva maior, favorece as partículas mais grossas.

i. “Método do Gomes”

No Brasil, destaca-se o método desenvolvido e aplicado por Gomes, Gettu e Aguiló (2003). Esse método consiste em obter a composição do concreto a partir da otimização da pasta e do esqueleto granular separadamente, conforme descrição a seguir:

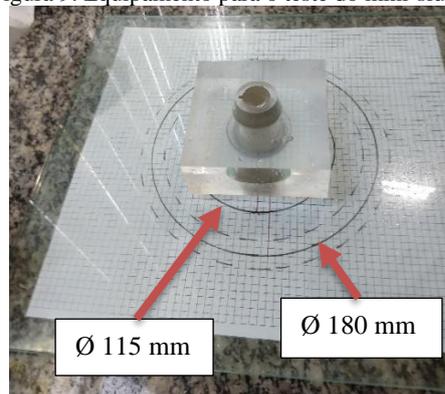
1. Obtenção da composição da pasta: Determina-se a dosagem do aditivo superplastificante e dos finos, materiais cimentícios suplementares e/ou adições minerais, em relação a massa de cimento. O ponto de saturação do aditivo é obtido, por meio do ensaio do cone de Marsh, fixando-se a quantidade de cimento, do material fino (*filler*) e da água e variando as porcentagens do aditivo. Para cada mistura, determina-se o tempo que 500 ml de pasta passa pelo funil. Traça-se a curva de porcentagem do superplastificante versus o logaritmo do tempo ($\% \text{ SP} \times \log 1/t$). A porcentagem ótima do aditivo é o ponto onde a relação, superplastificante/cimento, SP/c, corresponde ao ângulo interno de 140° na curva (FIGURA 8).

Figura 8: Curva de saturação do superplastificante



A quantidade ideal de adição mineral é ajustada pelo ensaio do *mini-slump* por meio do equipamento Kantro, onde se marca o tempo para atingir 115 mm (T_{115}) e se mede o espalhamento máximo que deve variar entre de 180 mm \pm 10 mm (FIGURA 9).

Figura 9: Equipamento para o teste do mini-slump



Fonte: Acervo próprio autor

Os ensaios da pasta permitem obter relações SP/c e filler/cimento, f/c, com ótimas propriedades para CAA. O volume da pasta é calculado pela soma dos volumes dos componentes da pasta, como mostra a Equação 4.

$$V_p = V_{cim} + V_{filler} + V_{adições} + V_{spl} + V_{água} - V_{asp} \quad (4)$$

Onde: V_p = Vpasta; V_{cim} = volume do cimento; V_{filler} = Volume de finos; $V_{adições}$ = Volume das adições minerais; V_{spl} = Volume de SP líquido; $V_{água}$ = volume da água e V_{asp} = Volume da água do SP.

2. Esqueleto granular é a melhor combinação entre os agregados, na qual se obtém o menor índice de vazios para que seja necessário o menor volume de pasta no concreto. O esqueleto granular é obtido, experimentalmente, medindo as densidades das misturas dos agregados secos não compactados em diferentes proporções entre eles (GOMES; BARROS, 2009, GOMES *et al.*, 2003).
3. Depois, faz-se a correção da massa de cimento necessária para o volume unitário de concreto em m^3 pela Equação (5).

$$C = \frac{V_p}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{f/c}{\rho_f} + \frac{ad/c}{\rho_{ad}} + \frac{spl/c}{\rho_{sp}} + \frac{a/c}{\rho_a} - \frac{asp/c}{\rho_a}} \quad (5)$$

Onde: C é a massa do cimento em kg/m^3 ; f/c= proporção em massa do filler em relação ao cimento, ad/c= proporção em massa da adição mineral em relação ao cimento; SPL/c= proporção em massa do SP líquido em relação ao cimento; a/c= massa de água em relação ao cimento e asp/c= massa da água do SP em relação ao cimento e ρ_i = é a massa específica de cada componente (i).

2.1.6 Métodos de ensaio no estado fresco

Como supracitado, um concreto é considerado autoadensável se possuir as características: capacidade de enchimento, habilidade de passagem e a resistência à segregação. Muitos métodos de ensaio foram desenvolvidos para caracterizar o CAA no estado fresco; no entanto, não existe um método único que caracterize as três propriedades de trabalhabilidade. Desse modo, é necessário que se aplique uma combinação de métodos de ensaio para os diferentes parâmetros (EFNARC, 2002, 2006). Os ensaios mais comumente utilizados estão descritos a seguir.

2.1.6.1 Espalhamento, *Slump Flow*, e T_{500}

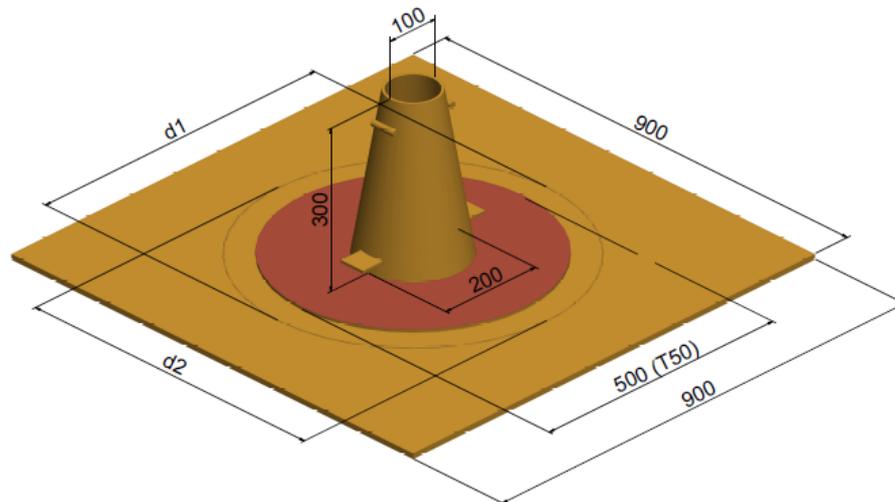
É um teste para avaliar a fluidez e o espalhamento do CAA, onde o espalhamento indica a capacidade de preenchimento e o T_{500} indica a viscosidade pela velocidade do fluxo. Além destas propriedades, pode-se avaliar visualmente a segregação. Ou seja, este equipamento mede a capacidade do concreto fluir sem segregar.

Para realização do ensaio, utiliza-se o tronco de cone de Abrams, uma placa plana de 900 x 900 mm no mínimo, com marcação central onde se posicionará o cone e um círculo de 500 mm de diâmetro (FIGURA 10), uma régua ou trena e um cronômetro.

Preenche-se o cone com o concreto fresco, 6 a 7 l, posicionado na placa previamente umedecida, levanta-se lentamente e marca-se o tempo que o concreto atinge a marcação de 500 mm, T_{500} e o diâmetro final do espalhamento (EFNARC, 2005; GOMES; BARROS, 2009).

A fluidez obtida é a medida do diâmetro do círculo formado pelo concreto que deve atingir no mínimo 550 mm e a viscosidade e fluidez também podem ser analisadas pelo tempo que o concreto leva para atingir o diâmetro de 500 mm (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Figura 10: Desenho esquemático para teste espalhamento e T_{500}



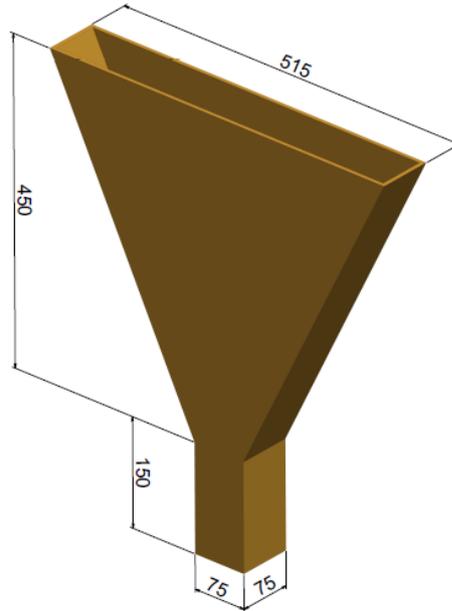
Fonte: Acervo próprio autor

2.1.6.2 Funil V

Este ensaio é usado para simular a capacidade de passagem do CAA através do estreitamento de seção na parte inferior, sob ação do peso próprio. É possível avaliar a fluidez e viscosidade medidas pelo tempo de escoamento, com a utilização de um cronômetro

O ensaio consiste em preencher o funil levemente umedecido (FIGURA 11) com 10 a 12 l de concreto, abrir a comporta inferior e marcar o tempo que leva para fluir totalmente (EFNARC, 2005; GOMES; BARROS, 2009).

Figura 11: Desenho esquemático do Funil V



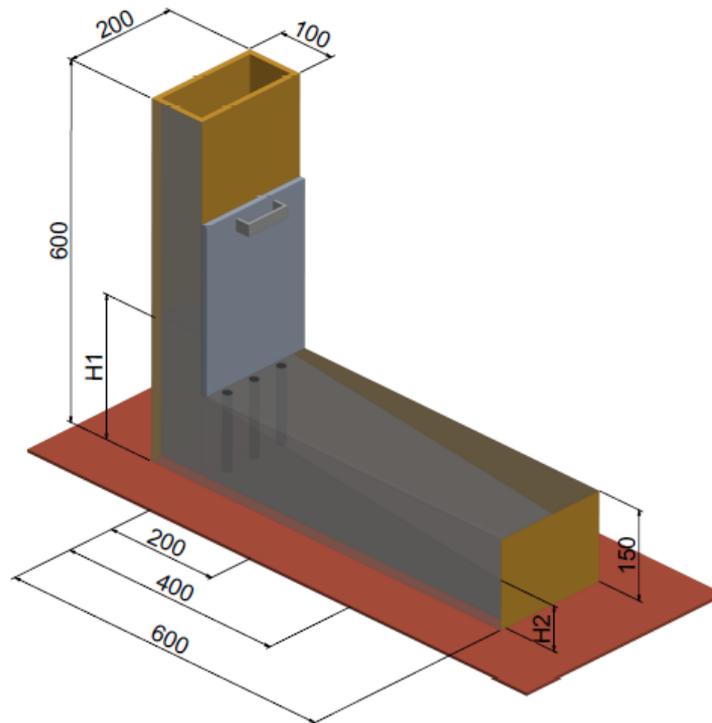
Fonte: Acervo próprio autor

2.1.6.3 Caixa L

O ensaio tem o objetivo de verificar a capacidade de passagem do CAA por obstáculos sob ação do peso próprio sem a ocorrência de segregação.

Para a realização do ensaio, é necessário que a Caixa L (FIGURA 12) esteja nivelada e umedecida. Despeja-se, aproximadamente, 12 l de concreto na coluna da caixa, levanta-se a porta para que o material flua entre as barras. São cronometrados os tempos que o concreto atinja 20 cm (T_{20}) e 40 cm (T_{40}) a partir das barras, os quais indicam a capacidade de enchimento e fluidez. Quando o concreto estabiliza, mede-se a altura final (H_2) e a altura inicial (H_1). A relação entre H_2 e H_1 , chamada de relação de bloqueio, indica a tendência à segregação (EFNARC, 2005; GOMES; BARROS, 2009).

Figura 12: Desenho esquemático da Caixa L



Fonte: Acervo próprio autor

A Tabela 3 mostra os ensaios mais comuns agrupados de acordo com as propriedades avaliadas do CAA no estado fresco

Tabela 3: Métodos de ensaio do CAA no estado fresco de acordo com propriedades avaliadas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor medido
Fluidez e capacidade de preenchimento	Slump flow (Cone de Abrams)	Espalhamento Segregação visual
Viscosidade; fluidez	T ₅₀₀	Tempo de escoamento
	Funil V	Tempo de escoamento
Habilidade passante	Caixa L	Taxa de passagem

Fonte: Adaptado de EFNARC (2006)

O CAA deve ser classificado em função das propriedades no estado fresco de acordo com os requisitos específicos estabelecidos na Tabela 4 conforme a norma da NBR 15823 (ABNT, 2017).

Tabela 4: Classificação do CAA de acordo com suas características no estado fresco

Espalhamento Slump Flow		
Classe	Espalhamento (mm)	Método de ensaio
SF1	550 a 650	ABNT NBR 15823-2
SF2	660 a 750	
SF3	760 a 850	
Viscosidade plástica aparente T ₅₀₀ (sob fluxo livre)		
Classe	T ₅₀₀ (s)	Método de ensaio
VS1	≤ 2	ABNT NBR 15823-2
VS2	> 2	
Índice de estabilidade visual		
Classe	IEV	Método de ensaio
IEV 0	Sem evidência de segregação ou exsudação	ABNT NBR 15823-2
IEV 1	Sem evidência de segregação e leve exsudação	
IEV 2	Auréola de argamassa ou empilhamento de agregados no centro do concreto	
IEV 3	Evidência de segregação clara com aglomerados de agregados no centro do concreto	
Habilidade passante Caixa L (sob fluxo confinado)		
Classe	Caixa L (H2/H1)	Método de ensaio
PL1	≥ 0,80 com 2 barras de aço	ABNT NBR 15823-4
PL2	≥ 0,80 com 3 barras de aço	
Viscosidade plástica aparente Funil V (sob fluxo confinado)		
Classe	Funil V (s)	Método de ensaio
VF1	< 9	ABNT NBR 15823-5
VF2	9 a 25	

Fonte: Adaptado da NBR 15823-1 (ABNT, 2017)

2.2 RESÍDUOS UTILIZADOS PARA COMPOSIÇÃO DO CAA

Em geral, são produzidos pelas indústrias mais de 400 milhões de toneladas de resíduos a cada ano no mundo (BABU; PRASAD, 2016). A utilização de resíduos industriais em concreto compensa a falta de recursos naturais, minimiza o problema de descarte, além de ser técnica alternativa para salvaguardar a natureza. Há uma série de resíduos industriais usados como substituição total ou parcial dos agregado graúdos e miúdos (DASH; PATRO; RATH, 2016). Muitas pesquisas foram encontradas utilizando resíduos para a confecção do CAA e obtendo resultados satisfatórios tanto nas propriedades no estado fresco quanto no concreto endurecido: Yang *et al.* (2015), Hama, Hilai (2017) analisaram CAA com partículas de plástico reciclado; Ghernouth *et al.* utilizaram resíduo de sacola plástica; Wongkeo *et al.* (2014) e Ramanathan *et al.* (2013) utilizaram cinzas volantes, sílica ativa e escória granulada de alto forno; Silva, Albuquerque, Lima (2013) utilizaram cerâmica vermelha moída, pó de pedra e pó de pneu; Aslani *et al.* (2018), Barbuta *et al.* (2017) avaliaram CAA com borracha granulada de

pneu; Santos *et al.* (2017a), Campos *et al.* (2018) utilizaram resíduos de construção civil e demolição; Sadek *et al.* (2016), Alyamac *et al.* (2017) usaram pós de granito e de mármore; Singh; Siddique (2016) avaliaram as características de durabilidade do CAA fabricado com escória de ferro; Sheen *et al.* (2015) utilizaram escória de aço inoxidável; Sahmaran *et al.* (2011) e Pathak; Siddique (2012) utilizaram cinzas volantes e ADF enquanto Gill, Siddique (2018) utilizaram metacaulim e cinza de casca de arroz em substituição parcial do cimento. Babu; Prasad (2016) substituíram parte da areia natural por ADF.

2.2.1 Resíduo de corte de mármore e granito (RCMG)

As rochas ornamentais, como granito e mármore, são bastante utilizadas na construção civil para uso estrutural, revestimento de pisos e fachadas e para decoração, devido às suas características de resistência, durabilidade, variedade e beleza (MARINHO; ROCHA; GALDINO, 2017). Diante disso, a indústria de mármore e granito tem um importante mercado no mundo todo (ALYAMAC; AYDIN, 2015).

De acordo com o Sumário Mineral 2018, em 2017, a produção mundial estimada de rochas ornamentais atingiu 152 Mt, com a China em 1º e o Brasil em 4º lugar no *ranking* mundial (HEIDER; MAIA, 2018). Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS), em 2017, a produção brasileira foi de 9,2 Mt, ou seja, aproximadamente 6,0% da produção mundial, destacando o ES com 3,5 Mt e MG com 1,9 Mt. Os materiais comercialmente classificados como granitos correspondem a 50% do total produzido e os mármore correspondem a 23,3% do total (CHIODI FILHO, 2018).

O beneficiamento, corte e polimento das rochas para o uso na construção civil e artefatos é feito com serra refrigerada com água gerando um resíduo em forma de pasta, chamado de lodo de mármore, que, depois de seco, forma o pó de mármore. A grande quantidade desse material representa grave ameaça ao meio ambiente e à saúde das pessoas, pois necessita de área para disposição, podendo causar contaminação do solo e da água, além de, depois de seco, as partículas finas, se não houver controle, são dispersas no ar, prejudicando a saúde (AMIT; SINGH, 2013). Quase 70% do bloco de pedra bruta se transforma em resíduo após o corte e polimento sendo 40% em lama e 30% em cacos segundo Hebhouh *et al.* (2011) e Aydin (2013). Esse alto volume de resíduo pode atingir milhões de toneladas e o reuso pode trazer ganhos ambientais e econômicos (MASHALY *et al.*, 2016).

Esse resíduo pode ser usado na construção civil como substituto parcial do cimento em consequência das suas propriedades pozolânicas, ou adição mineral para melhorar as propriedades mecânicas do concreto (RAMOS *et al.*, 2013, KAUR; BANSAL, 2015).

Muitos pesquisadores têm investigado o uso RCMG em diversas áreas da construção civil. Menezes *et al.* (2005) caracterizaram e avaliaram a possibilidade do uso de resíduos de corte de granito como matérias-primas cerâmicas alternativas para a produção de tijolos e ladrilhos. Corinaldesi *et al.* (2010) afirmaram que o pó de mármore é muito eficaz para garantir a coesão em argamassa autoadensável. Ramos *et al.* (2013) avaliaram o resíduo de lodo de granito em argamassas, quanto à resistência e durabilidade para posterior aplicação em concreto. Kaur, Bansal (2015) utilizaram o pó de mármore juntamente com metacaulim como substituição parcial do cimento para avaliar a resistência e durabilidade do concreto. Vardhan *et al.* (2015) e Sardinha *et al.* (2016) investigaram a possibilidade de substituir parte do cimento por pó de mármore em pastas de cimento. Sadek *et al.* (2016) investigaram a possibilidade do uso de pó de granito e mármore como adição mineral em CAA. Marinho *et al.* (2017) e Galetakis, Soutana (2016) fizeram uma revisão sistemática verificando as áreas de reaproveitamento do resíduo. Os primeiros analisaram 108 artigos e os outros, 49 artigos. Os autores constataram que a maior tendência de reaproveitamento deste resíduo é na construção civil para produção de argamassas, concreto, tijolos, blocos e asfalto.

O CAA tem sido uma das melhores alternativas para o uso do RCMG, pois este pode reduzir a quantidade de cimento na mistura (UYSAL; SUMMER, 2011), melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade (SADEK *et al.*, 2016) e pode ser usado com outros tipos de resíduos com sucesso (TENNICH *et al.*, 2017).

Uma revisão sobre o uso da lama de corte de granito em concreto foi feita por Chouran *et al.* (2017). Foram avaliadas as propriedades mecânicas do concreto no estado fresco e endurecido. Os autores observaram que o resíduo pode ser usado em substituição parcial do cimento, levando à redução de energia e emissão de dióxido de carbono, CO_{2eq} e, também, em substituição do agregado miúdo, proporcionando redução de custos e consumos dos recursos naturais. Além disso, os autores concluíram que a trabalhabilidade do concreto foi reduzida com o aumento da porcentagem do resíduo, sendo que os piores resultados foram obtidos com substituições acima de 20%. Quanto à resistência mecânica, os resultados com até 15% de substituição foram próximos ou mais altos que a referência devido às propriedades pozolânicas do resíduo. A durabilidade foi avaliada pelos testes de permeabilidade à água, a penetração rápida de íons de cloreto e resistência aos sulfatos. A permeabilidade à água foi reduzida com até 50% de substituição da areia pelo resíduo. O nível de penetração de íons de cloreto foi

equivalente ao controle nas misturas com substituição de até 15%. A resistência à compressão após a imersão em sulfatos foi reduzida em comparação ao controle com substituição até 25%.

Ulubeyli, Aarthi (2015) investigaram os efeitos do resíduo de mármore nas propriedades de durabilidade tais como a absorção por imersão, permeabilidade à água e ao CO₂, a resistência aos sulfatos e cloretos, a abrasão e quando submetidos ao congelamento e descongelamento em CAA e CCV. Os autores *opus cit.* concluíram que o uso do pó de mármore como adição mineral ou substituindo os agregados trouxe efeitos benéficos na durabilidade como a redução da absorção e permeabilidade ao CO₂ e penetração de cloretos, aumento da resistência aos sulfatos devido ao efeito filler. Além de melhorar a aderência entre pasta e agregados, a qual resultou numa matriz mais densa.

2.2.2 Areia de exaustão de Fundição

2.2.2.1 A indústria de fundição no Brasil

A indústria de fundição do Brasil produz peças fundidas em ferro, aço e ligas não ferrosas. De acordo com a ABIFA (2020), existem cerca de 1017 empresas de pequeno e médio porte, as quais empregam 55 mil trabalhadores. O fato de predominar o capital e a matéria-prima de origem nacionais lhes confere independência no mercado externo e geração significativa de empregos diretos e indiretos.

No cenário mundial, o Brasil caiu da 7^a para a 9^a posição na produção de fundidos devido à crise econômica nos últimos anos, sendo que a produção em 2018 foi de 2,28 milhões de toneladas e a maior parte da produção, 50,4%, destina-se para o mercado automotivo. A China lidera a produção com 49,35 milhões de toneladas, seguida pela Índia com 13,39 milhões e EUA com 10,76 milhões de tonelada/ano (ABIFA, 2020).

Os resíduos de fundição podem consistir em muitos produtos, tais como ADF, escória, cinzas, refratários, coagulante, pó do sistema de exaustão (filtros), sucata, vapores e líquidos residuais de forno (TORRES; BARTLETT; PILGRIM, 2017, SINGH; SIDDIQUE, 2012). Díaz Pace *et al.* (2017) relataram o descarte de aproximadamente 100 milhões de toneladas/ano de ADF no mundo sendo 2/3 depositados em aterros industriais. Enquanto Sandhu, Siddique (2019) afirmaram que em 2017 a produção global de fundidos era cerca de 109,8 milhões de toneladas por ano, onde 0,60 tonelada de areia eram descartadas por 1 tonelada da produção de aço fundido.

2.2.2.2 Areia Descartada de Fundição (ADF)

A maioria das indústrias de fundição, cerca de 90%, utiliza areia de sílica para moldagem das peças de metais ferrosos e não ferrosos. As peças são formadas pela deposição do metal fundido nas cavidades dos moldes com formato das peças (FIGURA 13). No processo de desmoldagem, as peças são retiradas das caixas de areia por processo vibratório e, em seguida, encaminhadas para limpeza, rebarbação e tratamento térmico, conforme propriedades desejadas (FAGUNDES; VAZ; OLIVEIRA, 2009).

Figura 13: Sequência do processo de fundição em caixa de areia



Fonte: Acervo próprio do autor

A areia utilizada para confecção dos moldes, chamada de areia verde, é constituída por areia de sílica (85-95%), argila de bentonita (5-10%), aditivo carbonáceo (2-10%) e água (2-5%). A areia sílica suporta altas temperaturas, a bentonita age como aglutinante, o carvão forma um filme entre a areia e o ferro proporcionando melhor acabamento à peça, e a água confere plasticidade à mistura. A areia verde é reciclada e reutilizada várias vezes até perder as características para a moldagem, sendo descartada após a desmoldagem das peças. Nesse caso, constituem-se a ADF, areia usada de fundição (AUF) ou areia gasta de fundição (SINGH; SIDDIQUE, 2012, AGGARWAL; SIDDIQUE, 2014).

O consumo de areia depende do tipo da peça, varia de 0,8 a 1 (uma) tonelada para cada tonelada de fundidos. Siddique; Noumowe (2008) relataram que são descartadas por volta de uma tonelada de areia para cada tonelada de peças fundidas. Desse modo, conclui-se que, no Brasil, são descartadas cerca de 2 milhões de toneladas/ano. As ADFs constituídas de areia verde e/ou areia ligada quimicamente compõem mais de 70% dos resíduos sólidos gerados pela indústria de fundição (SOHAIL, WAHAB, KHAN, 2013). Normalmente, essas areias são dispostas em aterros industriais, constituindo o maior problema para a indústria de fundição devido aos custos do transporte e para área de disposição. Esses fatores têm encorajado as indústrias a buscarem alternativas sustentáveis para o uso de ADF, ou seja, soluções econômicas e ambientalmente amigáveis (SIDDIQUE; SINGH; SINGH, 2018).

As características físicas e químicas da ADF dependem do tipo de processo, do metal fundido e do setor da indústria em que é originada (MONOSI *et al.*, 2013). Geralmente, são classificadas como resíduo não perigoso. No entanto, devido à grande concentração de metais que podem ser lixiviados e prejudiciais à saúde, devem ser feitas análises quantitativas de metais pesados (BARROS, 2013, MASTELLA *et al.*, 2014). Testes dos extratos lixiviado e solubilizado são essenciais para avaliar os impactos ambientais ou a toxicidade do resíduo (ARULRAJAH *et al.*, 2017). Os metais comumente encontrados são Prata (Ag), Alumínio (Al), Bário (Ba), Berílio (Be), Cádmiio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Lítio (Li), Magnésio (Mg), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Antimônio (Sb), Titânio (Ti), Telúrio (Te), Vanádio (V), Zinco (Zn) e Zircônio (Zr). O Ba é provavelmente proveniente dos aditivos da areia verde. O Zr é encontrado nas tintas utilizadas para a pintura dos moldes. Os metais: Al, Ba, Fe, Mg, Mn e Zn são encontrados em alta concentração nos solos naturais (MIGUEL *et al.*, 2012).

Uma grande variação dos parâmetros físicos é encontrada: geralmente, a ADF tem forma subangular para arredondada, a massa específica varia de 2200 a 2700 kg/m³ e peso unitário de 1052 a 1554 kg/m³, a capacidade de absorção varia de 0,38% a 4,15%. A distribuição do tamanho de partícula é uniforme, sendo que 85 a 95% do material varia entre 0,6 e 0,15 mm, 5 a 12 % pode ser menor que 75 µm e por volta de 60% tem tamanho de partícula de 58 µm (MAURÍCIO *et al.*, 2016; NAIK *et al.*, 1992).

Devido ao fato da disponibilidade e das propriedades semelhantes a areia natural, o uso mais comum da ADF é na construção civil, especialmente como substituto do agregado miúdo, aplicações geotécnicas e artefatos de construção, como tijolos, blocos, pisos intertravados, entre outros (ABICHOU; BENSON, 2000, TORRES; BARTLETT; PILGRIM, 2017).

Muitos estudos sobre a durabilidade e resistência do concreto convencional foram feitos utilizando ADF ou AUF como substituo da areia natural (TABELA 5) e neste levantamento realizado pouco foi encontrado em CAA e em nenhuma pesquisa foi analisado o potencial de corrosão.

Tabela 5: Pesquisas com uso de areia descartada de fundição em concreto convencional

Autores/data	% ADF/AUF	Propriedades avaliadas
Siddique, Schutter, Noumowe (2009)	10 a 30%	Compressão; Tração, Flexão e Módulo de Elasticidade.
Samahram <i>et al.</i> (2011)	25 a 100%	Compressão; Retração; <i>permeabilidade ao cloreto</i>
Siddique <i>et al.</i> (2011)	10 a 60%	Compressão; Tração; carbonatação; <i>resistência ao cloreto</i>
Singh, Siddique (2012)	5 a 20%	Compressão; Tração; Módulo de elasticidade. VPU; <i>Permeabilidade ao Cloreto</i> .
Khatib <i>et al.</i> (2013)	30, 60 e 100%	<i>Absorção</i> ; compressão; Velocidade de Pulso Ultrassônico.
Aggarwal, Siddique (2014)	0 a 60%	Compressão, Tração e flexão; <i>permeabilidade ao cloreto</i> e descamação da superfície devido ao sal de degelo
Prabhu <i>et al.</i> (2015)	10 a 40%	Compressão; Flexão; Tração; Módulo de Elasticidade, <i>Penetração de cloreto</i> ; Carbonatação; <i>Resistividade Elétrica</i> ; <i>Resistencia ao Sulfato</i>
Manoharan <i>et al.</i> (2018)	5 a 25%	Compressão; Flexão; Módulo de Elasticidade <i>Permeabilidade ao Cloreto</i> .
Siddique, Singh, Singh (2018)	5 a 20%	Compressão; tração; <i>Permeabilidade ao Cloreto</i> .
Gurumoorthy, Arunachalam (2019)	10 a 40%	<i>Absorção</i> ; sorvidade; <i>Permeabilidade ao Cloreto</i> ; <i>Resistência ao ácido</i> , ao sulfato e ao ambiente marinho.

Na sequência foram descritas algumas pesquisas sobre o uso de ADF em concreto autoadensável:

Pathak, Siddique (2012) estudaram a influência das cinzas volantes como substituição do cimento (30 a 50%) e AUF como substituição parcial da areia (10%) nas propriedades do CAA. O consumo de cimento do concreto controle foi de 500 kg/m³ e a/c=0,38. Foram analisadas as resistências a compressão e tração, o módulo de elasticidade, a permeabilidade ao cloreto, porosidade e perda de massa quando expostos a temperaturas elevadas (100, 200 e 300°C). Todas as misturas apresentaram muito baixa permeabilidade ao cloreto. As resistências pouco alteraram com o aumento da temperatura. As misturas com 30% de cinzas volantes e 10% AUF tiveram resultados melhores que os das outras misturas, porém inferiores que o controle em todas as idades e temperaturas.

Siddique, Sandhu (2013) pesquisaram as propriedades do CAA com a substituição da areia natural 10, 15 e 20% de ADF em peso. As propriedades do concreto fresco, espalhamento, coesão e viscosidade foram avaliadas pelos testes do *Slump flow*, funil V, caixa L e caixa U. Os melhores resultados foram com 15% de substituição. No entanto, todas as misturas

apresentaram resultados dentro dos parâmetros. As propriedades de resistência à compressão e tração tiveram ganho com aumento idade e da proporção da mistura, sendo observados os melhores resultados com 15% de substituição. A durabilidade foi verificada pela resistência ao ataque aos sulfatos onde foi utilizado sulfato de magnésio. Os autores concluíram que, com até 10% de substituição, houve maior resistência aos sulfatos. Quanto à penetração de íons de cloreto, concluíram que até 15% de substituição a permeabilidade foi reduzida. Com 20% de substituição, a permeabilidade aumentou; porém, ainda foi menor que a do concreto referência.

Sandhu, Siddique (2019) fizeram investigação experimental sobre a influência dos resíduos da areia de fundição (ADF) como uma substituição de agregado miúdo nas propriedades no estado fresco, de resistência e microestruturais do concreto autoadensável. As substituições foram de 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30%. Os testes realizados no estado fresco como espalhamento, T₅₀₀, Funil V, Caixa L e Caixa U mostraram que todas as misturas apresentaram características de CAA embora o aumento do resíduo tenha diminuído o espalhamento e aumento o tempo de espalhamento e escoamento pelo funil V. A resistência à compressão diminuiu com o aumento do resíduo em todas as idades, porém alcançaram valores superiores a 50 MPa aos 28 dias. Na análise microestrutural das misturas por difração de raios-X, DRX, foram identificadas sílica (SiO₂), calcita (CaCO₃), silicato de cálcio hidratado (Ca₅Si₆O₁₆(OH)₂.4H₂O), portlandita (Ca(OH)₂) e silicato de cálcio (Ca₂SiO₄).

Mahakav, Chithra, Kavitha (2019) avaliaram a possibilidade de utilização de areia de fundição e agregado graúdo reciclado para a fabricação de concreto autoadensável (CAA). Foram realizadas 25 misturas de concreto em que a substituição do agregado reciclado foi de 0, 25, 50, 75 e 100% como agregado graúdo e a substituição da areia de fundição foi de 0, 10, 15, 20 e 25% como agregado miúdo. O conteúdo de cimento, água e sílica ativa foram mantidos constantes para todas as misturas. Os resultados da investigação mostraram que as propriedades do concreto endurecido com 20% de areia de fundição foram significativamente melhoradas quando comparado ao concreto convencional. No entanto, as propriedades do CAA com 100% resíduo reciclado foram piores do que para o concreto convencional com 100% de agregado graúdo natural.

Parashar *et al.* (2020) investigaram o uso de areia descartada de fundição em CAA como substituto, 0 a 40%, da areia natural. A composição química, a análise das fases, análise térmica e morfológica foram feitas respectivamente por FRX, DRX, TGA e MEV. Quanto às propriedades no concreto fresco houve diminuição do espalhamento e melhora significativa na coesão das misturas com o aumento do resíduo. A resistência a compressão e módulo de elasticidade foram reduzidos da mesma forma em que a absorção e permeabilidade

aumentaram. O melhor resultado obtido foi com 10% de substituição, no entanto, com 20% o concreto apresentou bom desempenho.

Ashish, Verma (2021) analisaram a robustez do CAA com o uso de areia descartada de fundição (0 a 50%) e metacaulim (10%). Foi revelado que a incorporação de ADF melhorou o comportamento de robustez do CAA, ou seja, apesar da variação de $\pm 10 \text{ L} / \text{m}^3$ de água na dosagem, todas as misturas caíram na mesma classificação conforme EFNARC (2005). A incorporação de 40% ADF aumentou a resistência à compressão em 17,2% em relação ao concreto controle aos 56 dias. O estudo sugere que o resíduo pode ser usado em grandes volumes para o desenvolvimento de CAA sem comprometer suas propriedades.

2.2.2.3 Areia do Sistema de Exaustão da Fundição (AEF)

A Areia de Exaustão, ou Areia de Silica de Exaustão ou Pó de Exaustão é um subproduto obtido do processo de fundição (SOUZA *et al.*, 2019). É gerado durante a mistura da areia de sílica com argila de bentonita e carvão para a obtenção da areia verde utilizada nos moldes (DALLA VALENTINA *et al.*, 2015) durante a desmoldagem das peças metálicas (KRAUS *et al.*, 2009). O resíduo é captado por filtros manga a fim de evitar partículas suspensas no ambiente (RIBEIRO *et al.*, 2006, 2007).

As características físicas, químicas e morfológicas do resíduo de exaustão de fundição foram avaliadas por Santos; Dalla Valentina; Souza (2015), Martins *et al.* (2019). Os autores (*op. cit.*) concluíram que o resíduo possui baixa granulometria com 50% abaixo de 180 μm . As partículas têm formato de subangular para arredondadas. O resíduo apresenta características semelhantes a areia natural de rio, sendo este uma alternativa de uso em substituição a areia na indústria da construção civil. O resíduo foi classificado como classe II A, ou seja, não perigoso e não inerte de acordo com NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Ribeiro *et al.* (2006, 2007) utilizaram o pó de exaustão para obtenção de compósitos cerâmicos e obtiveram material de alta resistência e baixa absorção e retração. Dalla Valentina *et al.* (2016) avaliaram o pó de exaustão para o desenvolvimento de novos produtos cerâmicos e indicaram o uso para fabricação de telhas. Santos; Dalla Valentina; Cuzinsky (2016) analisaram a viabilidade do uso para fabricação de peças de pavimento intertravados. SOUZA *et al.* (2019) avaliaram a possibilidade de produzir revestimentos cerâmicos para ligas de alumínio com o pó de exaustão e os resultados obtidos mostraram a viabilidade do uso para este fim.

Kraus *et al.* (2009) estudaram o resíduo coletado em sacos dos filtros do sistema de exaustão da fundição, o pó de sílica de fundição. Os autores utilizaram o resíduo em substituição das cinzas volantes em CAA. O concreto controle foi desenvolvido com 40% em de cinzas volantes substituindo o cimento. As misturas com pó de sílica foram feitas em substituição de 10, 20 e 30% em peso, das cinzas volantes. Os autores concluíram que 10% de pó de sílica possibilitou a redução do aditivo superplastificante e, com o aumento da porcentagem do resíduo, foi possível diminuir o aditivo modificador de viscosidade obtendo CAA mais econômico. Com 30% de pó de sílica, aumentou significativamente a quantidade de SP, ou seja, o material fino reduziu a trabalhabilidade do concreto. Além disso a resistência mecânica a compressão diminuiu com o aumento da substituição do cimento/ cinzas volantes por areia de sílica.

Cúnico *et al.* (2014) estudaram o material fino retirado do sistema de exaustão do setor de desmoldagem da fundição, o pó de exaustão. Os autores utilizaram o resíduo como adição em massas cerâmicas atomizadas para revestimentos cerâmicos. Foram confeccionadas misturas com 0,10, 20, 30, 40 e 50% de adição do resíduo, em peso. As análises das propriedades “densidade aparente”, “retração”, “absorção” e “porosidade” mostraram a viabilidade do uso do resíduo para revestimentos.

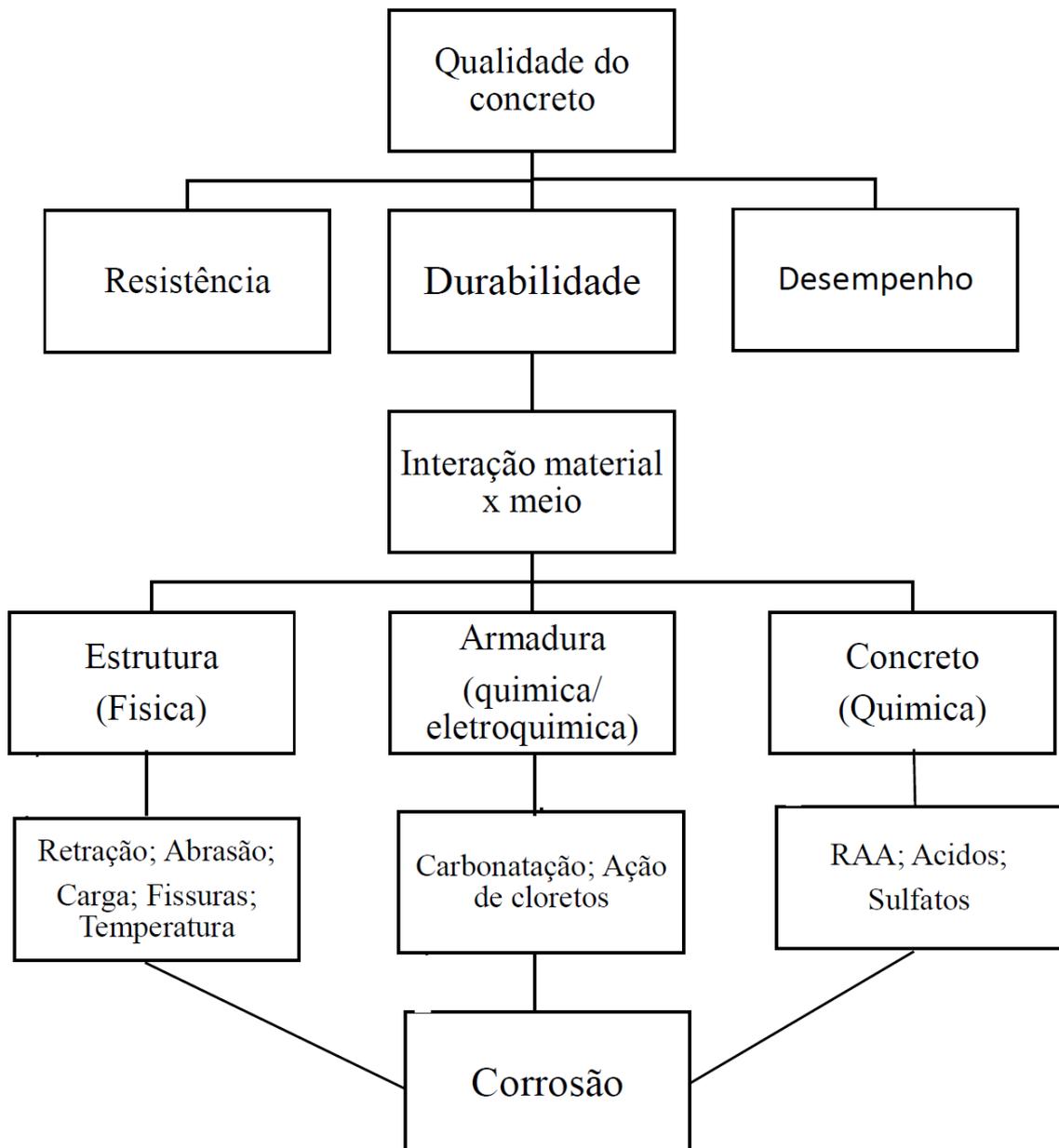
Martins *et al.* (2019) utilizaram AEF em concreto convencional com substituição da areia natural 10, 20, 30, 40 e 50%, em peso. Foram analisadas as propriedades mecânicas de resistência à compressão e tração por compressão diametral e a absorção por imersão de água. Os autores concluíram que, aos 28 dias e até 40% de substituição, as propriedades foram melhoradas. Com 50% de substituição, tais propriedades começaram a reduzir; porém, apresentaram resultados melhores que as do concreto referência.

2.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CONCRETO

De acordo com Medeiros, Andrade, Helene (2011), a resistência das estruturas de concreto à ação do meio ambiente e ao uso dependerá da resistência do concreto, da resistência da armadura e da resistência da estrutura, sendo que a deterioração de um comprometerá a estrutura como um todo. Para melhor avaliar a durabilidade da estrutura, é necessário conhecer e classificar a agressividade do ambiente e os mecanismos de transporte de líquidos e gases nos meios porosos como o concreto. É indispensável o discernimento entre os ambientes preponderantemente agressivos à armadura daqueles preponderantemente agressivos ao concreto, assim como identificar detalhes estruturais que aumentem a resistência da estrutura

e, conseqüentemente, majorem a sua vida útil. Os principais agentes agressivos à armadura, como o gás carbônico e os íons de cloreto, não são agressivos ao concreto, ou seja, não o atacam deletériamente. Por outro lado, os agentes agressivos ao concreto, como as chuvas ácidas, podem danificar o concreto de cobrimento e facilitar a ação do gás carbônico e dos cloretos sobre as armaduras. A Figura 14 contém a representação esquemática da avaliação da qualidade do concreto de acordo com a durabilidade em relação à estrutura, à armadura e ao concreto endurecido, além dos mecanismos de deterioração e transporte, que provocam a corrosão na estrutura.

Figura 14: Qualidade do concreto: durabilidade, mecanismos de deterioração e transporte



2.3.1 Durabilidade e vida útil do concreto

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade pode ser definida como a capacidade da estrutura em resistir às influências ambientais consideradas no projeto, ou seja, a durabilidade é resultado da interação entre a estrutura, o meio, a forma de uso e manutenção (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011). O concreto é considerado durável quando desempenha as funções a que lhe foram destinadas, mantendo a resistência durante um período de tempo. Esse fator depende de alguns parâmetros, como: características da construção, agressividade ambiental, critérios de desempenho desejados e do tempo, ou seja, a vida útil requerida (RIBEIRO, 2014). A durabilidade também depende das características do concreto e da espessura do cobrimento da armadura (ALMEIDA; SALES, 2014). A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) divide as classes de agressividade de acordo com o meio e indica o risco de deterioração da estrutura. Em conformidade com esses dados, a norma determina os parâmetros mínimos da relação a/c e a classe do concreto (TABELA 6).

Tabela 6: Classe de agressividade e correspondência com qualidade do concreto e cobrimento

Classe de agressividade	I	II	III	IV
Agressividade	Fraca	Moderada	Forte	Muito forte
Tipo de ambiente	Rural/submerso	Urbano	Marinho/Indust.	Industrial
Risco de deterioração	Insignificante	Pequeno	Grande	Elevado
Relação a/c	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe do concreto	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
Cobrimento para laje	20 mm	25 mm	35 mm	45 mm
Cobrimento viga/pilar	25 mm	30 mm	40 mm	50 mm

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118 (2014)

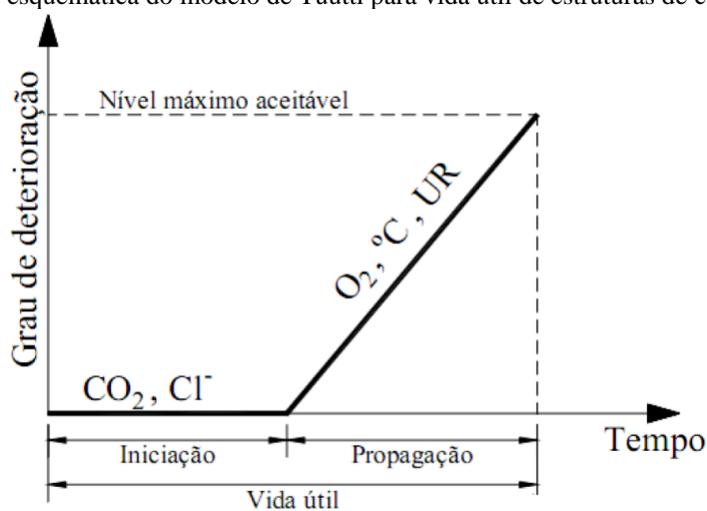
A deterioração pode ser causada por agentes externos ou internos do concreto e está ligada à permeabilidade, ou seja, à facilidade com que os líquidos ou gases se movimentam no material (SOARES; VASCONCELOS; NASCIMENTO, 2015). Isso ocasiona o aumento de consumo de matérias-primas, aumento na produção de resíduo, gastos de energia e custos com reparos, renovação e manutenção das construções (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

A vida útil do concreto é o período de tempo no qual as características das estruturas são mantidas sem intervenções significativas, quando atendidos os requisitos de uso previstos pelo projetista e construtor (ABNT, 2014). A necessidade de se estudar as diversas condições ambientais que podem reduzir a durabilidade de uma estrutura é o fato de que a vida útil está ligada à sua capacidade de resistir ao meio em que está inserido (SOARES; VASCONCELOS;

NASCIMENTO, 2015). Sendo assim, o aumento da vida útil representa a preservação de recursos naturais, redução de impactos ambientais e economia de energia (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Com o objetivo de melhorar a compreensão dos mecanismos de degradação, foram criados modelos com a finalidade de prever a vida útil de estruturas de concreto. Ribeiro (2014) apresentou o modelo de Tuutti para avaliar a vida útil de uma estrutura que está sofrendo corrosão, em que considerou que a vida útil de uma estrutura de concreto armado seja dividida em dois períodos: iniciação da corrosão e propagação (FIGURA 15).

Figura 15: Representação esquemática do modelo de Tuutti para vida útil de estruturas de concreto armado.



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2014)

O período de iniciação é definido como o tempo em que os agentes agressivos, principalmente o CO_2 e os íons de cloreto, levam para atravessar o cobrimento, alcançar as armaduras e provocar a despassivação. Nesse período, os danos são imperceptíveis. Por sua vez, o período de propagação foi definido como a fase na qual ocorre a formação de óxidos e, conseqüentemente, a redução da seção das armaduras, além de aparecimento de fissuras, o que causa a aceleração do processo de deterioração (RIBEIRO, 2014). Esse período é acelerado pela presença de O_2 , aumento de temperatura e da umidade relativa no interior dos poros.

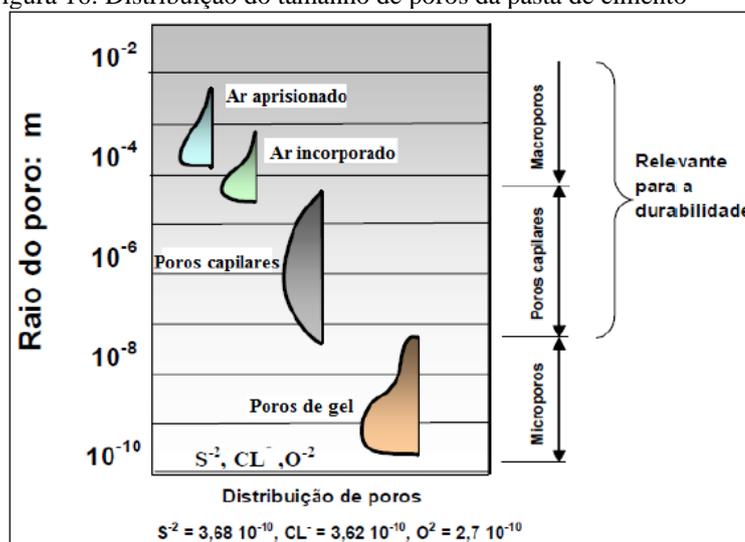
2.3.2 Mecanismos de Transporte dos agentes deletérios

É essencial compreender os fatores que afetam ou causam a deterioração das estruturas de concreto a fim de melhorar a sua durabilidade (ALMEIDA; SALES, 2014).

Os mecanismos de deterioração são causados pelo movimento dos fluidos através dos poros na microestrutura do concreto, portanto, é importante conhecer a natureza e as características dos poros no concreto endurecido (WINSLOW; LIU, 1990). Os vazios na estrutura do concreto são formados devido à evaporação da água de amassamento que excede a quantidade necessária para a hidratação do cimento e ao ar incorporado durante o processo de mistura (RIBEIRO, 2014).

Mehta e Monteiro (2014) dividem os poros de acordo com o tamanho em 2 grupos: macroporos e microporos. Em função de sua formação, os poros na pasta de cimento são classificados em poros de ar (adensamento), poros de ar incorporado (aditivos), poros capilares (saída de água livre) e poros de gel (água de gel), como representados na Figura 16.

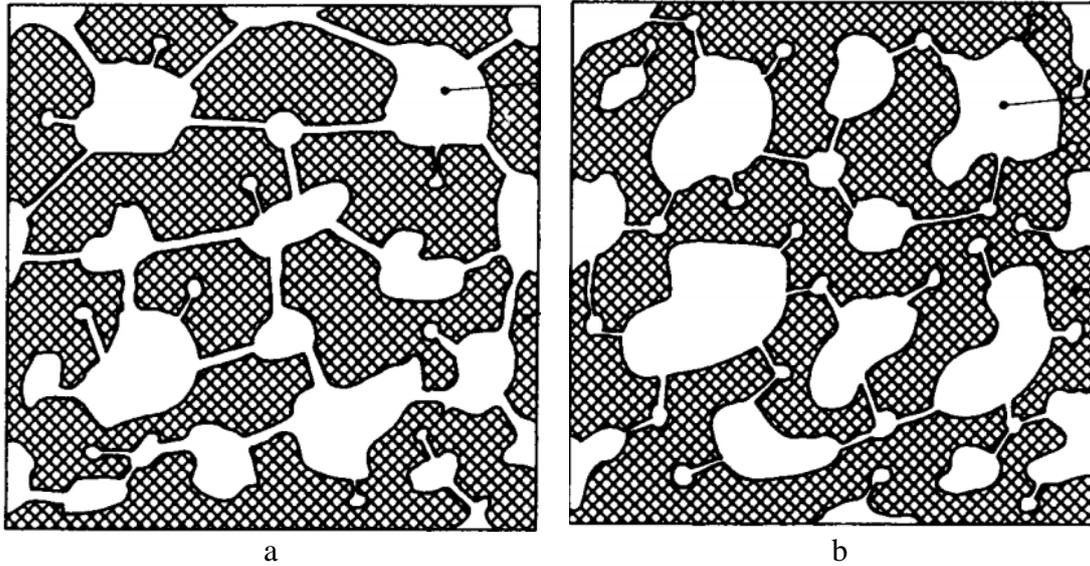
Figura 16: Distribuição do tamanho de poros da pasta de cimento



Fonte: Cascudo, 1997

Os poros capilares, que, geralmente são interligados, são os principais responsáveis pela entrada de agentes agressivos no concreto (RIBEIRO, 2014). Poros contínuos são favoráveis à permeabilidade, enquanto poros descontínuos, com água adsorvida e com aberturas muito estreitas, não afetam o transporte de líquidos (FIGURA 17). Embora o concreto seja um composto formado por pasta de cimento com agregados, a porosidade dos agregados é muito baixa e os poros não são interconectados; todavia, é o nível de percolação dos poros da pasta de cimento e da zona de transição que definem o caminho do movimento dos fluidos (KANELLOPOULOS; PETROU; IOANNOU, 2012).

Figura 17: Representação esquemática dos poros a) Poros capilares interconectados por grandes aberturas b) poros segmentados e parcialmente conectados



Fonte: Neville (2013)

A zona de transição, interface entre argamassa e agregado graúdo (FIGURA 18), é mais propícia a desenvolver microfissuras. Esse fato ocorre por causa da concentração de tensões em consequência da diferença do módulo de elasticidade entre pasta e agregados (NEVILLE; BROOKS, 2013, METHA; MONTEIRO, 2014).

Figura 18: Destaque da Zona de transição entre argamassa e agregado graúdo



Fonte: acervo do próprio autor

Devido à maior quantidade de pasta, o CAA, quando comparado ao CCV, é mais suscetível a sofrer fissuras na idade avançada pois ocorre fissuração relacionada à reação da pasta de cimento e evaporação da água (BARLUENGA; PUENTES; PALOMAR, 2015).

Os agentes deletérios atingem as estruturas de concreto pelos seguintes mecanismos de transporte: absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade e migração iônica. O transporte depende da interconexão e distribuição de tamanho dos poros. Os poros maiores que $0,1\mu\text{m}$ contribuem para difusão, migração, capilaridade e permeabilidade e poros maiores influenciam na difusão gasosa e migração iônica (RIBEIRO, 2014).

2.3.2.1 Absorção

A absorção é um parâmetro fundamental que controla o transporte de líquidos em materiais porosos e portanto um indicador de durabilidade (KANELLOPOULOS; PETROU; IOANNOU, 2012).

Absorção é o processo no qual a penetração do líquido nos poros ocorre por sucção, devido às tensões capilares quando em contato com o líquido. Depende da porosidade aberta com poros interconectados entre si, permitindo o transporte do líquido para o interior do concreto e do grau de saturação do concreto, pois, em concreto saturado, não ocorre absorção (RIBEIRO, 2014).

2.3.2.2 Difusão iônica

É o movimento espontâneo de íons no interior do concreto, em meio aquoso ou gasoso, devido à diferença de gradiente de concentração, em que as substâncias tendem a igualar as concentrações (RIBEIRO, 2014). Além de ser o mecanismo de transporte dos principais agentes agressivos à corrosão de armaduras: o CO_2 e os íons de cloreto, também transportam o Oxigênio (O_2) (SANTOS, 2006). O coeficiente de difusão depende da porosidade, relação a/c, teor de cimento, composição química do cimento, umidade relativa e temperatura (HELENE, 1999). A taxa de difusão para pasta de cimento saturadas é da ordem $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (ROSEMBERG *et al.*, 1989).

2.3.2.3 Permeabilidade

A permeabilidade é definida como o fluxo de fluidos e caracterizada pela facilidade na qual os líquidos ou gases podem atravessar através do concreto sob uma diferença de pressão, sendo governada pela porosidade da pasta de cimento, que depende da relação a/c e idade do concreto. No entanto, a permeabilidade não é simplesmente função da distribuição do tamanho dos poros, mas também da conectividade entre eles. O fator a/c é essencial para o concreto ter baixa permeabilidade ($a/c \leq 0,5$); porém, isso não é suficiente, o concreto deve ser denso e, para isso, devem ser usados agregados bem graduados (NEVILLE; BROOKS, 2013). Esse mecanismo é mais susceptível aos líquidos do que aos gases (RIBEIRO, 2014).

2.3.2.4 Migração

O processo de migração ocorre quando existe uma diferença de potencial (ddp) elétrico que provoque o deslocamento dos íons a fim de neutralizar esta ddp. A entrada do cloreto ocorre por migração dos íons (Cl^-) devido à tensão diferencial (RIBEIRO, 2014).

2.3.3 Principais meios de deterioração do concreto

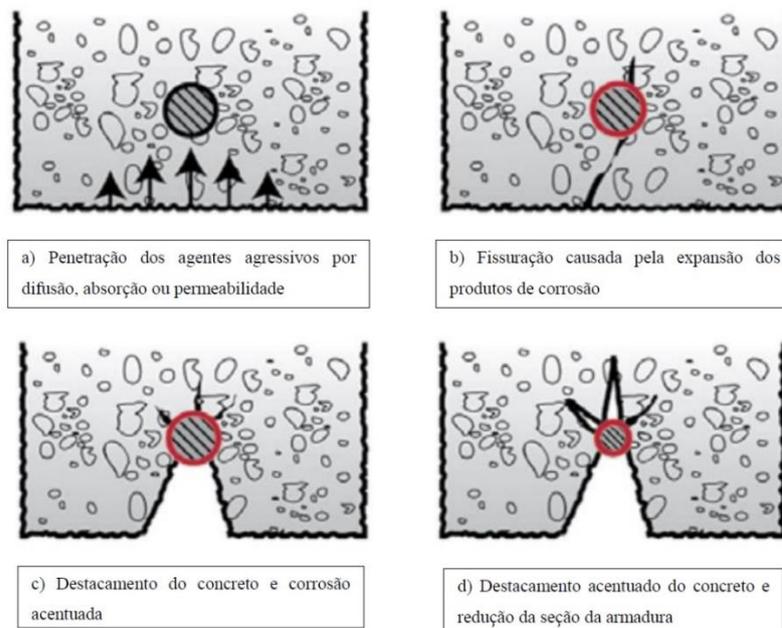
Segundo Almeida, Sales (2014), é de grande importância que sejam conhecidas as influências e os efeitos que a ação do meio ambiente provocam na estrutura. Algumas considerações devem ser feitas durante o projeto, tais como: a agressividade ambiental, a espessura do cobrimento da armadura, a classe do concreto e até o tipo de cimento que deve ser usado como determina a NBR 6118 (ABNT, 2014).

As ações do meio ambiente sobre as estruturas de concreto podem ser devido a agentes químicos, físicos e biológicos. O processo de deterioração do concreto provocado pela ação de agentes químicos geralmente envolve interações químicas entre agentes agressivos do meio e os componentes da pasta de cimento, ou, ainda, quando o ambiente causa a redução da alcalinidade dos poros, provocando a desestabilização dos produtos de hidratação do cimento. Os agentes físicos, como a cristalização dos sais nos poros, carregamento estrutural, exposição a temperaturas extremas de congelamento e aquecimento, abrasão ou erosão podem causar fissuração e desgaste superficial (METHA; MONTEIRO, 2014). Os agentes biológicos provocam a biodegradação das estruturas pela ação de micro-organismos, bactérias e fungos. Na realidade, a deterioração das estruturas é consequência das ações simultâneas dos processos químicos, físicos e biológicos. Conforme definido anteriormente, neste trabalho, são estudados

apenas os processos de deterioração causados por agentes químicos, os quais podem ou não envolver os constituintes da pasta de cimento (ALMEIDA; SALES, 2014).

Na pasta de cimento hidratada, a fase sólida é composta por hidratos de cálcio insolúveis, como: o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio (C-H) e a etringita (C-A-S-H) que se encontram em equilíbrio com a solução alcalina dos poros, ou seja, com pH entre 12,5 e 13,5. Desse modo, o ambiente é considerado agressivo quando pode causar a redução da alcalinidade dos poros, desestabilizando os produtos de hidratação do cimento. Além disso, os ataques químicos também se manifestam por meio de efeito físico, como o aumento da porosidade e permeabilidade, diminuição da resistência, fissuração e lascamento (ALMEIDA; SALES, 2014, METHA; MONTEIRO, 2014). No caso das armaduras do concreto a agressividade do ambiente provoca a deterioração quando destrói a camada de proteção, conforme a Figura 19.

Figura 19: Representação esquemática da evolução da deterioração da estrutura de concreto



Fonte: Adaptado de Helene (1999)

Um resumo dos principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado e suas consequências sobre a estrutura é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Principais mecanismos de deterioração do concreto

Agressividade ambiental		Consequências sobre a estrutura	
Processo	Condições	Alterações iniciais	Efeitos a longo prazo
Concentração salina, íons de Cloreto	Atmosfera marinha e industrial	Imperceptível	Despassivação e corrosão da armadura
Carbonatação	UR 80% a 85%	Imperceptível	Redução do pH, início da corrosão
Ácidos (Lixiviação)	Atmosfera ácida e águas contaminadas	Manchas brancas	Formação de Sais solúveis, Redução da alcalinidade, despassivação da armadura
Sulfatos	Águas contaminadas	Fissuras	Expansão/fissuração e desagregação do concreto
RAA	Composição do concreto e umidade	Fissuras	Expansão/fissuração e perda de resistência

Fonte: Adaptado de Medeiros *et al.* (2011)

A seguir, estão destacados alguns principais agentes que causam degradação química os quais serão avaliados nesta pesquisa:

2.3.3.1 Ação dos íons de cloreto

Os íons de cloreto são os principais agentes causadores da corrosão das armaduras. No concreto, o cloreto pode se apresentar de três formas: no aluminato tricálcico (C_3A), nos clooroaluminatos de cálcio ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) adsorvidos nas superfícies dos poros e sob a forma de íons de cloreto (Cl^-) livres na solução contida nos poros. Apesar de estarem em equilíbrio, sempre haverá teor de cloreto na fase líquida do concreto que potencializa o processo corrosivo (CASCUDO, 1997; HELENE, 1999). Além disso, os sais de cloreto são encontrados nos agregados provenientes da região marinha, em águas contaminadas, salmouras industriais, sais de degelo, aditivos aceleradores de pega e produtos de limpeza, os quais podem penetrar na estrutura devido à porosidade e permeabilidade do concreto. Mesmo em condições normais do concreto de pH elevado, esses íons podem despassivar as armaduras (BERTOLINI, 2010). Os cloretos penetram na microestrutura do concreto por três mecanismos distintos: transporte de solução aquosa, difusão e absorção. Quando os poros estão saturados de água, os cloretos penetram por difusão devido ao gradiente de concentração. No entanto, em concretos com poros secos ou parcialmente saturados, os cloretos penetram por absorção capilar (PAGE *et al.*, 1981).

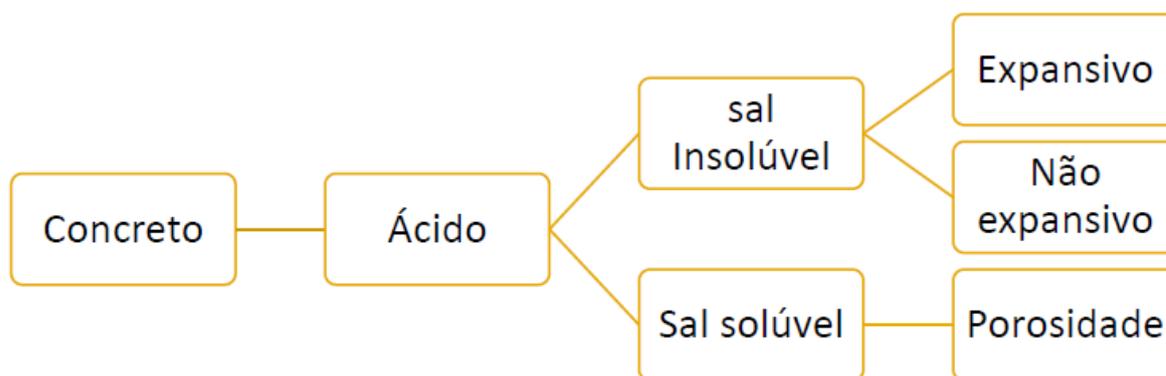
O cloreto de sódio aumenta a condutividade elétrica que é fundamental no mecanismo eletroquímico da corrosão. A quantidade de íons necessária para despassivar a armadura está relacionada com a concentração de íons hidróxido presente nos poros. Se a concentração de íons de cloreto excede em 0,6 a concentração de hidróxido, ou $Cl^-/OH^- \leq 0,6$, ocorre a dissolução da camada passivadora (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A incorporação de agregados finos e adições minerais colaboram para a diminuição na distribuição do volume de poros, dificultando a difusão e reduzindo significativamente a penetração destes íons (ALMEIDA; SALES, 2014; YAZIGI, 2008).

2.3.3.2 Ataque ácido

O ataque por soluções ácidas também provoca a redução da alcalinidade do concreto e causa a despassivação da armadura, facilitando o processo corrosivo. Isso acontece devido à formação de sais solúveis de cálcio que podem ser lixiviados, aumentando a porosidade e permeabilidade (ALMEIDA; SALES, 2014) ou pela formação de soluções insolúveis que são removidas por erosão ou abrasão (MEHTA; MONTEIRO, 2014) como representado na Figura 20.

Figura 20: Esquema da ação do ácido no concreto



Fonte: Próprio autor

A agressividade das soluções ácidas depende do tipo de sais formados e da solubilidade iônica. Quanto maior a solubilidade, maior a agressividade. A norma DIN 4030:1991 mostra que é possível relacionar o pH dos ácidos com o grau do ataque no concreto (RIBEIRO; CUNHA, 2014) conforme indicado na Tabela 7.

Tabela 7: Relação entre o pH e o grau de ataque ao concreto

Grau de ataque do concreto	pH do ácido
Fraco	6,5 a 5,5
Forte	5,5 a 4,5
Muito forte	< 4,5

Fonte: Norma DIN 4030: 1991 *apud* Ribeiro et al. (2014)

As soluções ácidas são provenientes de águas contaminadas com dejetos industriais ou até de gases nocivos em presença da umidade. Destacam-se os ácidos clorídrico, sulfúrico e nítrico entre outros (ALMEIDA; SALES, 2014).

Segundo Beddoe (2016), a taxa de degradação causada pela ação do ácido é controlada principalmente pela difusão do ácido, através de camadas mais superficiais, aumentando sua porosidade. A distribuição granulométrica do agregado no concreto próximo à superfície determina a fração volumétrica da pasta de cimento endurecida e, portanto, o cálcio solúvel. O agregado solúvel produz poros facilitando o transporte dos agentes para o interior do concreto. Se as camadas internas forem mais estáveis, podem atuar como protetoras e, com isso, a desestabilização da pasta diminui.

2.3.3.3 Ataque por sulfatos

Presente em águas e solos contaminados, os sulfatos, quando penetram no concreto, reagem com os componentes da matriz de cimento, gerando produtos expansivos e provocam tensões internas, causando fissuração e desagregação do concreto. Nos solos, o sulfato se apresenta na forma de gipsita ou sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Nas águas subterrâneas, as maiores concentrações são de sulfato de magnésio, sódio e potássio. Em terras onde se cultiva agricultura, podem ser encontrados o sulfato de amônia (METHA; MONTEIRO, 2014). O sulfato de magnésio é o que tem efeito mais agravante, pois também ataca os silicatos hidratados de cálcio responsáveis pela resistência do concreto (BERTOLINI, 2010). O ataque aos sulfatos pode ocorrer em três fases na estrutura do concreto:

- 1°. Pela penetração dos íons sulfato na matriz de cimento;
- 2°. Pela reação dos sulfatos com o hidróxido de cálcio formando a gipsita;
- 3°. Reação do gesso com os aluminatos resultando produtos expansivos como a etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), que, segundo Bertolini (2010), é a reação mais perigosa.

Para evitar a ação dos sulfatos, o concreto deve ter baixa permeabilidade obtida pela baixa relação a/c, ou utilizar cimentos pozolânicos, resistentes aos sulfatos NBR 16697 (ABNT, 2018), com baixo teor de C₃A ou com sílica ativa, cinzas volantes (ABCP, 2012).

Outra forma de minimizar é com o estudo e devida aplicação dos diversos tipos de cimento no concreto. No cimento Portland comum, a ocorrência de corrosão de armadura por cloreto é bem pequena. O mesmo observa-se no uso de cimento com escória (ou cimento Portland pozolânico), pois o mesmo restringe a mobilidade dos íons cloretos na pasta de cimento hidratado. Já o uso de cimentos resistentes a sulfatos (que tem baixo teor de C₃A) pode aumentar o risco de corrosão por cloretos pois o Aluminato de Cálcio reage com os cloretos e forma o Cloroaluminatos de Cálcio (NEVILLE, 2013).

A deterioração devido ao ataque por sulfatos ocorre em dois estágios. Inicialmente pela difusão de sulfatos na matriz que é um processo lento e depende da porosidade do concreto. Em seguida, ocorre uma reação química entre os compostos hidratados da pasta e os íons sulfato, quando a degradação ocorre de forma rápida (CALLEJA, 1980).

Uysal, Sumer (2011) avaliaram as propriedades do CAA, substituindo parte do cimento ora por cinzas volantes (CV), ou Escória Granulada de Alto forno (EGAF), ou Pó de Calcário, Pó de basalto ou Pó de Mármore. Foram investigadas a influência dessas adições na trabalhabilidade, densidade, resistência à compressão, velocidade de pulso ultrassônico (VPU) e resistência aos sulfatos. Os testes de resistência aos sulfatos foram realizados por meio da imersão dos corpos de prova em solução de MgSO₄ (10%) e Na₂SO₄ (10%) por 400 dias. As misturas com CV e EGAF tiveram a trabalhabilidade e a resistência aumentadas. Os aditivos minerais causaram efeitos benéficos em relação aos sulfatos.

Sadek *et al.* (2016) utilizaram RCMG como adição mineral em CAA. Foram avaliadas as propriedades no estado fresco pelo *Slump flow*, Funil V e Anel J e, no estado endurecido, as resistências a compressão, tração e flexão, além da absorção e resistência aos sulfatos. A mistura ternária com cimento (400 kg/m³), sílica ativa (40%) e RCMG (40%) foi a que apresentou melhores resultados de resistência e durabilidade, superiores ao concreto controle sem sílica ativa e RCMG e com Cimento (400 kg/m³). Após 8 meses em solução de MgSO₄, os corpos de prova foram testados com relação à resistência à compressão; o concreto, com 50% de RCMG, teve melhor desempenho que o concreto controle. Os autores citam que o uso de pós residuais como aditivos minerais no CAA melhora suas propriedades físicas, mecânicas e propriedades relacionadas à durabilidade comparado com a mistura de controle com o mesmo teor de cimento.

Ranjbar *et al.* (2016) produziram CAA com a incorporação de cinzas de óleo de palma a 10, 15 e 20%, em peso, do cimento. Foram avaliados as propriedades mecânicas e o potencial de durabilidade por ataque com ácido e sulfato. Observou-se que a incorporação cinza de combustível de óleo de palma em concreto autoadensável melhorou a resistência aos ácidos e sulfatos, reduziu a retração por secagem e a absorção de água, sem efeito adverso na resistência à compressão final. A incorporação do resíduo reduziu a quantidade de portlandita no sistema, deixando a matriz mais densa com redução da porosidade.

Tennich *et al.* (2017) analisaram diferentes misturas de CAA com resíduo de mármore e azulejos, em relação à durabilidade, quando expostos a ambientes agressivos, como água do mar e sulfatos. O efeito *filler* dos resíduos teve resultado positivo na durabilidade devido ao aumento da compacidade e redução da interconexão dos poros e consequente redução à penetração de agentes agressivos ao concreto.

2.4 CORROSÃO DAS ARMADURAS

Quando se fala em corrosão no concreto; porém, na realidade, a corrosão ocorre nas barras de aço inseridas no concreto. Quanto melhor a qualidade do concreto que envolve a armadura, melhor a proteção desta. A corrosão em armaduras é a terceira patologia de maior incidência nas estruturas de concreto depois das fissuras e excesso de deformação. Pode causar acidentes fatais, além do alto custo para recuperação (SOARES *et al.*, 2015)

A corrosão ocorre quando o concreto é permeável, de forma a permitir a penetração de íons juntamente com a água e oxigênio ou pela perda do revestimento de proteção. O revestimento deve levar em conta o meio em que será aplicado o concreto. Por essa razão, é imprescindível que o concreto seja capaz de suportar as condições de projeto (SOARES *et al.*, 2015).

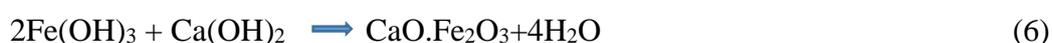
Esse fenômeno pode ser definido como a transformação de um metal em íon metálico seja por interação química ou eletroquímica com o meio, associadas às propriedades físicas ou mecânicas. Na primeira, também chamada de corrosão seca, a oxidação ocorre pela reação gás/metal com a formação de uma película de óxido, não provoca deterioração substancial na superfície do metal, exceto quando se tratar de um gás muito agressivo. A segunda ocorre em meio aquoso formando uma pilha ou célula de corrosão. É conhecida como corrosão aquosa, sendo a principal causa dos problemas em obras civis (SOUZA, 2014).

A corrosão eletroquímica ocorre com maior frequência especialmente quando o concreto tem contato com a água, sendo caracterizada por um fluxo de elétrons e íons entre uma região anódica e catódica. As regiões anódica e catódica formam a pilha eletroquímica e,

dependendo da temperatura e do pH do meio, vários óxidos e hidróxidos podem ser formados. Os mais comuns são óxido de ferro II ou ferroso (FeO), óxidos de ferro III ou férrico (Fe_2O_3 , Fe_3O_4), os hidróxidos de ferro II ou ferroso ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), hidróxido de ferro III ou férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$ e hidróxido férrico hidratado ($\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). O resultado da corrosão, o Fe_2O_3 hidratado, conhecido como ferrugem, ocupa um volume 6 a 7 vezes maior que o volume do aço e exerce pressão sobre o concreto, causando fissuras e desprendimento da camada do concreto (SOUZA, 2014).

2.4.1 Proteção química e física

A proteção baseia-se no impedimento de formação de células eletroquímicas, por meio de proteção física ou química. A proteção física se dá pelo revestimento exigido no projeto ou pelo uso de revestimento com tinta protetora, como o zarcão, ou tintas à base de polímeros, para impedir o contato do oxigênio do ar com o ferro. A proteção química é feita por camada na superfície, chamada de camada apassivadora, que é uma película muito espessa da ordem de 10^{-3} a 10^{-1} μm (LOURENÇO; SOUZA, 2014). Conforme Helene (1986), a película de passivação pode ser resultado de combinação da ferrugem superficial, hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formando o ferrato de cálcio, conforme Equação 6.



Enquanto a armadura estiver passivada, não ocorrerá corrosão, pois a película impede o acesso de umidade, do oxigênio e de agentes agressivos à superfície do aço. No entanto, essa película pode ser perdida quando houver grande quantidade de íons de cloreto provenientes ou do meio externo ou da água de amassamento, ou, ainda, dos agregados. Também pode ser perdida quando ocorrer a diminuição da alcalinidade do concreto devido a reações de carbonatação ou penetração de substâncias ácidas no concreto. (ROSEMBERG *et al.*, 1989).

Nas primeiras idades, a alcalinidade deve-se à solução saturada de hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, resultante da hidratação do cimento. Nas idades mais avançadas, a alcalinidade provem de uma solução composta por hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) (MIRANDA *et al.*, 1990).

2.4.2 Fatores que influenciam na corrosão das armaduras

Cascudo (1997) cita alguns fatores e características do concreto ligadas à corrosão:

- 1- Cobrimento: camada de concreto sobre a armadura (proteção física);

- 2- Temperatura: o aumento de temperatura majora a velocidade de corrosão e mobilidade iônica. Por sua vez, a diminuição da temperatura acarreta na condensação e no aumento de umidade;
- 3- Tipo de cimento e adições: cimentos com adições de escória de alto forno, cinzas volantes ou sílica ativa formam estruturas mais compactas, o que dificulta a penetração de líquidos, gases e íons; no entanto, facilitam a carbonatação;
- 4- Tipo de aço: aços mais processados na fabricação, tratamento a frio como encruamento ou trefilação, ou aços com maiores teores de carbono são mais suscetíveis a desenvolver corrosão;
- 5- Fissuração: fissuras menores que 0,4 mm não interferem significativamente na intensidade de corrosão;
- 6- Água /cimento: um dos parâmetros mais importantes, pois essa relação determina a qualidade do concreto e define a compactidade ou porosidade da pasta de cimento endurecida. Quanto menor a relação a/c, menor volume de poros e permeabilidade;
- 7- Permeabilidade e absorção: quanto maior índice permeabilidade e absorção, menor qualidade do concreto;
- 8- Resistividade: é um parâmetro que depende do teor de umidade, da permeabilidade e do grau de ionização do eletrólito. A velocidade de corrosão ocorre em concreto com alto teor de umidade (baixa resistividade) porém sem saturação dos poros.

2.4.3 Técnicas de análise do concreto e monitoramento quanto à possibilidade de corrosão

Dentre as técnicas de análise das estruturas de concreto, destacam-se a análise visual, atentando para presença de fissuras e manchas; o método gravimétrico que visa a quantificar a perda de massa devido ao processo corrosivo e os métodos eletroquímicos que são muito importantes para avaliar a corrosão das armaduras (CASCUDO, 1997).

O emprego destas técnicas é essencial para controle e prevenção do processo corrosivo, pois permitem um diagnóstico precoce, o que acarreta em redução de custos para recuperação de estruturas (CASCUDO, 1997). As técnicas comumente utilizadas são:

1. Ensaio de migração ou difusão de íons de cloreto;
2. Profundidade de carbonatação;
3. Resistividade elétrica;
4. Potenciais de corrosão;
5. Resistência de polarização;

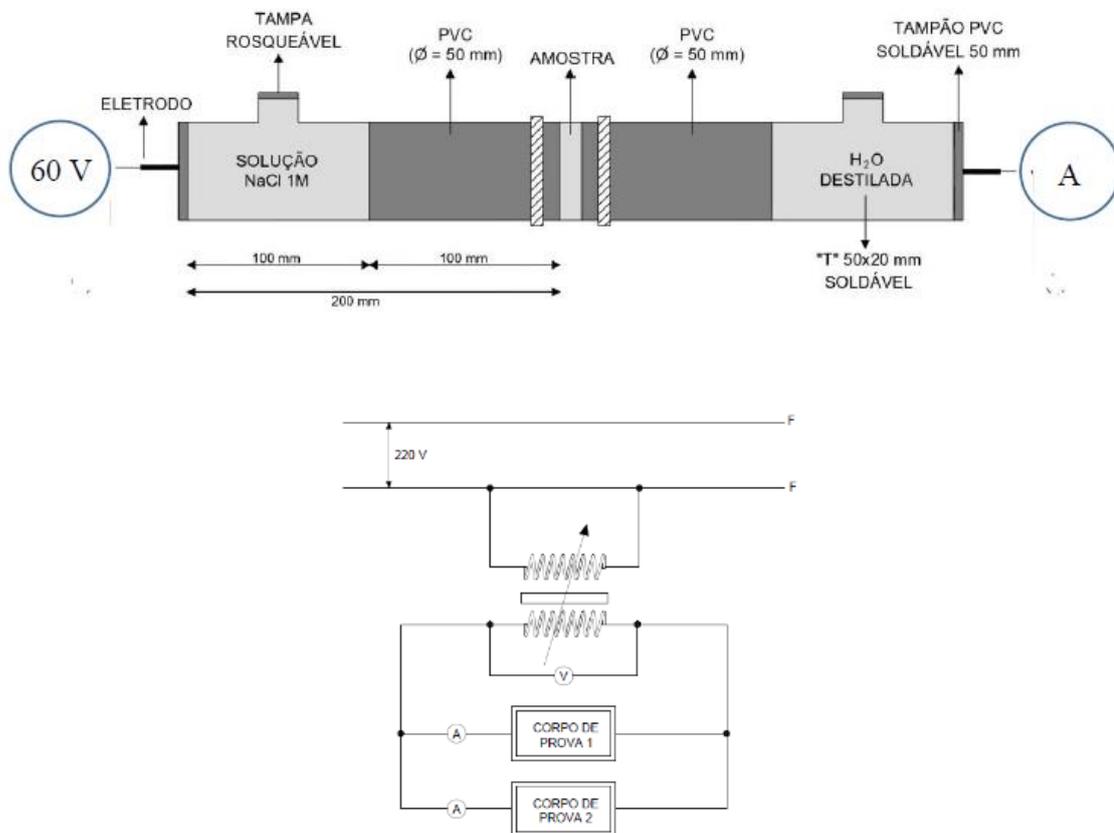
6. Ultrassom.

Dentre essas técnicas, serão esplanadas apenas as empregadas nesta pesquisa: difusão de íons de cloreto, resistividade elétrica e potencial de corrosão.

2.4.3.1 Difusão de íons de cloreto

O teste de penetração rápida de cloretos relaciona os íons que passam por uma fatia de concreto com a capacidade do concreto de resistir aos agentes agressivos à armadura. Este envolve os quatro mecanismos de transporte: permeabilidade, difusão, absorção e migração. O ensaio é realizado de forma acelerada com a aplicação de tensão para forçar o fluxo de íons. O equipamento utilizado, uma adaptação da norma ASTM C1202 (ASTM, 2019) baseado na proposta de Ribeiro e Cunha (2014), e o esquema elétrico estão mostrados na Figura 21.

Figura 21: (a) Esquema do equipamento pra ensaio de passagem de íons de cloreto e (b) esquema elétrico.



Fonte: Próprio autor

A medição é feita pela carga elétrica que, por sua vez, é calculada pela corrente elétrica medida a cada 30 min., durante 6h, como na Equação 7.

$$Q = I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360} \quad (7)$$

Onde: Q = carga elétrica passante em Coulomb; I_0 = corrente que passa assim que se inicia o ensaio (A); I_t = corrente que passa no tempo t indicado em min.

Essa equação se aplica para amostras de 95 mm de diâmetro. Para diâmetro diferente de 95 mm, o valor da carga deve ser ajustado como na Equação 8.

$$Q_s = Q_x \cdot (95/x)^2 \quad (8)$$

Sendo: Q_s a carga passante na seção de diâmetro 95mm; Q_x a carga passante na seção de diâmetro x e “x” o diâmetro da seção em mm.

A indicação quantitativa da permeabilidade aos íons de cloreto, baseada nos valores da carga passante medida por este método, está indicada na Tabela 8.

Tabela 8: Penetrabilidade de íons de Cloreto baseado na Carga passante

Carga passante (Coulombs)	Penetração de íons de cloreto
> 4000	Alta
2000 a 4000	Moderada
1000 a 2000	Baixa
100 a 1000	Muito Baixa
< 100	Desprezível

Fonte: Adaptado da ASTM C 1202 (ASTM, 2019)

O ensaio de durabilidade do CAA foi feito com agregado de concreto reciclado em substituição (0%, 50% e 100%) dos agregados graúdos e foi estudada por Kapoor, Singh, Singh (2016). Os autores utilizaram sílica ativa ou metacaulim como substituição de 10% da massa do cimento. O desempenho de durabilidade das misturas foi investigado usando teste de penetração rápida de íons de cloreto, teste de absorção superficial, teste de penetração de água e teste de sucção por capilaridade. As propriedades pioraram quando o agregado graúdo foi substituído por agregado reciclado; no entanto, as perdas das propriedades foram reduzidas quando adicionados a sílica ou metacaulim. Os autores concluíram que o metacaulim foi mais

eficaz que a sílica nas misturas com 50 % de agregado reciclado quanto à redução da penetração aos íons de cloreto e da absorção de água, além de melhorar a resistência à compressão.

Aarthi, Arunachalam (2018) desenvolveram CAA com cinzas volantes (25%), pó de granito (5,10,15 e 20%) em substituição do cimento e fibras de Polipropileno (PP). Foram analisadas a retração e durabilidade por meio dos ensaios de absorção à água, porosidade (28 e 90 dias), resistência ao ácido e sulfatos (28, 90 e 120 dias) e penetração ao cloreto (28 e 90 dias). A retração foi reduzida com o uso das fibras de polipropileno e resíduo de granito. Aos 28 dias houve redução da absorção e da porosidade com até 10% de resíduo de granito e aos 90 dias a redução foi com até 20% do resíduo. A resistência ao ácido foi aumentada demonstrando menor perda de massa e de resistência com o aumento do resíduo. A resistência ao cloreto melhorou com aumento do resíduo em todas as idades. A resistência aos sulfatos foi melhorada em 25,4% com até 20% de substituição do resíduo em relação ao controle.

Singh, Siddique (2016) utilizaram 10% de sílica ativa em relação ao cimento e 10%, 25% e 40% de escória de ferro em substituição da areia. Foram avaliadas a resistência e a durabilidade pelos ensaios de permeabilidade rápida ao cloreto, absorção de água e resistência aos sulfatos. Os autores concluíram que a absorção de água e permeabilidade aos íons de cloreto das misturas com escória foram menores que o controle. Os corpos de prova que sofreram o ataque pelo $MgSO_4$ sofreram perda de 10 e 16% da resistência à compressão aos 90 e 365 dias respectivamente.

Makul (2019) avaliou os efeitos combinados de 30, 50% de areia descartada de fundição, ADF, em substituição da areia e 10, 20% de cinza de casca de arroz, CCA, em substituição do cimento em concreto autoadensável. A durabilidade foi avaliada pela absorção e permeabilidade ao cloreto. O autor concluiu que as amostras do concreto referência apresentaram baixa e muito baixa permeabilidade aos 28 e 180 dias, respectivamente. A amostra com 10% de CCA e 30% ADF apresentou maiores resistência a compressão, tração e flexão e atendeu os requisitos de durabilidade. A amostra com 20% de CCA e 50% de ADF apresentou maior permeabilidade, enquanto a amostra com 10% de CCA e 0% de ADF a menor permeabilidade ao cloreto.

2.4.3.2 Resistividade Elétrica

A propriedade de resistir à passagem de corrente elétrica é chamada de resistividade elétrica. No concreto, essa propriedade está relacionada com a permeabilidade de fluidos, a difusividade de íons de cloreto e, conseqüentemente, a velocidade de corrosão das armaduras

(COSTA; AZZI, 2017). Polder (2001) entre outros verificaram que a resistividade elétrica está relacionada com a microestrutura da matriz do cimento, como a porosidade total, a distribuição do tamanho dos poros e conectividade entre eles, além da condutividade do fluido contido no interior dos poros.

Um valor mais alto de resistividade mostra que o concreto é mais durável, ou com menor probabilidade de sofrer corrosão. O concreto tem a capacidade de conduzir corrente elétrica devido à transferência de íons e quanto mais permeável for o concreto, mais rápido os íons podem se mover através da estrutura (RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2014).

A resistividade elétrica é calculada pela Equação 9, descrita na norma NBR 9204 (ABNT, 2012).

$$\rho = \frac{U}{I} \times \frac{A}{L} \times 100 \quad (\Omega\text{m}) \quad (9)$$

Onde: P = resistividade elétrica (Ωm); U= Tensão (V); I= corrente (mA); A= Área da seção onde é aplicada a tensão (cm^2); L= Distância entre eletrodos ou altura do corpo de prova (cm)

A relação entre a resistividade elétrica e a probabilidade de corrosão está de acordo com o CEB 192 (1989), na Tabela 9.

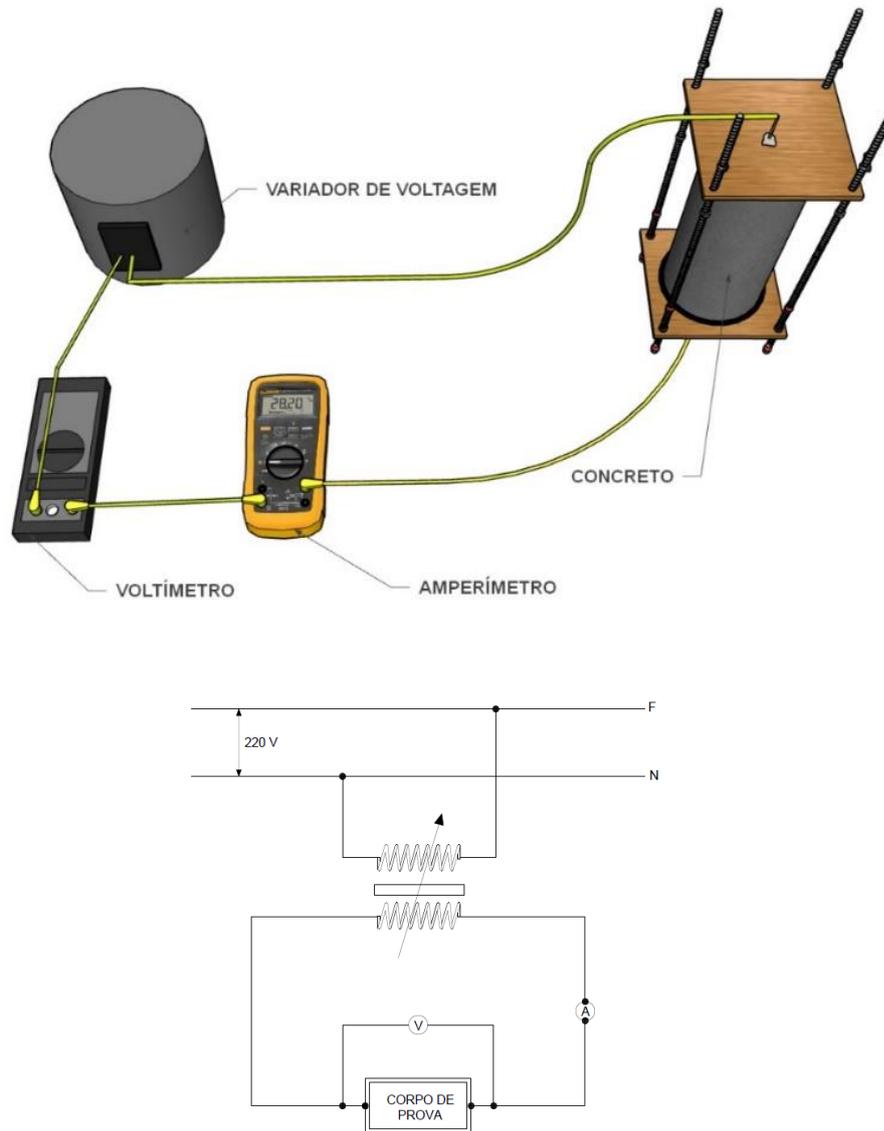
Tabela 9: Relação entre resistividade elétrica e probabilidade de corrosão

Resistividade do concreto	Probabilidade de corrosão
>200 Ohm	Desprezível
100 a 200	Baixa
50 a 100	Alta
<50	Muito alta

Fonte: adaptado de Ribeiro, Cunha (2014)

A resistividade elétrica do concreto foi avaliada por Costa e Azzi (2017). Os autores utilizaram corpo de prova cilíndrico de \varnothing 10 x 20 cm e equipamento sugerido por Lamounier *et al.* (2014), os quais mostram uma adaptação do equipamento determinado pela norma NBR 9204 (ABNT, 2013), conforme a Figura 22, onde utilizaram chapas de cobre como eletrodo substituindo o mercúrio líquido. Além disso, a resistividade foi avaliada na amostra saturada em água.

Figura 22: Desenho ilustrativo do sistema de eletrodos e esquema elétrico para avaliar a resistividade elétrica volumétrica do concreto



Fonte: Próprio autor

As medidas foram realizadas aos 3, 7, 14, 21, 28 e 70 dias e os valores encontrados foram 14,29; 21,26; 38,41; 46,37; 54,70 e 77,75 Ωm respectivamente, o que indica baixa permeabilidade e alta probabilidade de ocorrer corrosão.

Prabhu *et al.* (2015) analisaram a resistividade elétrica do concreto convencional vibrado com a substituição da areia natural por 10, 20, 30, 40 e 50% de areia usada de fundição. Os autores observaram que houve diminuição da resistividade com o aumento do resíduo, no entanto todos os valores foram superiores a 200 Ωm . Este resultado foi justificado devido ao finura da AUF, ter prejudicado a trabalhabilidade da mistura, gerado um material de difícil compactação e com estrutura de poros contínua.

Sadrmomtazi *et al.* (2016) avaliaram os efeitos combinados de resíduos de partículas de polietileno tereftalato (PET) e materiais pozolânicos sobre as propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade do CAA. As taxas de substituição de agregados miúdos foram de 5, 10 e 15% em peso, por PET. Além disso, foi feita a substituição de cimento por 10% de sílica ativa e 30% de cinzas volantes. Foram estudadas as propriedades mecânicas de resistência a compressão, tração, flexão, módulo de elasticidade e a durabilidade através da resistividade elétrica e absorção de água. Os autores concluíram que o resíduo PET diminui a resistência a compressão, tração e flexão, as quais foram melhoradas com adição de materiais pozolânicos. A resistividade elétrica não foi alterada com o resíduo.

Ghoddousi, Saadabadi (2017) avaliaram a resistividade elétrica volumétrica em cubos de 100mm e relacionaram com os produtos da hidratação do cimento do CAA com misturas binárias e ternárias de sílica ativa e metacaulim em substituição parcial do cimento. A mistura de referência continha 450 kg/m³ de cimento e $a/c=0,45$, as misturas binárias eram compostas de 92% cimento + 8% de sílica ativa e 80% de cimento + 20% de metacaulim e a ternária 72% cimento + 8% de sílica ativa + 20% de metacaulim. Aos 28 dias a resistividade elétrica de todas as misturas foi maior que o referência, sendo que a misturas com metacaulim apresentou melhor resultado que com sílica ativa devido ao efeito de reação pozolânica do metacaulim.

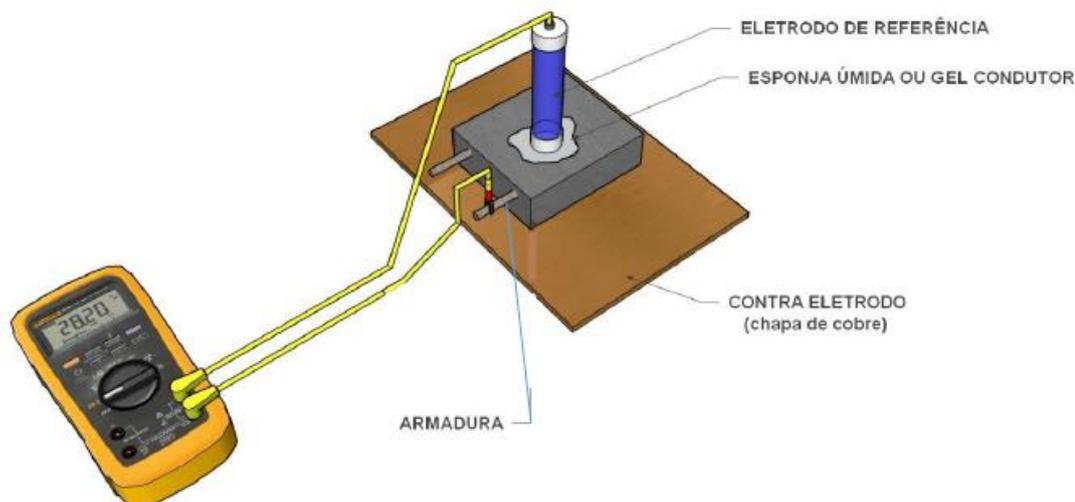
Martins *et al.* (2021a) analisaram a influência da variação das dimensões das amostras na resistividade elétrica volumétrica do CAA. Os autores, *opus cit.*, utilizaram corpos de prova de Ø 50x100mm, Ø 100x100mm, Ø 100x200mm and Ø 150x150mm de uma mesma mistura e equipamento semelhante ao mostrado na Figura 22. Todas as amostras foram classificadas como de baixa probabilidade de corrosão. As diferenças dos resultados entre as amostras não foram significativas.

2.4.3.3 Potencial do eletrodo ou de corrosão

Potencial de eletrodo é a diferença de potencial entre a armadura e o eletrodo de referência a qual determina a medida da maior ou menor facilidade de transferência de carga elétrica entre o aço e a solução contida nos poros do concreto (HANSSON, 1984)

A medida do potencial de Corrosão permite saber se a armadura está no estado passivo ou ativo, por meios da rápida mudança dos valores de potencial. O esquema para leitura da diferença de potencial e critério para avaliação de corrosão, de acordo com a ASTM C 876 (ASTM, 2015), com a utilização do eletrodo referência de cobre-sulfato de cobre (Cu/ CuSO₄ Cu²⁺), estão mostrados na Figura 23 e Tabela 10 respectivamente.

Figura 23: Esquema do ensaio de Potencial de Corrosão



Fonte: Próprio autor

Tabela 10: Relação entre Potencial de Corrosão e probabilidade de corrosão

Tensão (mV)	Probabilidade de corrosão em %
< -350	> 90
> -200	< 10
-200 a -350	Incerta

Fonte: Adaptada da ASTM 876 (ASTM, 2015)

O potencial corrosivo do CAA foi avaliado por (DEHWAH, 2012), que utilizou pó de pedra, sílica ativa ou cinzas volantes em substituição parcial do cimento para a/c de 0,3 e 0,4. As amostras foram testadas quanto à resistência à corrosão, permeabilidade ao cloreto e difusão de íons de cloreto. Os resultados indicaram que o tempo para o início da corrosão da armadura em M4 (8% pó de pedra mais 5% sílica ativa e a/c=0,4) e M2 (8% Pó de pedra e a/c = 0,38) foram superiores às do M5 (30% de sílica ativa e a/c = 0,4). A densidade de corrente de corrosão no aço foi muito baixa na fase inicial de exposição à solução de NaCl a 5% e cresceu com o aumento do período de exposição. Não foi observada a ativação de corrosão nas amostras M2 e M4 mesmo após 2 anos de exposição em solução com 5% NaCl. A permeabilidade ao cloreto nas amostras com pó de pedra ou com cinzas volantes foi moderada, enquanto, na amostra com pó de pedra mais sílica ativa, a permeabilidade foi baixa. A amostra que continha cinzas volantes obteve o pior desempenho em todos os aspectos avaliados. O autor concluiu que o uso de pó de pedra é mais indicado para estruturas expostas ao cloreto, pois, além de ser facilmente encontrado, aumenta a vida útil das estruturas.

Vieira (2003) utilizou o processo de aceleração de corrosão por ciclos alternados de imersão em solução de cloreto de sódio, NaCl 3,5%, por 7 dias e secagem em estufa a 50°C por 14 dias, durante 24 semanas. Ao final de cada ciclo foram realizadas as medidas eletroquímicas do Potencial Corrosivo.

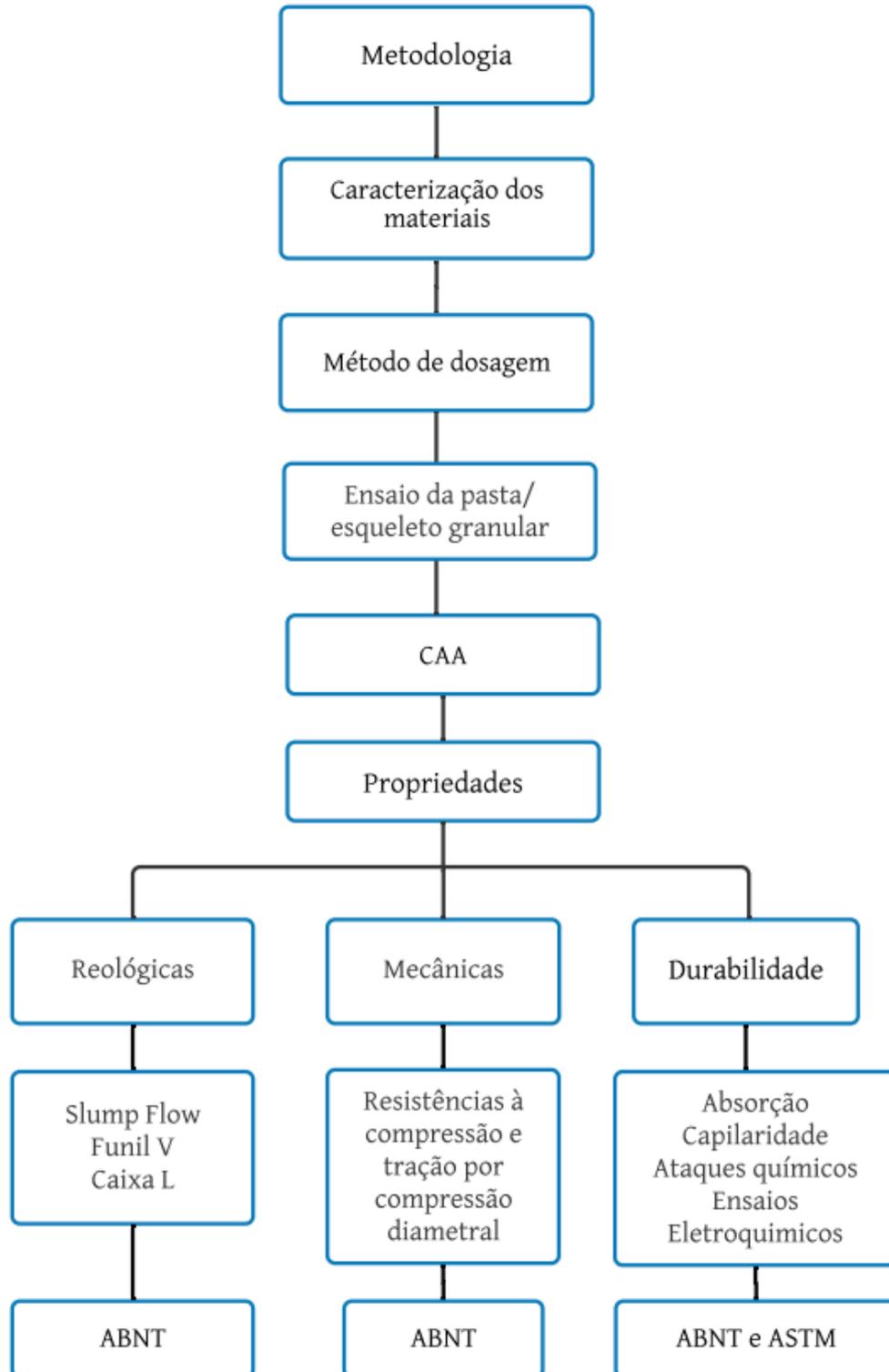
Santos (2006) utilizou a técnica de ensaio acelerado de corrosão por ação de cloretos. O ensaio iniciou 80 dias após a moldagem. Os corpos de prova foram submetidos a semi-ciclos de imersão parcial em solução de NaCl 3% durante 2 dias e semi-ciclos de secagem em estufa a 50° C durante 5 dias. No final de cada semi-ciclo foram medidos o potencial corrosivo e a massa das amostras.

Para concluir sobre a durabilidade do CAA Calado *et al.* (2015) fizeram um estudo comparativo de durabilidade entre CAA e concreto convencional vibrado (CCV). O consumo de cimento para o CAA foi de 419 kg/m³ e para o CCV foi 416 kg/m³, 8,5% de metacaulim e relação a/c 0,45. A durabilidade foi avaliada pelos testes de resistividade elétrica, difusão de íons de cloreto, carbonatação acelerada, absorção por imersão e capilaridade. Os autores verificaram que aos 28 dias a resistividade elétrica do CAA foi 9,1% maior, a difusão de íons de cloreto foi 31,4% menor, a carbonatação acelerada 54,2% menor e a absorção e índice de vazios menores que os valores obtidos no CCV. Estes resultados indicaram que o CAA pode ser mais durável que o CCV.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A realização dos ensaios foi feita conforme a sequência indicada na Figura 24.

Figura 24: Sequência dos ensaios dos experimentos



Fonte: Próprio autor

3.1 MATERIAIS

Na Tabela 11, estão apresentados os ensaios aplicados aos componentes do CAA de acordo com as normas brasileiras ABNT, os equipamentos utilizados para caracterização dos materiais e os locais onde foram realizados.

Tabela 11: Ensaios aplicados componentes do concreto conforme as normas ABNT

Componentes	Ensaio	Normas ABNT /equipamentos	Local
Cimento	Distribuição Granulométrica	Malvern Instruments Ltda, Mastersizer	Lab. Química- NUSEC/UNIFEI
Sílica Ativa	Distribuição Granulométrica	Malvern Instruments Ltda, Mastersizer	Lab. Química- NUSEC/UNIFEI
Agregados miúdos	Distribuição Granulométrica	NBR NM 248:2003	Laboratório de estruturas da UNIFEI
	Massa específica	NBR NM 52:2009 ^a	
	Absorção	NBR NM 30:2001 ^a	
	Massa unitária solta	NBR NM 45:2006 ^b	
Agregados Graúdos	Distribuição granulométrica	NBR NM 248:2003	Laboratório de Materiais de Construção Civil da FEPI
	Massa específica	NBR NM 53:2009 ^c	
	Absorção	NBR NM 53:2009 ^c	
	Massa Unitária Solta	NBR NM 45:2006 ^b	
RCMG	Granulometria a laser	Malvern Instruments Ltda, Mastersizer	Lab., Química- NUSEC/UNIFEI
	Massa específica	NBR NM 52:2009 ^a	LCE* UNIFEI
AEF	Granulometria a laser	Microtrac, S 3500	LCE UNIFEI
	Massa específica	NBR NM 52:2009 ^a	Lab. Estrut.
	Composição FRX	Panalytical®, Axios Max	USP/ Lorena

* LCE = Laboratório de Caracterização Estrutural

^aNBR NM 52:2009 e NM 30:2001 foram substituídas por ABNT NBR 16916:2021; ^bNBR NM 45:2006 foi substituída por ABNT NBR 16972:2021; ^cNBR NM 53 foi substituída por ABNT NBR 16917:2021;

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento de alta resistência inicial, CPV ARI especificado conforme a norma NBR 16697 (ABNT, 2108a). As características físicas e químicas do cimento estão mostradas da Tabela 12 e foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 12: Características físicas e químicas do CP V ARI

Parâmetro	
Massa específica	2,8 a 3, 2 g/cm ³
Massa específica aparente	0,9 a 1,2 g/cm ³
Área específica	507 m ² /kg
pH em solução aquosa	12 a 14
Cor	Cinza
Início de pega	113 min
Fim de pega	148 min
Resistência aos 7 dias	47,9 MPa
Resistência aos 28 dias	53,7 MPa

Fonte: Cimentos Liz (2018)

3.1.2 Sílica ativa (SA)

A Sílica Ativa é um pó fino proveniente do processo de fabricação do silício metálico ou ferro silício e devido ao alto teor de SiO₂ no formato amorfo (não cristalino) e a elevada finura, proporciona altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação cimento, conferindo melhor desempenho em concretos e argamassa.

A sílica ativa reage com o hidróxido de Cálcio, Ca(OH)₂, cristal fraco e solúvel formado no processo de hidratação do cimento, transformando-o em um cristal resistente, silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Devido à elevada finura, a sílica ativa refina os poros do concreto melhorando as propriedades, tanto no estado fresco quanto endurecido (TECNOSIL, 2019)

Foi utilizada a sílica ativa granulada, cujas especificações se encontram na Tabela 13, como aditivo pozolânico visando à redução da quantidade de cimento, conforme preconizado por Mehta, Monteiro (2014).

Tabela 13: Propriedades da sílica ativa

Densidade Relativa	2,2 g/cm ³
Teor de SiO ₂	> 85%
Superfície específica	20000 m ² /kg
Formato da partícula	Esférica
Cor	Cinza

Fonte: Tecnosil (2019)

3.1.3 Resíduo de Corte de mármore e granito (RCMG)

O RCMG, por ser material fino, foi utilizado como adição mineral para melhorar a viscosidade do CAA. Obtido em uma marmoraria local, o resíduo foi retirado da máquina de corte de mármore e granito em forma de lama, depois foi colocado em estufa a 105° C, no

laboratório de Estruturas da UNIFEI, sendo utilizado o material passante na peneira de malha 1,20 mm (FIGURA 25) a fim de aproveitar maior quantidade do resíduo.

Figura 25: a) Máquina de corte de mármore e granito; b) RCMG em forma de lama, seco em estufa e peneirado



a



b

Fonte: Acervo do próprio autor

3.1.4 Areia de exaustão de Fundição (AEF)

O resíduo em estudo, AEF (FIGURA 26), advindo de uma indústria de autopeças local, foi coletado do setor de preparo e mistura da areia verde, “sistema areia”, e do setor de desmoldagem, rebarbação e limpeza das peças fundidas em molde de areia, por filtros manga, a qual descarta em torno de 4 ton./mês.

O resíduo é composto por areia de quartzo, argila de Bentonita Natural (Silicato de Alumínio e Magnésio Hidratado), Barrilha leve (Carbonato de Sódio) para ativar a bentonita e por carvão.

A massa específica e a massa unitária solta foram determinadas como 2,62 g/cm³ e 1,418 kg/m³, respectivamente.

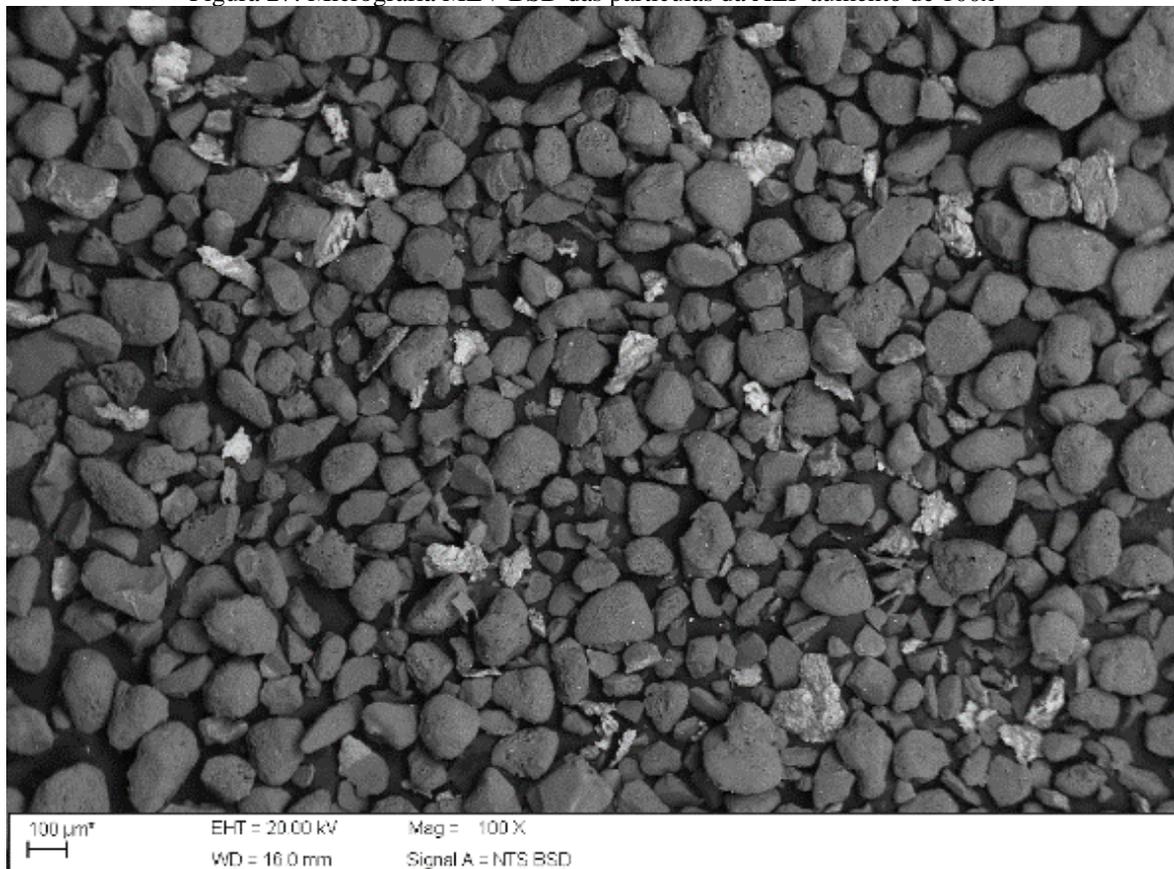
Figura 26: Amostra do resíduo AEF



Fonte: Acervo do próprio autor

A caracterização microestrutural da AEF foi feita por Martins *et al.* (2019, 2021b), os quais observaram por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), certa homogeneidade das partículas de forma subangular para arredondadas (FIGURA 27). Esta classificação foi também determinada por Santos *et al.* (2015).

Figura 27: Micrografia MEV BSD das partículas da AEF aumento de 100x

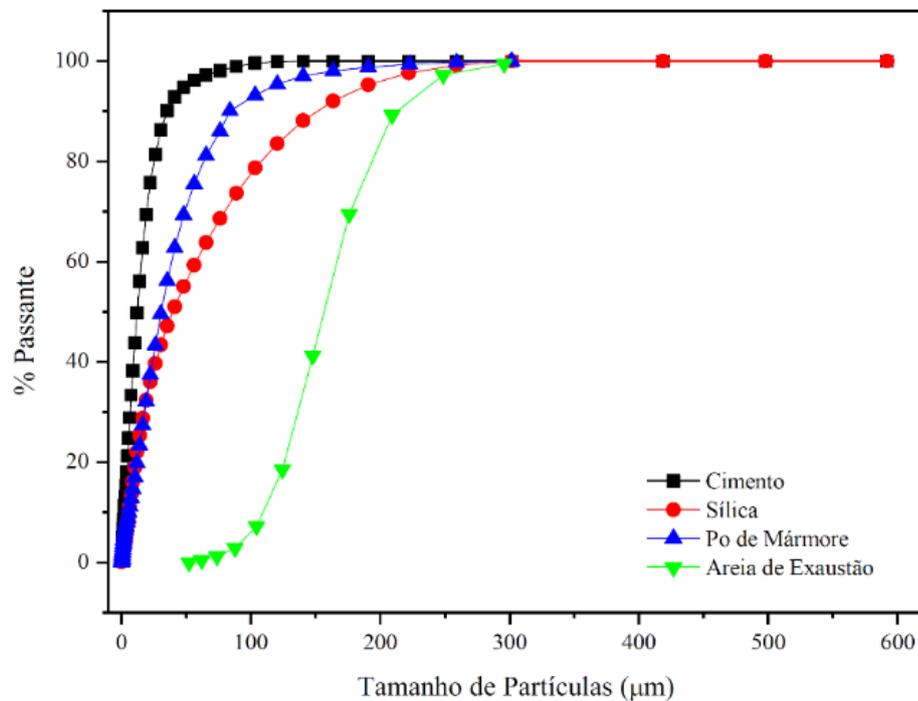
Fonte: Martins *et al.* (2019)

A distribuição do tamanho de partícula do CP V, SA, RCMG e AEF foi feita por meio do granulometria a laser, sendo que os diâmetros em μm estão demonstrados na Tabela 14 e as curvas das respectivas distribuições estão apresentadas na Figura 28.

Tabela 14: Distribuição granulométrica em μm dos materiais finos

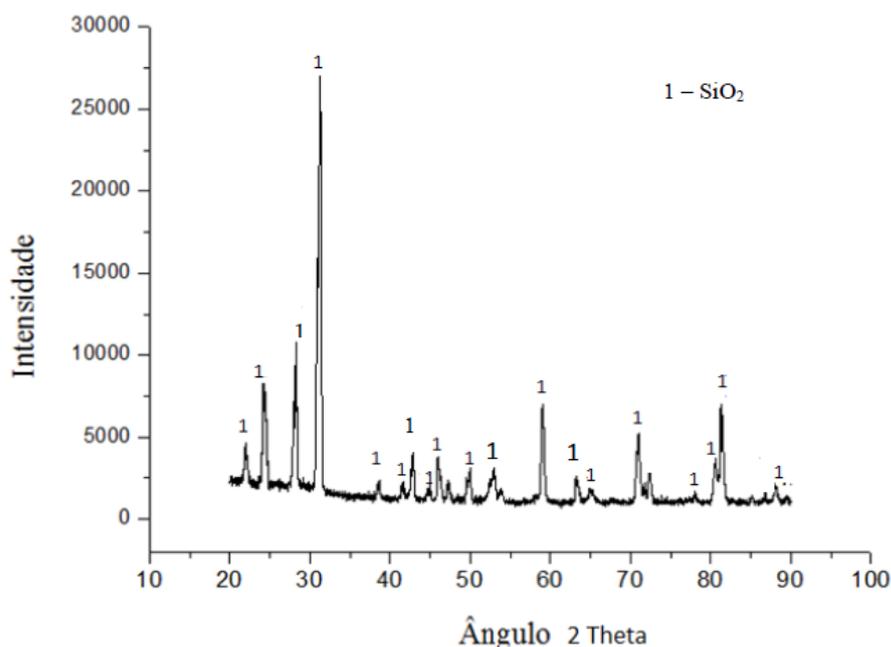
	CP V ARI	SA	RCMG	AEF
D ₁₀	2,32 μm	6,05 μm	5,68 μm	110,9 μm
D ₅₀	12,28 μm	39,78 μm	30,80 μm	156,1 μm
D ₉₀	35,23 μm	150,70 μm	88,59 μm	211,7 μm

Figura 28: Curvas da Distribuição Granulométrica dos materiais finos



A composição mineralógica, foi verificada pela Difração de raios X (DRX) constatou-se a presença predominante de sílica (SiO_2) na forma de quartzo na fase cristalina (FIGURA 29).

Figura 29: Difratoograma da AEF



Fonte: Martins et al. (2021b)

Resultado semelhante foi encontrado por Santos *et al.* (2015) e Souza *et al.* (2019).

A Composição química da AEF foi identificada pela técnica de Fluorescência de raios X (FRX), conforme Tabela 15.

Tabela 15: Fluorescência de raios X da AEF

Composto	Concentração %
SiO ₂	81,08
Fe ₂ O ₃	15,97
Al ₂ O ₃	1,22
Na ₂ O	0,40
MgO	0,38
CaO	0,20
MnO	0,12
TiO	0,11
Outros	≤ 0,09

Fonte: Martins et al. (2021b)

A identificação de 81,08% de SiO₂ corrobora com a análise DRX feita por Martins *et al.* (2019), que observaram a presença predominante de sílica na forma de quartzo. Resultados semelhantes foram encontrados por Cúnico *et al.* (2014), Kraus *et al.* (2009) e Sandhu, Siddique (2019).

O resíduo foi classificado quanto a toxicidade, pelos ensaios de lixiviação e solubilização, conforme laudo realizado no laboratório TASQA® Serviços Analíticos Ltda., Paulínia, SP, fornecido pela indústria de fundidos e de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004)

A Tabela 16 apresenta a concentração, no extrato lixiviado, de alguns elementos químicos encontrados no resíduo os quais foram comparados com os limites máximos permitidos pela norma.

Tabela 16: Concentração – Limite máximo no extrato lixiviado do Resíduo

Parâmetro	Unidade	Resultados analíticos		Limite máximo ABNT mg/L
		Sistema areia	Rebarbação	
Arsênio	mg/L	< 0,05	< 0,05	1
Bário	mg/L	0,75	0,22	70
Cádmio	mg/L	< 0,005	< 0,005	0,5
Chumbo	mg/L	< 0,028	< 0,028	5
Cromo total	mg/L	< 0,005	< 0,005	1
Fluoretos	mg/L	0,13	0,13	150
Mercúrio	mg/L	< 0,00017	< 0,00017	0,1
Selênio	mg/L	< 0,005	< 0,005	1
Orgânicos	mg/L	< LQ	< LQ	Anexo F

Fonte: Adaptado de Koenig; Santos; Secomandi, 2015 a e b

Os parâmetros analisados apresentaram concentrações adequadas às indicadas no Anexo F da norma NBR 10004 (ABNT, 2004a) e, portanto, o resíduo foi classificado como Não Perigoso.

Alguns elementos solubilizados em água estão indicados na Tabela 17 e foram comparados aos limites máximos estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Tabela 17: Concentração – Limite máximo no extrato solubilizado do Resíduo
 Concentração – Limite máximo no extrato lixiviado do Resíduo

Parâmetro	Unidade	Resultados analíticos		Limite máximo ABNT mg/L
		Sistema areia	Rebarbação	
Alumínio	mg/L	16,4	1,10	0,2
Arsênio	mg/L	0,006	<0,001	0,01
Bário	mg/L	0,25	3,94	0,7
Cádmio	mg/L	<0,005	<0,005	0,005
Chumbo	mg/L	0,013	<0,002	0,01
Cianeto	mg/L	0,0054	0,0064	0,07
Cloretos	mg/L	40,3	11,5	250
Cobre	mg/L	0,019	0,017	2
Cromo total	mg/L	0,13	0,0063	0,05
Ferro	mg/L	10,9	1,42	0,32
Fluoretos	mg/L	0,79	0,61	1,5
Manganês	mg/L	0,47	0,031	0,1
Mercúrio	mg/L	< 0,00017	0,0002	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	19,0	0,4	10
Prata	mg/L	< 0,005	< 0,005	0,05
Selênio	mg/L	< 0,002	< 0,002	0,01
Sódio	mg/L	79,5	37,1	200
Sulfato (SO ₄)	mg/L	101	14,3	250
Surfactantes	mg/L	< 0,03	< 0,03	0,5
Zinco	mg/L	0,021	0,065	5
Fenóis	mg/L	< 0,0059	< 0,0011	0,01
Outros Orgânicos	mg/L	< LM	< LM	Anexo G

Fonte: Adaptado de Koenig; Santos; Secomandi, 2015 a e b

Com relação ao resíduo proveniente do sistema areia, os parâmetros analisados alumínio, chumbo, cromo total, ferro, manganês e nitrato e com relação ao resíduo proveniente da rebarbação e limpeza, os parâmetros Alumínio, Bário e Ferro apresentaram concentrações superiores às indicadas no Anexo G da norma NBR 10004 (ABNT, 2004a) o que indica que os resíduos foram classificados como Não Inertes.

Baseado nos resultados obtidos, o resíduo AEF foi classificado, como Classe II A – Resíduo Não Perigoso e Não inerte conforme NBR 10004 (ABNT, 2004a). Também preconizado por Martins et al. (2019)

3.1.5 Agregados naturais

A areia natural de quartzo retirada do rio Sapucaí, Itajubá/MG, e adquirida em comércio local, foi utilizada no estado natural e a umidade foi obtida pelo método do Speedy, que consiste de um aparelho usado para determinar a umidade de solos e agregados miúdos, conforme o que preconiza a norma do DNER ME-52 (DNER, 1994). Depois, foi feita a correção da massa da areia e da água. A brita zero de origem granulítica foi extraída em mineradora da região e adquirida no comércio local. A distribuição granulométrica realizada por peneiramento, módulo de finura e massa específica da areia natural e brita, estão mostradas na Tabela 18.

Tabela 18: Distribuição granulométrica dos agregados

#	% Retida Acumulada	
	Areia	Brita
19 mm		0
12,5 mm*		1
9,5 mm		7
6,3 mm*		49
4,8 mm	0	75
2,4 mm	3	96
1,2 mm	16	97
0,6 mm	43	100
0,3 mm	78	100
0,15 mm	96	100
0,075 mm	99	100
Fundo	100	100
Módulo de Finura	2,36	5,76
D _{máx} *, mm	2,4	12,5
Massa específica g/cm ³	2,63	2,65
MUS* g/cm ³	1,582	1,572
MUC* g/cm ³	-	1,608
Absorção %	0,37	0,67
Origem	Quartzo	Granulítica
Forma	Angular	Angular

*D_{máx}.: Diâmetro máximo; MUS: Massa unitária solta; MUC: Massa unitária compactada

Para o cálculo do módulo de finura foram considerados os pesos retidos acumulados nas peneiras da série normal conforme a norma NBR 248 (ABNT, 2003).

3.1.6 Aditivo superplastificante

As informações físicas e químicas do aditivo superplastificante ADI-SUPER H25 do tipo II estão descritas na Tabela 19. Formulado à base de polímeros de éteres carboxílicos modificados, foi fornecido pela Aditibrás®.

Tabela 19: Informações do aditivo superplastificante

Propriedades	ADI Super H 25
Massa específica	1,055±0,02 g/cm ³
Cor	Castanho claro
pH	5,50 ±1,00
Teor de sólidos	25%

Fonte: Aditibrás (2017)

3.1.7 Água

Utilizou-se água potável proveniente do sistema de abastecimento de água local, tratada e distribuída pela Companhia de Saneamento COPASA MG.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Obtenção do traço do CAA

A metodologia utilizada para a definição do traço na pesquisa foi definida por Pinto et al. (2021) e baseada no Método do Empacotamento Compressível conforme descrito por Gomes, Gettu, Aguilló (2003) incluindo os limites dos constituintes sugeridos por alguns autores como diretrizes para compor as misturas (TABELAS 20 e 21).

Tabela 20: Faixa típica dos componentes do CAA em massa (kg/m^3)

Autor	Cimento	Finos	Água	Areia	Brita	a/finos
Su <i>et al.</i> 2001			160 a 185			
Peterson <i>et al.</i> 2005		500 a 525				
Gomes e Barros 2009	200 a 450			710 a 900	750 a 920	
Domone 2006 *		500				
EFNARC 2005, 2006		380 a 600	150 a 210		750 a 1000	
ACI 237R 2007	386 a 475					0,32 a 0,45
Desnerk <i>et al.</i> 2014**	350	420	185	800	820	0,36

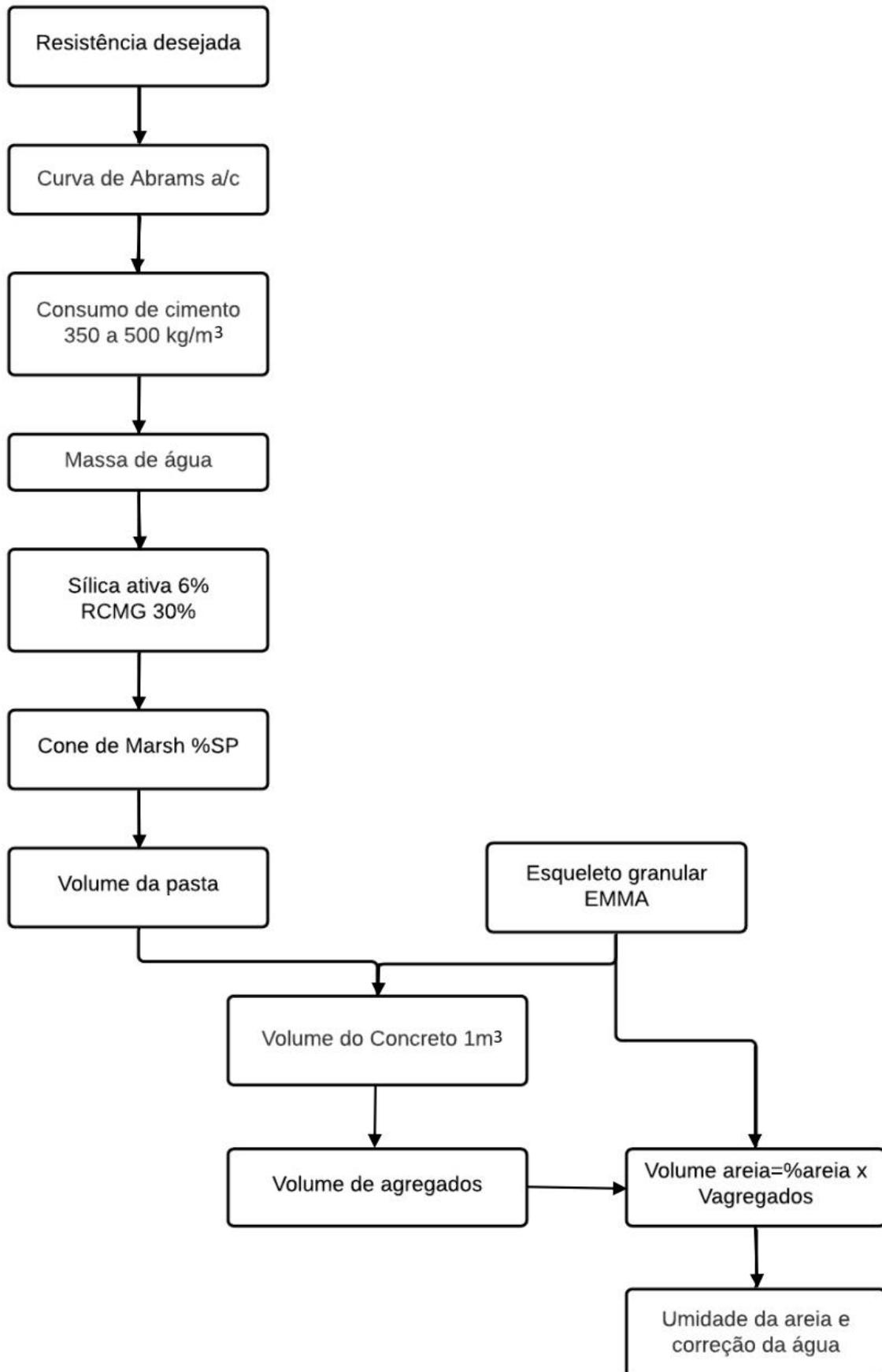
*Os autores fizeram a média de 68 estudos e ** 214 estudos

Tabela 21: Faixa típica dos componentes do CAA em % volume

Autor	Areia	Brita
Okamura e Ouchi 2003	40% V_{pasta}	50 % $V_{\text{agregados}}$
Repetto 2005	35 a 55% V_{agregado}	27 a 33% V_{concreto}
Gomes <i>et al.</i> 2003	40 a 50% V_{agregado}	28 a 35% V_{concreto}
Domone 2006*	47,5% $V_{\text{argamassa}}$	31,22% V_{concreto}
EFNARC 2005	48 a 55% V_{agregado}	28 a 35% V_{concreto}
EFNARC 2006	45 a 55% V_{agregado}	

Além desses índices, o volume da pasta também é um fator que deve ser considerado. EFNARC (2002, 2006) determina uma variação de 300 a 380 l/m^3 e Desnerk *et al.* (2014) encontraram o valor médio de 370 l/m^3 para CAA, enquanto, para CCV, o valor médio é de 290 l/m^3 . O Instituto Americano do Concreto, American Concrete Institute (ACI) ACI 237R 07 (2007), recomenda que o volume da pasta corresponda de 34 a 40% e o volume da argamassa de 68 a 72% do volume total da mistura. Os passos para a obtenção do traço seguiram a sequência demonstrada na Figura 30.

Figura 30: Sequência para definição do traço do CAA



Fonte: Próprio autor

Para a produção do CAA, considerou-se a resistência mínima de 40 MPa e $a/c \leq 0,45$ para ambientes de agressividade muito forte, vide Tabela 6. O método de dosagem de Gomes, Gettu, Aguiló (2003) se divide em três partes: otimização da composição da pasta e do esqueleto granular em separado, para, posteriormente, realizar a mistura desses dois elementos, através da definição do volume ideal de pasta. Foram considerados inicialmente 400 kg/m³ de cimento, 6% de sílica ativa de acordo com os dados na Figura 5 de Kostrzanowska-Siedlarz; Gołaszewski (2016) e 30% de RCMG.

3.2.1.1 Composição da pasta

Realizou-se o teste da pasta variando as porcentagens de 0,8% até 1,2% de aditivo superplastificante (SP) em relação à massa de cimento de acordo com especificação do fabricante (TABELA 22).

Tabela 22: Variação da dosagem do superplastificante para definir a composição da pasta

% Aditivo SP	Marsh (s)	Espalhamento (mm)
0,8%	53 s	185
1,0%	47 s	190
1,2%	50 s	190

Foi adotada a composição da pasta que obteve o espalhamento mínimo de 180 mm no ensaio do mini abatimento, O método do mini-abatimento que foi descrito por Kantro (1950) e muito parecido com o ensaio de abatimento do concreto; com a exceção das dimensões do molde tronco-cônico, apesar das proporções serem as mesmas. Além do molde são necessários para o ensaio: uma folha de papel milimetrado colada sob uma placa de vidro onde deve estar desenhado um plano cartesiano que servira de apoio para medida do diâmetro de espalhamento e um paquímetro para medida dos diâmetros (FIGURA 31)

Figura 31: Realização do ensaio de espalhamento da pasta



Fonte: Acervo próprio do autor

Nessa etapa, determinou-se a combinação entre o cimento, água, adição mineral e aditivo superplastificante que resultou na pasta com fluidez máxima, menor teor de SP/c e com resistência à segregação.

A dosagem ideal da pasta foi obtida com 0,8% de SP, 6% de SA, 30% RCMG e $a/cimentantes=0,35$, a qual atingiu 185 mm de espalhamento. O traço da mistura está demonstrado na Tabela 23.

Tabela 23: Composição da pasta para o volume de 1,4 l

Componentes	Cimento	Silica Ativa	RCMG	SP	Água
0,8%SP	1,635 Kg	0,098 kg	0,490 kg	0,055 kg	0,606 kg
Traço em massa	1	0,06	0,3	0,008	0,37

3.2.1.2 Composição da argamassa

O esqueleto granular, ou seja, o empacotamento das partículas de areia e brita foi realizado utilizando o programa de compacidade virtual, Elkem Materiais Mixture Analyzer, EMMA, disponibilizado pela Elkem Materials, o qual se baseia nos modelos matemáticos de Andreasen e Albert. Foi utilizado o modelo de Andreasen modificado, adotando $q=0,25$, mais indicado para CAA conforme Castro; Pandolfelli (2009). O EMMA foi também utilizado por Gopinath *et al.* (2011), Galetakis, Sultana. (2016) e Cavaliere *et al.* (2018).

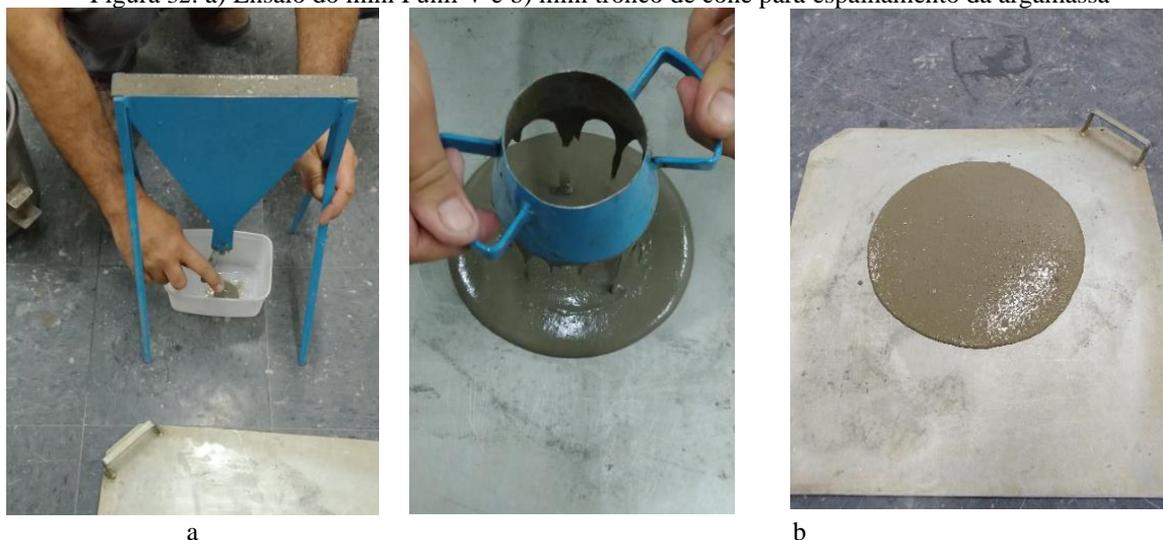
Para obtenção do esqueleto granular da areia e da brita inseriu-se as distribuições granulométricas e massas específicas de todos os componentes secos utilizados no CAA a fim de se obter a curva alvo de melhor empacotamento entre todos os materiais secos. As quantidades do cimento Portland, sílica ativa e RCMG foram fixadas e desta forma fez-se os ajustes da areia e da brita aproximando a curva gerada à curva alvo alcançando os valores de 54% e 46% em peso respectivamente. Antes de definir o concreto, foram realizados os ensaios para a argamassa, em um volume de 2 litros, para possíveis ajustes na quantidade de areia, conforme sugerem Okamura e Ouchi (2003), como indica a Tabela 24.

Tabela 24: Traço para composição da argamassa

Componentes	Cimento	Sílica	RCMG	AEF	Areia	SP	Água	a/cimentantes
Kg	1,635	0,082	0,410	0	2,388	0,058	0,505	0,35
Traço em massa	1	0,06	0,3	0	1,896	0,008	0,370	0,35

Os ensaios do mini Funil V, no qual se marca o espalhamento e analisa a fluidez da mistura e, do mini tronco de cone que marca o tempo de escoamento e avalia-se a viscosidade da argamassa estão demonstrados na Figura 32.

Figura 32: a) Ensaio do mini Funil V e b) mini tronco de cone para espalhamento da argamassa



Fonte: Acervo do próprio autor

O tempo obtido no ensaio do mini funil V foi de 4 s e o espalhamento foi de 320mm. Os limites sugeridos por Repette (2005) são de 3,5 a 10 s para o Funil e 200 a 280 mm para

espalhamento. No entanto Domone, Jin (1999), determina que os limites são de 1,5 a 17 s para o Funil V e 230 a 340 mm para o espalhamento.

Todos os valores foram inseridos numa planilha (TABELA 25), a qual contém as fórmulas do método do Gomes, Gettu, Aguilló (2003) para cálculo da pasta e correção do cimento. A umidade e absorção dos agregados foram levados em consideração para obtenção do traço final.

Tabela 25: Parte da planilha na qual foram inseridos os dados do EMMA para dosagem do CAA

Componentes	EMMA	Massa específica g/cm ³	Massa Kg/m ³	Volume m ³	Traço unitário
Cimento	450,00	3,04	452,577	0,1489	1,000
Silica ativa	27,00	2,20	27,155	0,0123	0,060
RCMG	135,00	2,83	135,773	0,0480	0,300
Adição/subst.	-	2,61	-	-	-
Areia	875,00	2,63	880,012	0,3346	1,944
Brita	750,00	2,65	754,296	0,2846	1,667
SP	3,80	1,05	3,838	0,0037	0,008
Água	166,95	1,00	167,906	0,1679	0,0371
Total	2407,77		2421,557	1,0000	

Fonte: Autor

3.2.1.3 Composição do CAA

Cada traço continha o volume de 60 l (0,060 m³) e foi utilizada uma betoneira de capacidade 400 l e da marca Sorrag do Brasil. As misturas foram realizadas com substituição parcial da areia natural por 0, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de AEF em massa, mantendo constantes as massas de cimento (455 kg/m³), a sílica ativa, o RCMG, a brita 0 (zero), o aditivo superplastificante (SP) e a água, conforme demonstrados na Tabela 26.

Tabela 26: Traços para composição do CAA

Componentes	AEF 0 Kg/m ³	Traço unitário					
		AEF 0	AEF 10	AEF 20	AEF 30	AEF 40	AEF 50
Cimento	455,2	1	1	1	1	1	1
SA	27,3	0,060	0,060	0,060	0,060	0,06	0,06
RCMG	136,5	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
Areia Média	863,2	1,896	1,707	1,517	1,328	1,138	0,958
AEF	0,0	0,000	0,189	0,379	0,569	0,759	0,958
Brita 0	739,9	1,626	1,626	1,626	1,626	1,626	1,628
SP	3,762	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Água	168,9	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
a/c	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
a/cimentícios	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Vol. pasta %	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3
Teor de arg. %	72,0	72,0	72,0	72,0	72,0	72,0	72,0
V areia/ V agreg.	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
V brita/ V conc.	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
% AEF	0	0	10	20	30	40	50

A sequência de mistura do concreto utilizada, diferente do que é encontrado na literatura, foi baseada na sequência indicada para argamassa e se mostrou muito eficiente.

- 1- Primeiro, inseriu-se, na betoneira seca: areia, sílica ativa, pó de mármore e AEF (4 min);
- 2- Depois, foram adicionados 2/3 da água (2 min);
- 3- Em seguida, 1/3 da água com SP (6 min);
- 4- Finalmente, foi colocada a Brita (3 min).

Os concretos foram feitos no Laboratório de Estruturas da UNIFEI. Foram moldados 30 cilindros metálicos de Ø 100 x 200 mm, 8 cilindros metálicos Ø 50 x 100mm e 3 moldes prismáticos 120 x120 x60 mm contendo 2 barras de Ca50 de Ø3/8mm.

3.2.2 Concreto fresco

A massa específica e índice de ar foram obtidos conforme a NBR 9833:2009 (ABNT, 2009). Para avaliação das propriedades reológicas do concreto, como fluidez, coesão, viscosidade e trabalhabilidade, foram utilizados os métodos empíricos (TABELA 27) Espalhamento, T₅₀₀, Funil V e Caixa L (FIGURA 33) conforme as normas da ABNT para CAA.

Além disso, foi possível verificar, por meio da estabilidade visual, a presença dos fenômenos de exsudação e/ou segregação dos agregados.

Tabela 27: Ensaio do CAA no estado fresco

Ensaio	Normas ABNT	Equipamentos
Espalhamento e tempo de escoamento	NBR 15823-2:2017	Tronco de cone
Viscosidade	NBR 15823-5:2017	Funil V
Habilidade passante	NBR 15823-4:2017	Caixa L

Figura 33: Ensaio no estado fresco: a) Espalhamento, b) Funil V, c) Caixa L



a



b



c

Fonte: Acervo autor

3.2.3 Concreto endurecido

Foram realizados teste de resistência à compressão e os indicadores de durabilidade foram obtidos pelos ensaios de absorção por imersão e capilaridade, resistividade elétrica volumétrica, resistência ao ataque aos sulfatos, resistência ao ataque ácido, permeabilidade rápida de íons de cloreto e potencial de corrosão, conforme Tabela 28.

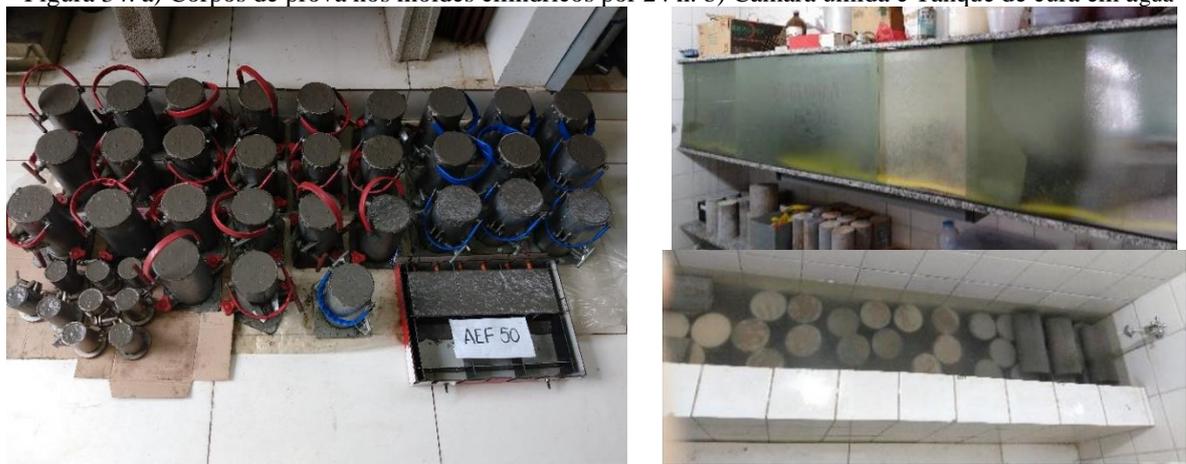
Tabela 28: Ensaio aplicados ao CAA no estado endurecido, conforme as normas brasileiras e americanas, para resistência mecânica e durabilidade.

Ensaio	Norma ABNT ou ASTM	Corpos de prova	Idade os ensaios
Resistência à compressão	NBR 5739:2018b	8 cilindros Ø 100 x 200 mm	7, 28 e 90* dias
Absorção por imersão	NBR 9778:2009	3 cilindros Ø 100 x 200 mm	28 dias
Absorção por capilaridade	NBR 9779:2012	3 cilindros Ø 100 x 200 mm	28 dias
Resistência a tração	NBR 7222:2011	3 cilindros Ø 100 x 200 mm	35 dias
Ataque aos sulfatos	ASTM C452:2021	8 cilindros Ø 100 x 200 mm	180 dias
Ataque ácido	ASTM C1152:2020	6 cilindros Ø 50 x 100 mm	75 dias
Resistividade elétrica	NBR 9204:2012	6 cilindros Ø 100 x 200 mm	28 dias
Difusão de íons de cloreto	ASTM 1202:2019	2 cilindros Ø 50 x 100 mm	28 dias
Potencial de corrosão	ASTMC 876:2015	3 primas 120x120x60 mm	Após 90 dias

* O ensaio à compressão aos 90 dias foi realizado com os corpos de prova utilizados no teste de resistividade elétrica.

A desmoldagem foi realizada em 24 h após a moldagem e os corpos de prova referentes aos ensaios de compressão, absorção, capilaridade, resistência ao sulfato e difusão de íons de cloreto foram mantidos no tanque de cura em água com 5% de cal (FIGURA 34a) e, os corpos de prova referentes aos ensaios da resistência ao ácido, resistividade elétrica volumétrica e potencial de corrosão permaneceram na câmara úmida com 92% de umidade (FIGURA 34b) até as datas dos ensaios.

Figura 34: a) Corpos de prova nos moldes cilíndricos por 24 h. b) Câmara úmida e Tanque de cura em água



a

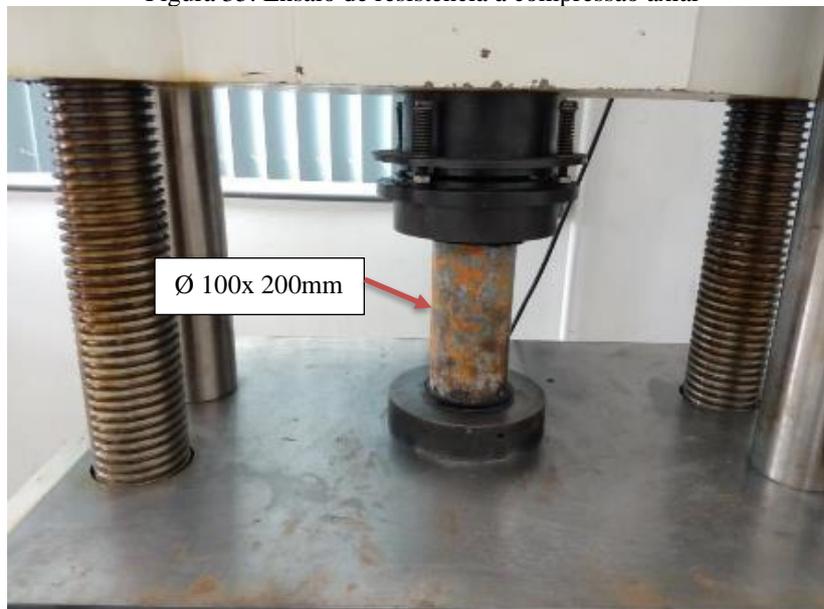
b

Fonte: Acervo do próprio autor

3.2.3.1 Resistência à compressão

Para avaliar as resistências mecânicas à compressão das misturas, utilizou-se a máquina universal da marca Time Testing Machines® WAW-1000 C. A velocidade de carregamento utilizada para os ensaios foi de 0,75 MPa/seg. A máquina está vinculada ao software *SmartTest* (TIME Group inc, 2000), que fornece os resultados das tensões até o rompimento e a curva de Tensão *versus* Deformação (FIGURA 35).

Figura 35: Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Acervo do próprio autor

3.2.3.2 Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica

O ensaio de absorção por imersão e também utilizado para determinar o índice de vazios e a densidade do concreto endurecido, foi realizado aos 28 dias após as moldagens. Os corpos de prova foram levados à estufa 105°C por 72 h (FIGURA 36a) e depois resfriados no dessecador e pesados para obter a massa seca (m_s). Em seguida, foram imersos em água por 72 h (FIGURA 36b), depois levados à fervura a 105°C por 5h e obtidos a massa em balança hidrostática (m_i). Depois tirou-se o excesso de água dos corpos de prova com pano úmido e obteve-se a massa saturada (m_{sat}).

Figura 36: a) Amostras na estufa a 105°C; b) amostras totalmente imersas em água



Fonte: Acervo do próprio autor

O cálculo da absorção por imersão, índice de vazios e das massas específicas seca, saturada e real foram feitos pelas Equações 10, 11, 12, 13 e 14 respectivamente:

$$A\% = \frac{msat - ms}{ms} \times 100 \quad (10)$$

$$Iv = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100 \quad (11)$$

$$\rho_s = \frac{ms}{msat - mi} \quad (12)$$

$$\rho_{sat} = \frac{msat}{msat - mi} \quad (13)$$

$$\rho_r = \frac{ms}{ms - mi} \quad (14)$$

3.2.3.3 Absorção por capilaridade

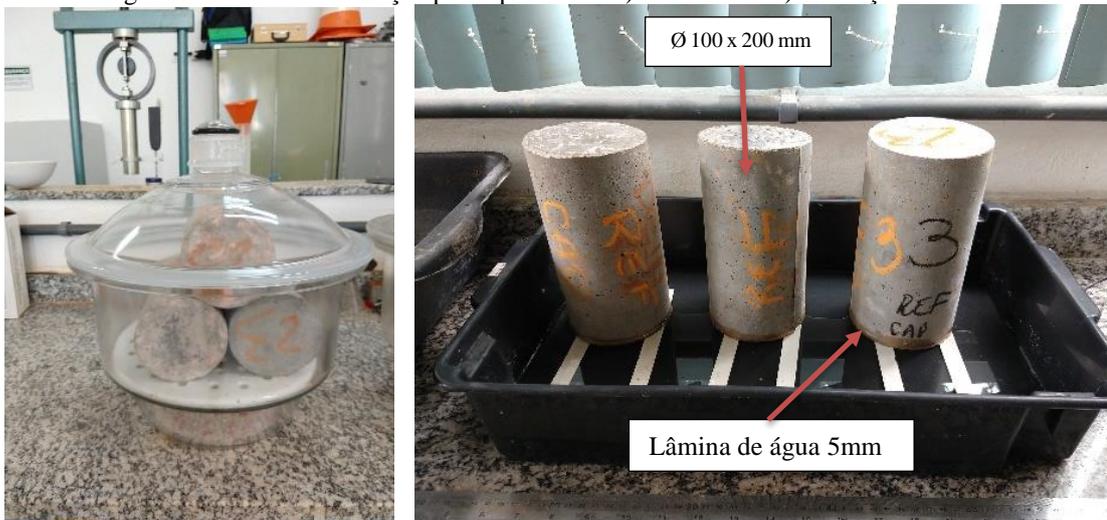
Para este ensaio os corpos de prova foram desmoldados após 24 h da concretagem e mantidos em cura na água por 28 dias. Após este tempo foram colocados em estufa a 105°C por 72 h e resfriados em ambiente de laboratório. Foi aplicada tinta de proteção à base de epóxi nas laterais e em uma das faces, para garantir que a penetração de água ocorra apenas pela face oposta. Depois, os corpos de prova foram colocados em uma lâmina de 5 mm de água (FIGURA 37), sendo que o monitoramento da variação de massa foi feito por medições após 3, 6, 24, 48

e 72 h. A absorção de água por capilaridade (C) foi calculada pela Equação 8. Após a realização das medições, os corpos de prova foram rompidos diametralmente, a fim de avaliar a altura da ascensão capilar.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{s} \quad (14)$$

Onde: m_{sat} é a massa saturada; m_s é a massa seca e “s” é área da seção transversal do cilindro.

Figura 37: Ensaio de absorção por capilaridade a) Dessecador b) Execução de ensaio



Fonte: Acervo do próprio autor

3.2.3.4 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi testada aos 35 dias e utilizou-se os mesmos corpos de prova do ensaio de capilaridade. a máquina universal da marca Time Testing Machines® WAW-1000 C conforme indicado na Figura 38.

Figura 38: Ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Acervo do próprio autor

3.2.3.5 Resistência ao ataque aos sulfatos

Este ensaio foi realizado conforme descrito em Sadek et al. (2016). Utilizou-se de oito corpos de prova de $\varnothing 100 \times 200$ mm os quais foram desmoldados após 24 h e mantidos na cura em água por 28 dias. Depois, quatro amostras foram colocadas em solução de $MgSO_4$ a 5% e quatro mantidas em água por 180 dias (FIGURA 39), quando foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão para avaliar a resistência aos sulfatos.

Figura 39: a) Sulfato de Magnésio b) Amostras imersas na solução de sulfato de magnésio



Fonte: Acervo do próprio autor

3.2.3.6 Resistência ao ataque ácido

A resistência ao ataque ácido, foi avaliada conforme descrito em Ranjbar et al. (2016). Os corpos de prova foram mantidos 7 dias em cura úmida, pesados e na sequência, três corpos de prova foram imersos em solução de ácido clorídrico, 3% HCl, por 1800 h ou 75 dias (FIGURA 40). A solução foi substituída a cada duas semanas, a fim de manter a concentração constante durante o período de teste quando foi feito o controle de massa dos corpos de prova.

Ao final de 75 dias, foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, verificadas perda de massa total e os resultados comparados com os três corpos de prova que se mantiveram na câmara úmida.



Fonte: Acervo do próprio autor

➤ Análise mineralógica por Difração de Raios-X (DRX)

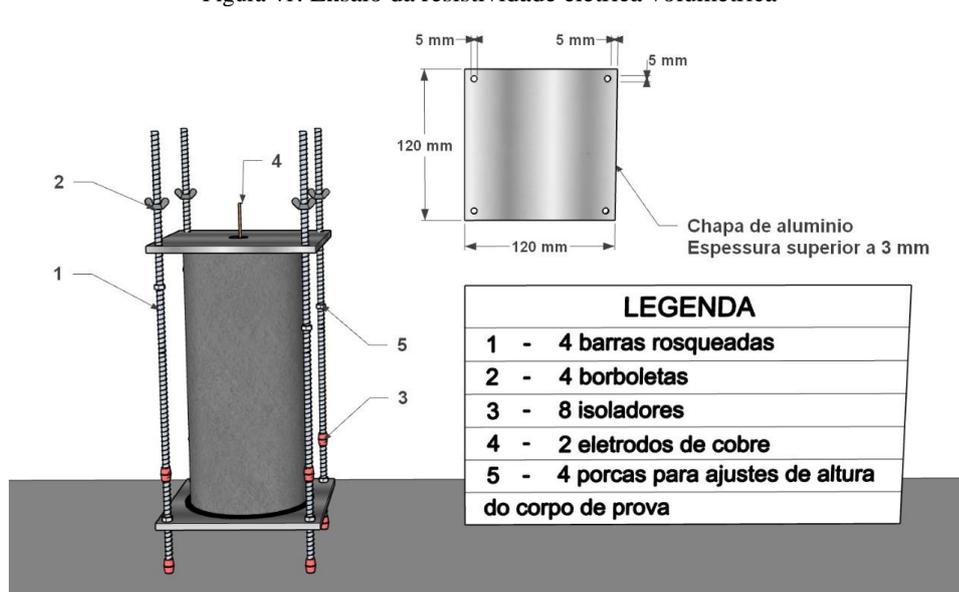
As amostras de cada mistura foram pulverizadas e analisadas em um Difratorômetro de raios-X PANalytical®, modelo Xpert-Pró (Anodo Cu; radiação 40 Kv, 40 mA), no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da Universidade Federal de Itajubá para determinar as fases (composição mineralógica) presentes. Foi utilizada uma varredura dos ângulos de 10 a 80 graus com passo de 0,02 e tempo por passo de 0,05 s. Os picos do espectro foram comparados e identificados a partir do arquivo de dados do *software* XPert HighScore Plus (PANalytical, 2016)

3.2.3.7 Resistividade Elétrica Volumétrica (REV)

O ensaio da REV foi adaptado de acordo com Lamounier *et al.* (2014) e Martins *et al.* (2021). Os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida por sete dias após a desmoldagem. Depois disso, três corpos de prova permaneceram na câmara úmida e três ficaram em ambiente do laboratório até as datas dos ensaios. As medidas foram feitas aos 28 dias com os corpos de prova secos superficialmente. Após cada medição, retornados para os ambientes de origem até a próxima medição.

O sistema de eletrodo consta de duas chapas de alumínio ligadas por barras de ferro isoladas nas extremidades de tal forma que o corpo de prova, quando inserido no sistema, a corrente atravessasse pelo concreto (FIGURA 41).

Figura 41: Ensaio da resistividade elétrica volumétrica



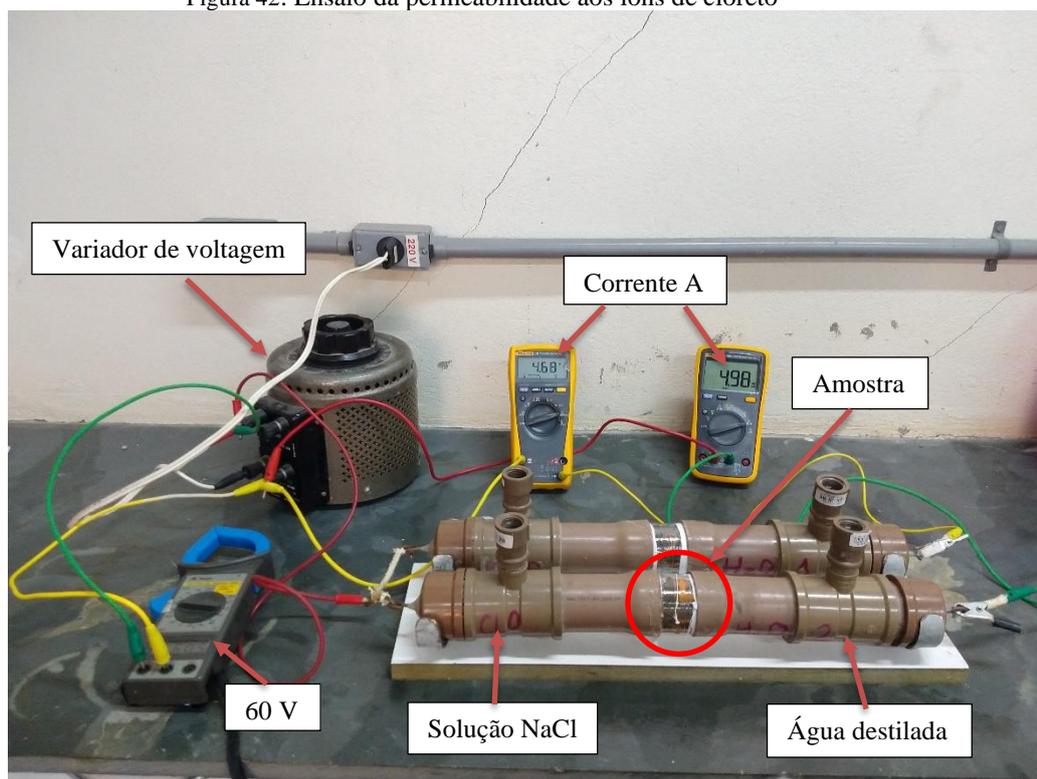
Fonte: Acervo do próprio autor

A resistividade foi calculada após aplicação de uma tensão de 50V em corrente alternada durante 10 min e a obtenção da corrente elétrica que passa pelo concreto. O tempo entre a retirada dos corpos de prova da câmara e a medição não ultrapassou 15 min de acordo com a referida norma.

3.2.3.8 Permeabilidade rápida aos íons de cloreto

O ensaio consta de um equipamento que contém duas células: uma onde é colocada a solução de cloreto de sódio, NaCl, (catódica) e outra a água destilada (anódica). Entre as células foi colocada a amostra a ser analisada. O procedimento consiste na aplicação de uma tensão de 60 V por meio de um variador de voltagem, Varivolt, durante 6 h na célula catódica, a qual provoca a passagem dos íons através da amostra (FIGURA 42) e as medidas de corrente foram feitas a cada 30 min com a utilização de dois multímetros Fluke 179 e um multímetro Minipa. Foram utilizados 2 cilindros de diâmetro 50 x 100 mm por traço, os quais foram mantidos em cura úmida por 7 dias, depois cortados em fatias de 5 cm e retornados à cura em água até a data do ensaio.

Figura 42: Ensaio da permeabilidade aos íons de cloreto



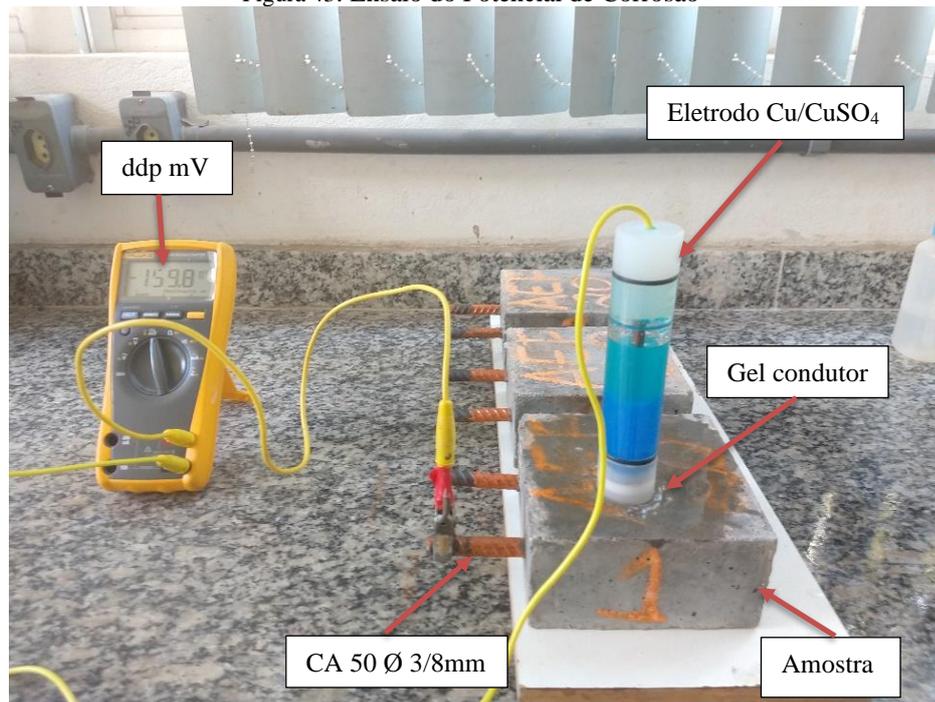
Fonte: Acervo do próprio autor

3.2.3.9 Potencial de corrosão

A realização deste ensaio tem a finalidade de determinar a atividade de corrosão do aço no concreto. Foram produzidos 3 corpos de prova prismáticos, de dimensões 120 x 120 x 60 mm (dimensões largura, comprimento, altura), para cada mistura. Cada corpo de prova continha duas barras de aço CA 50 de \varnothing 3/8 mm de 150 mm de comprimento e cobertura de 20 mm. Os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida por 48 h e, após desmoldagem, permaneceram em câmara úmida por 90 dias.

Para as medições, foram utilizados o eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre (CSC), gel condutor entre a superfície do concreto e o eletrodo, um multímetro, Fluke 179, que permite leitura de Corrente Contínua (CC) impedância de 10 a 200 m Ω , sendo o terminal positivo ligado ao aço e o terminal negativo, ao eletrodo de referência (FIGURA 43). Dessa forma, obteve-se a intensidade da diferença de potencial entre as semicélulas, sendo um parâmetro indicativo da ocorrência ou não de corrosão de armaduras. A superfície do concreto foi pré umedecida.

Figura 43: Ensaio do Potencial de Corrosão



Fonte: Acervo do próprio autor

3.3 Análise estatística dos resultados

Os resultados foram analisados pelo método de análise de variância (ANOVA) com auxílio do Microsoft Excel. Esta ferramenta de análise estatística permite uma análise do nível de variância das amostras, ou seja, se há ou não diferença significativa entre as amostras, com um intervalo de confiança de 95 % a um nível de significância de 5%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DAS AREIAS

A partir dos dados Massa Específica (ME), Massa Unitária Solta (MUS) e da distribuição granulométrica, outras características físicas como a dimensão máxima característica (DMC), índice de vazios (e), a porosidade (η) e o fator de empacotamento (E_0) foram calculados conforme mostrado na Tabela 29. O índice de forma e a esfericidade foram avaliados em diferentes tamanhos de partícula usando o software ImageJ (RASBAND, 2010) a partir de imagens do MEV (FIGURA 44).



Fonte: Martins et al. (2021b)

Tabela 29: Características físicas da AEF e areia natural

	ME g/cm ³	MUS g/cm ³	DMC mm	MF	e	η %	E_0	IF	Φ mm/mm	$f\text{-circle}$	C
AEF	2,62	1,418	0,30	0,51	0,85	0,46	0,54	0,79	0,91	0,94	1,49
Areia	2,63	1,582	2,40	2,36	0,66	0,40	0,60	0,55	0,70	0,50	3,35

DMC (característica de dimensão máxima), e (razão de vazios) = $ME / (MUS - 1)$; η (Porosidade) = $[e / (1 + e) \cdot 100]$; E_0 (fator de empacotamento) = $100 - \eta$; IF (índice de forma) = D_2 / D_1 ; Φ (Esfericidade) = $4A_p / \pi$; círculo f (= $4\pi A_p / P^2$); C (coeficiente de uniformidade) = D_{60} / D_{10} ;

Onde:

D_1 = Diâmetro da menor circunferência que circunscribe o grão (mm); D_2 = Diâmetro da maior circunferência inscrita no grão (mm); A_p = Área projetada do grão (mm² / mm²); P = Perímetro de grão (mm); D_{60} = Diâmetro correspondente a 60% no peso total das partículas menores que ele ; D_{10} = Diâmetro correspondente a 10% no peso total das partículas menores do que isso

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019) a areia natural foi classificada como areia fina, $MF < 2,4$ e a areia de exaustão de fundição foi classificada como muito fina, $MF < 2,0$. Em Angelin *et al.* (2003) as areias fina e muito fina apresentaram porosidades de 45% e 47% respectivamente. O índice de forma variou de 0,42 a 0,73 para a areia natural e de 0,70 a 0,93 para a areia de exaustão de fundição. A Esfericidade foi de 0,50 a 0,86 para a areia natural e de 0,88 a 0,97 para a areia de exaustão de fundição, sendo adotadas as médias desses valores. De acordo com Carasek *et al.* (2018), $0,50 \leq f\text{-círculo} \leq 0,75$ indicam partículas cúbicas e $0,75 \leq f\text{-círculo} \leq 1$ indicam que as partículas são circulares ou arredondadas.

A partir da distribuição do tamanho de partícula, o coeficiente de uniformidade, C , foi obtido pela relação entre D_{60} e D_{10} . De acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2018c) os agregados foram considerados uniformes pois os coeficientes de uniformidade são menores que 5.

A distribuição contínua do tamanho das partículas, a morfologia (índice de forma) e a textura promovem o empacotamento e a fluidez. Além disso, o maior empacotamento entre as partículas requer menos volume de pasta e, conseqüentemente, menos cimento. A porosidade interna das partículas também altera a densidade do concreto endurecido, resultando em um material mais durável, pois dificulta a penetração de agentes agressivos. As características de empacotamento das partículas são de fundamental importância para o desenvolvimento de concreto de alta resistência e concreto de alto desempenho (MEHTA; MONTEIRO, 2008, CASTRO; PANDOLFELI, 2009).

4.2 COMPOSIÇÃO DO CAA

4.2.1 Propriedades do CAA no estado fresco

A massa específica e o índice de ar do concreto fresco, relacionados na Tabela 30, foram calculados de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2009). Dentre as misturas propostas para o CAA, a mistura AEF 50 não atingiu as características requeridas pela norma ABNT NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) e foi necessário aumentar a água da mistura resultando a mistura AEF 50b.

Tabela 30: Massa específica e índice de ar de cada mistura de CAA

Traço	Massa Específica kg/m ³	Índice de ar %	Teor de ar %
AEF 0	2421,26	1,02	2,05
AEF 10	2440,29	1,01	1,15
AEF 20	2461,17	1,01	1,20
AEF 30	2477,72	1,00	0,00
AEF 40	2384,46	1,02	1,84
AEF 50b	2361,20	1,04	3,94

As massas específicas das misturas aumentaram com até 30% do resíduo, em relação à referência, AEF 0, por ser a areia de exaustão de fundição um resíduo mais fino e com maior área específica que a areia natural, deixou as misturas mais densas. No entanto, observa-se que as massas específicas das misturas AEF 40 e AEF 50 foram menores que as outras misturas, que se justifica pelo aumento de teor de ar.

Na pesquisa de Sandhu, Siddique (2019) a massa específica diminuiu com aumento da ADF. A variação foi de 2429 na mistura controle para 2421 kg/m³ na mistura com 30% do resíduo citado.

As propriedades reológicas do CAA no estado fresco foram analisadas e classificadas conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) e estão listadas na Tabela 31.

Tabela 31: Propriedades reológicas de cada mistura do CAA

Traço	Slump flow			T ₅₀₀		Funil V		Caixa L	
	mm	Classe	Visual	s	Classe	s	Classe	H1/H2	Classe
AEF 0	780	SF3	IEV1	3	VS2	5	VF1	0,96	PL2
AEF 10	780	SF3	IEV1	2	VS1	4	VF1	0,92	PL2
AEF 20	785	SF3	IEV0	3	VS2	7	VF1	0,96	PL2
AEF 30	800	SF3	IEV0	3	VSS	7	VF1	0,97	PL2
AEF 40	800	SF3	IEV0	6	VS2	12	VF2	0,97	PL2
AEF 50b	750	SF2	IEV0	6	VS2	11	VF2	0,90	PL2

Onde: SF2 espalhamento entre 660 a 750 mm; SF3 espalhamento entre 760 a 850 mm. O índice de estabilidade visual, IEV0 indica sem evidência de segregação ou exsudação, IEV 1 uma leve exsudação; VS1 para tempo de espalhamento $\leq 2s$ e VS2 $> 2s$; o tempo de passagem pelo funil VF1, VF1 $< 9s$ e VF2 de 9 a 25s; PL2 $\geq 0,80$, indica a habilidade passante entre obstáculos.

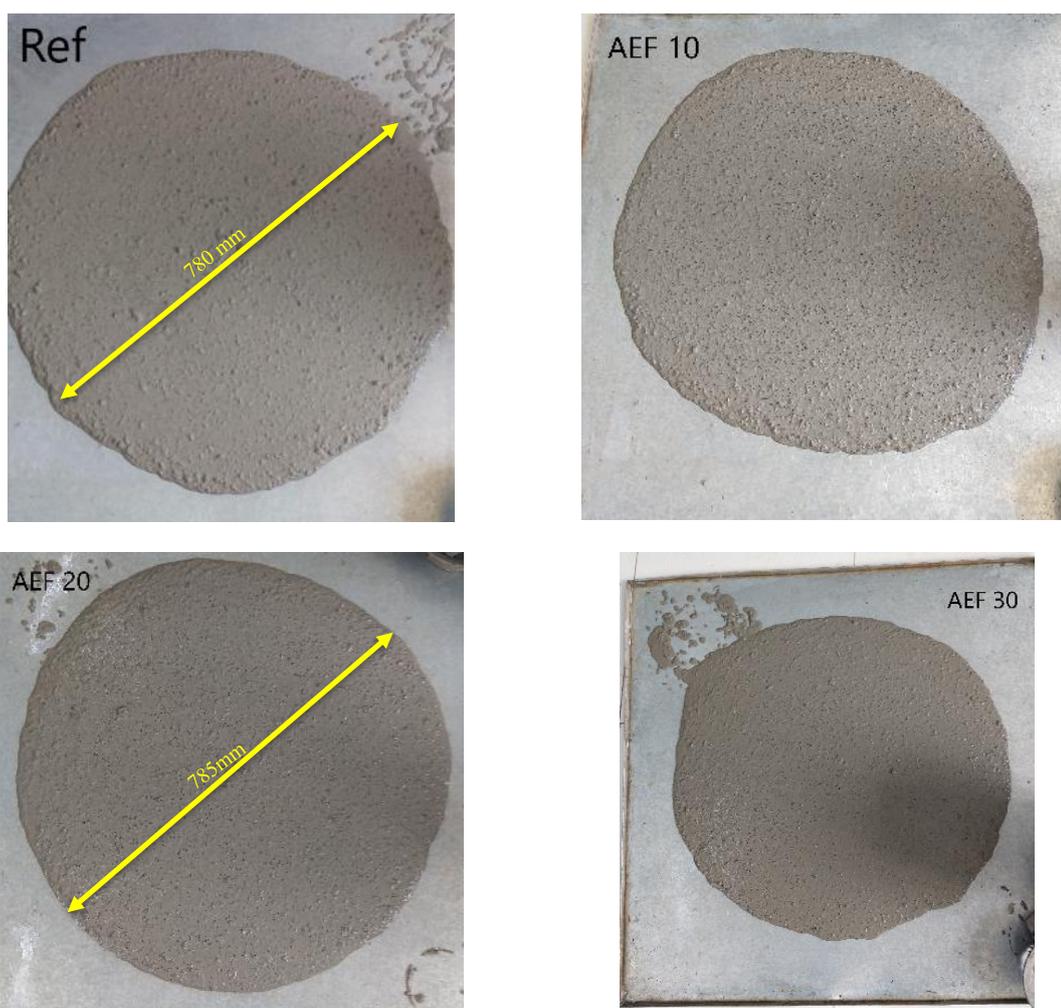
Todos os traços apresentaram as características de CAA, como: fluidez, viscosidade e resistência à segregação. A classificação SF3 indica que as misturas são adequadas para elementos estruturais com alta densidade de armaduras; IEV 1 indica uma leve exsudação e

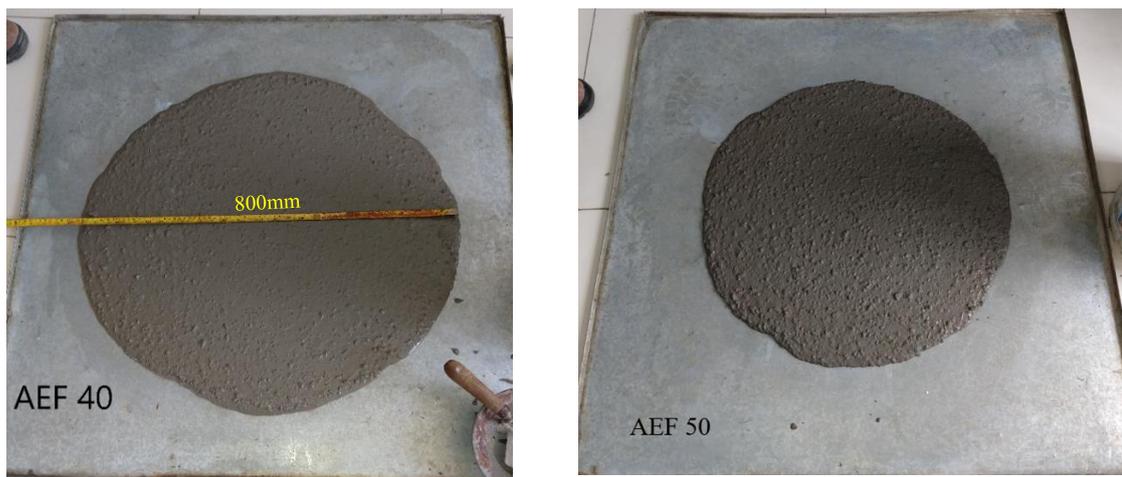
VF1 mostra que as misturas exigem um controle de exsudação e segregação. Pelas imagens da Figura 43, observa-se a coesão das misturas sem sinal de segregação ou exsudação. Resultados semelhantes foram obtidos por Sandhu, Siddique (2019).

A mistura AEF 50 apresentou alta viscosidade e o espalhamento (700 mm) foi mais lento (7s) embora tenha ficado dentro dos limites para CAA. No ensaio do funil V o escoamento não foi contínuo e o tempo foi de 22s. Na caixa L o escoamento também foi mais lento, no entanto não apresentou segregação, $H_2/H_1 = 0,93$. Desta forma decidiu-se aumentar a água para que a mistura atingisse os parâmetros indicados para CAA e obteve-se $a/c = 0,45$. A nova mistura, AEF 50b, ainda ficou viscosa e apresentou perda da fluidez muito rápida, porém atingiu todos os parâmetros de CAA.

O espalhamento e homogeneidade das misturas podem ser observados na Figura 45.

Figura 45: Espalhamento de cada mistura: AEF 0, AEF 10, AEF 20, AEF 30, AEF 40 e AEF 50.





Fonte: Acervo autor

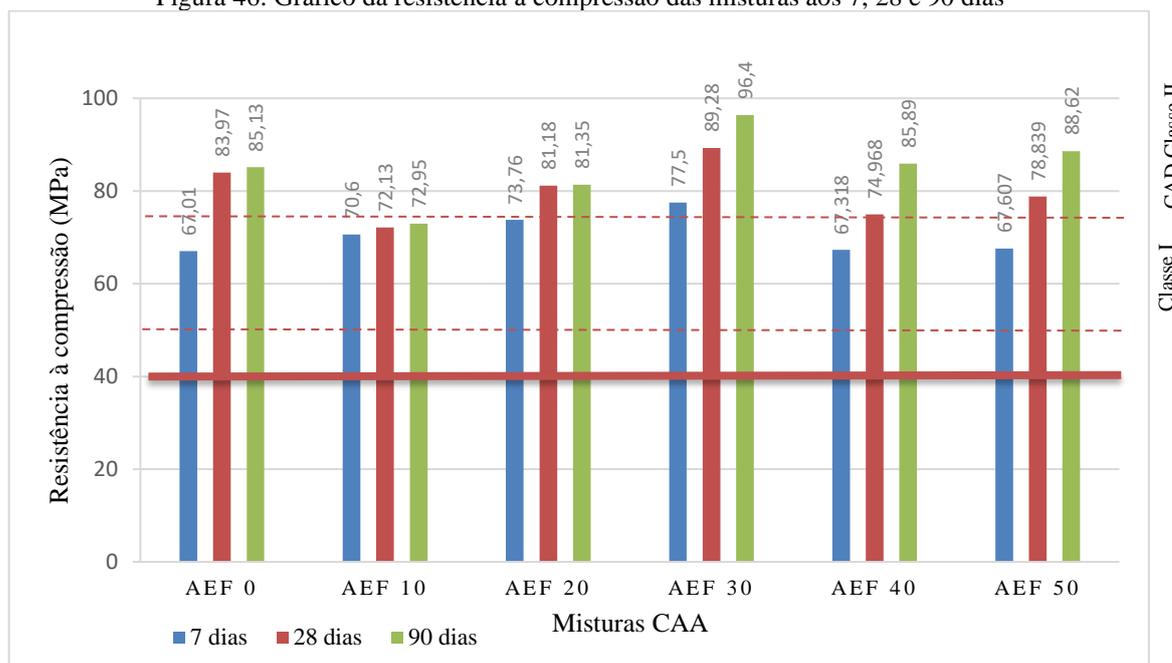
As misturas apresentaram aumento do espalhamento, do T_{500} e do tempo de passagem funil V com o aumento de até 40% de AEF. Esses resultados estão relacionados com a tensão de escoamento e viscosidade plástica das misturas, como preconizado por Khayat, Schutter (2014), as quais são influenciadas por atrito, forma e empacotamento entre as partículas. Como AEF tem a morfologia mais arredondada e maior área específica que a areia natural, provavelmente, deve diminuir a tensão de escoamento e aumentar a viscosidade das misturas. A mistura com 50% de AEF, mesmo com maior teor de água, apresentou uma diminuição no diâmetro de espalhamento e os tempos de espalhamento e passagem do funil indicam uma viscosidade alta devido à grande quantidade da areia mais fina. Foram realizados todos os ensaios no estado endurecido na mistura AEF50 embora o traço tenha sido modificado.

4.2.2 Propriedades do CAA no estado endurecido

4.2.2.1 Resistência à compressão

As misturas de CAA foram calculadas para f_{ck} 40 Mpa e foram avaliadas as resistências à compressão aos 7, 28 e 90 dias de cada mistura. Segundo AITCIN (2004) a mistura AEF10 é classificada como Classe I, ou seja, concreto de alto desempenho com resistência à compressão entre 50 e 75 MPa. As misturas AEF0, AEF20, AEF30 e AEF40 são classificadas como classe II entre 75 e 100 MPa correspondendo aos valores médios obtidos aos 28 dias, como indica a Figura 46.

Figura 46: Gráfico da resistência à compressão das misturas aos 7, 28 e 90 dias



Pode-se observar na Figura 46 que aos 7 dias houve um aumento da resistência à compressão em relação à mistura de referência com até 30% do resíduo. Aos 28 dias, a resistência à compressão aumentou 17,3% para a mistura 30% de resíduos de areia de exaustão de fundição em relação à referência. Aos 90 dias os corpos-de-prova com 30% de substituição da areia de exaustão da fundição apresentou um aumento de 11,1% em relação à referência. A resistência à compressão para AEF 40 foi próxima à mistura de controle em todas as idades. Os resultados foram melhores do que os encontrados por Siddique, Sandhu (2013) e Parashar *et al* (2020). Ashish, Verma (2021) obtiveram aumento de resistência em todas as misturas até 40%. Ao contrário de Sandhu, Siddique (2019) mostra que houve uma redução na resistência à compressão em todas as idades de teste com a incorporação da Areia Descartada de Fundição no CAA até 30%, sendo que aos 28 dias todas as misturas alcançaram valores superiores a 50 MPa.

Siddique, Sandhu (2013) relataram que a resistência à compressão aumenta com um aumento de até 20% no teor de areia de fundição nas misturas. Aos 28 dias o aumento percentual da resistência à compressão foi de 14,80, 22,73 e 14,26% para as misturas SCC-2 (10%), SCC-3 (15%) e SCC-4 (20%), respectivamente em relação ao SCC-1 mistura de controle (35,06 MPa).

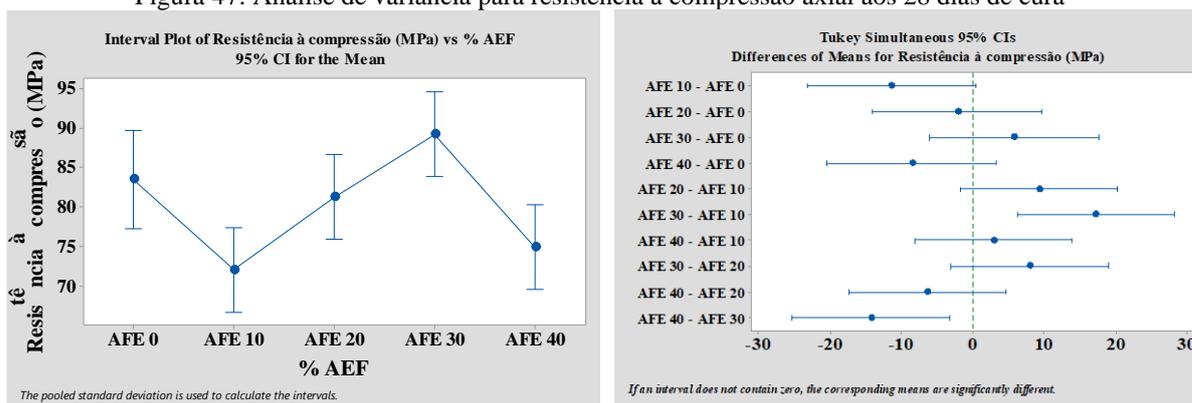
Parashar *et al.* (2020) realizaram um estudo sobre o desempenho do resíduo de areia de fundição como substituição parcial (10, 20, 30 e 40%) do agregado fino no CAA. A resistência à compressão diminuiu com o aumento da areia de fundição. Aos 28 dias, a mistura controle

atingiu 34,4 MPa e as misturas FS10, F20, F30 e FS40 obtiveram resistência inferior em 5,8%, 23,2%, 36,6% e 37,4%, respectivamente, quando comparada à mistura controle. Aos 90 dias, a mistura FS10 apresentou 8,2% de aumento quando comparada a mistura controle enquanto as misturas FS20, F30 e FS40 apresentaram diminuição de 8,9%, 14,6% e 20,6%, respectivamente.

Sandhu, Siddique (2019) conduziu pesquisas sobre as propriedades de resistência do concreto autoadensável incorporando resíduos de areia de fundição. Os agregados finos foram substituídos por 5, 10, 15, 20, 25 e 30% WFS por volume. Houve redução da resistência à compressão com a incorporação do WFS ao CAA em todas as idades. A mistura controle atingiu a força de 58,25 MPa e 63,67 MPa, aos 28 dias e 90 dias, respectivamente. A resistência à compressão sofreu uma perda de 6,38%, 8,19%, 11,18%, 14,25%, 16,05% e 18,76% nas misturas SCC5, SCC10, SCC15, SCC20, SCC25 e SCC30 respectivamente, em comparação com a mistura de controle na idade de teste de 28 dias. Aos 90 dias, a redução percentual da resistência à compressão foi de 6,23%, 9,69%, 12,89%, 16,40%, 18,37% e 22,66% em relação à mistura controle.

Foi realizada uma análise estatística para verificar quais grupos de mistura diferem entre si. A análise estatística dos resultados da resistência à compressão foi realizada apenas para os 28 dias de cura. Então, ao analisar a diferença entre os vários grupos de mistura pela comparação de Tukey, Figura 47, foi possível testar formalmente quais pares de grupos diferem.

Figura 47: Análise de variância para resistência à compressão axial aos 28 dias de cura

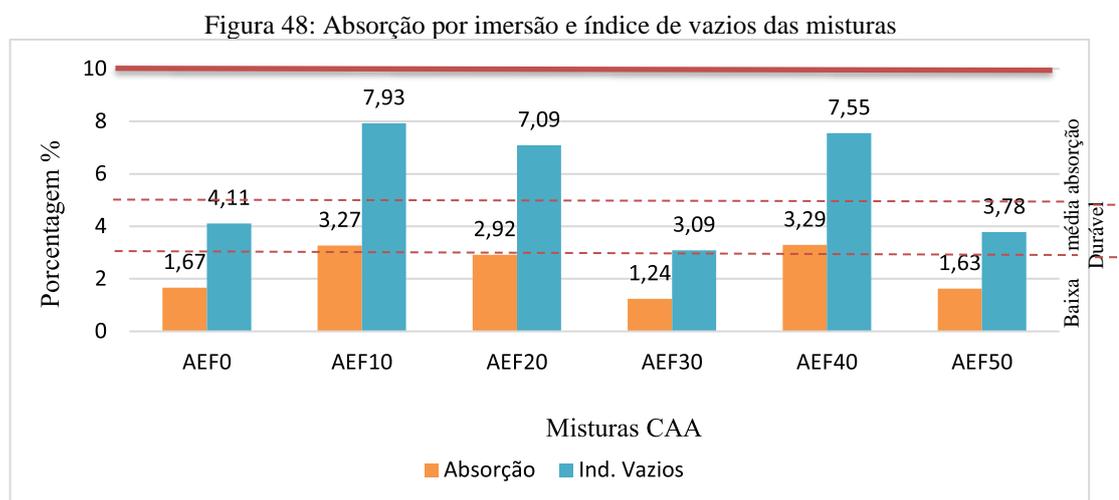


De acordo com a Figura 47, a resistência à compressão variou com a incorporação da areia de exaustão da fundição após 28 dias. Porém, a diferença entre as médias não foi significativa quando comparadas a mistura controle.

4.2.2.2 Absorção por imersão em água

A Figura 48 mostra que houve diminuição do índice de vazios e consequente diminuição da absorção de água com 30% do resíduo em relação a mistura referência. Observou-se que a todas as misturas tiveram características de baixa absorção (menor do que 10%).

Existe uma relação direta entre a durabilidade e a absorção de água e índice de vazios. O aumento de vazios da mistura pode levar a uma maior absorção de água e outros líquidos indesejados. Isso resultará na menor resistência das misturas e ao mesmo tempo diminuirá sua durabilidade. Portanto, o uso de RCMG e até 30% de AEF no CAA diminuiu a absorção de água e a taxa de vazios, provavelmente, aumentando sua durabilidade.

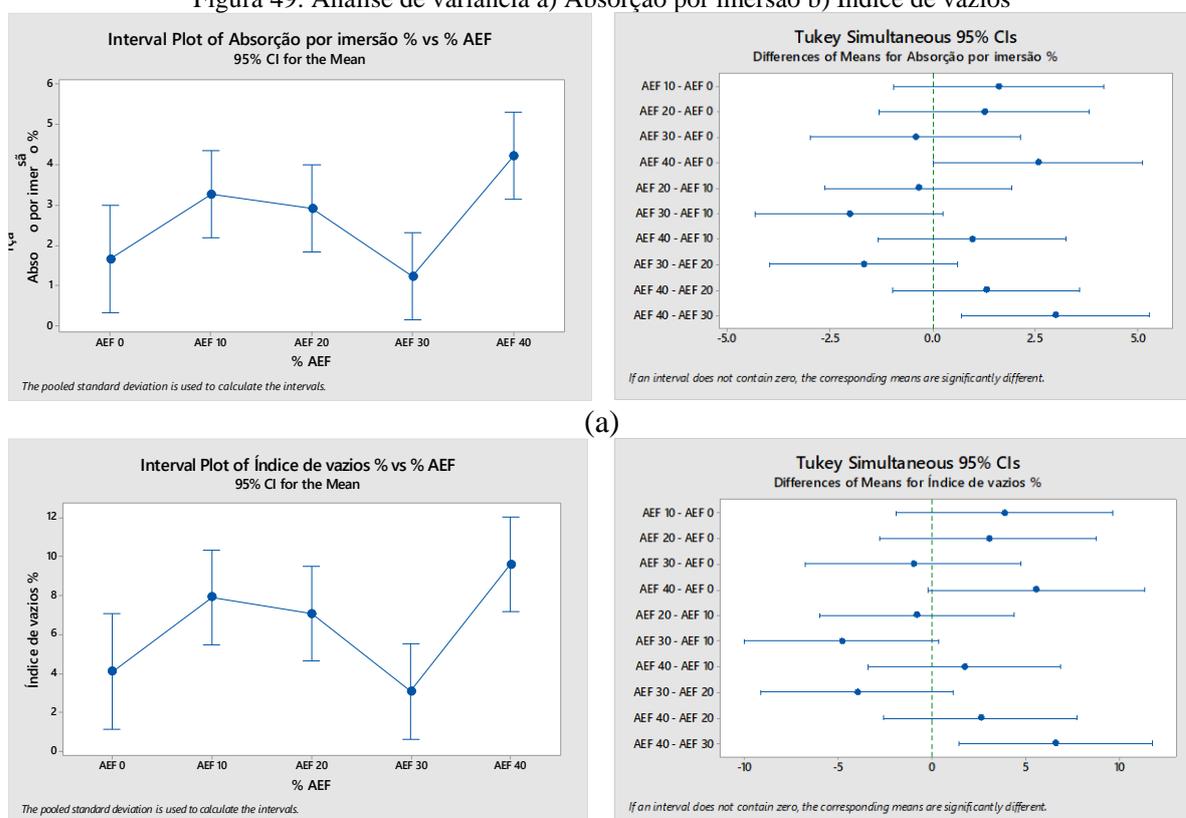


De acordo com Comité Euro-International du Béton (CEB) a absorção de água do concreto pode ser relacionada com a sua qualidade: uma absorção menor do que 3,0% indica um material de boa qualidade e baixa absorção; concretos que apresentam índices de 3,0 a 5,0% são qualificados como de médias absorção e qualidade; os que possuem absorção de água superior a 5,0% são classificados como de alta absorção e baixa qualidade (CEB, 1989). Portanto, verifica-se que as misturas AEF 0, AEF 20, AEF 30 e AEF 50 podem ser enquadrados na categoria de baixa absorção e boa qualidade, as misturas AEF 10 e AEF 40 se enquadram como media absorção e media qualidade conforme a classificação proposta pelo CEB (CEB, 1989). Ainda em função da absorção de água, de acordo com Helene (1983), é possível classificar os concretos como duráveis quando a taxa de absorção menor que 4,2%, normais para a absorção entre 4,2% e 6,3% e deficientes quando a taxa absorção é maior que 6,3%. Por

este critério todas as misturas podem ser classificadas como duráveis. Além disso observa-se um aumento da absorção de 95,81%, 74,85%, 97,00% nas misturas AEF10, AEF20 e AEF 40 respectivamente e uma redução de 25,75% para a mistura AEF30 em relação a AEF0. Siddique, Kadri (2011) afirmam que areia usada de fundição (AUF) preenche os poros e reduz a absorção de água. No caso destes autores a maior taxa de absorção foi de 8,2% na mistura com 20% de areia de fundição. Na pesquisa de Parashar *et al.* (2020) foi observado aumento da absorção de água com o aumento do resíduo em até 40% ADF aos 28 dias e atribuem este resultado ao aumento da conectividade entre os poros. Gurumoorthy, Arunachalam (2019) observaram uma diminuição na absorção de água com um aumento do teor de TUFs quando comparado ao concreto controle. A porcentagem de absorção de água variou entre 3,47% e 3,72% aos 28 dias. Assim como neste estudo, o melhor resultado de reposição de 30% foi considerado muito eficaz na redução da absorção de água.

Para avaliar a significância das diferenças entre os resultados aplicou-se a análise de variância mostrados na Figura 49.

Figura 49: Análise de variância a) Absorção por imersão b) Índice de vazios

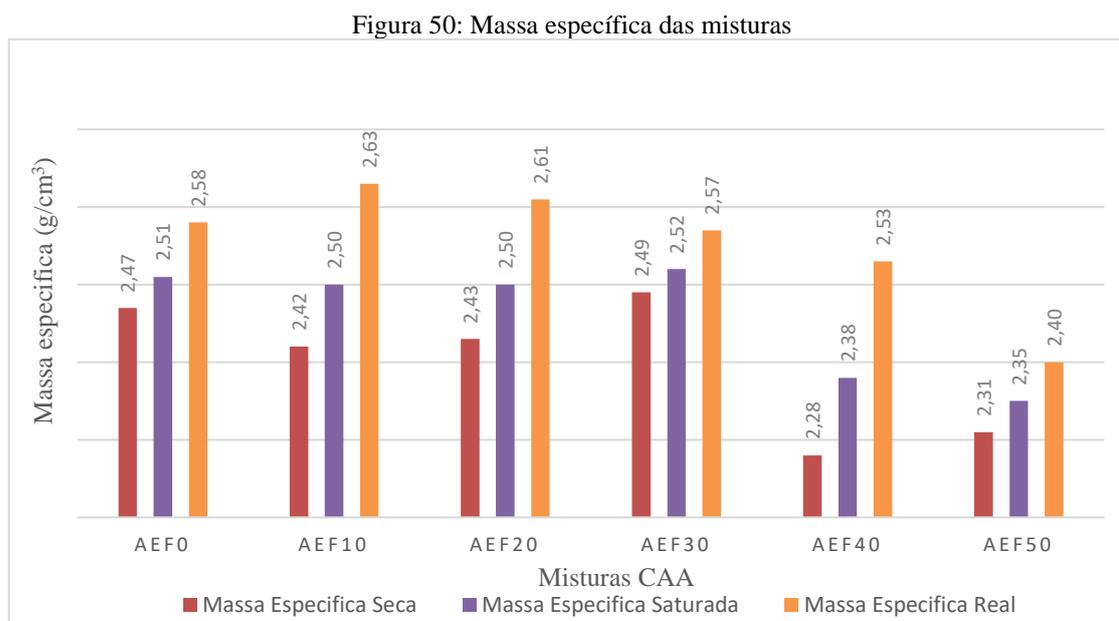


(a)

(b)

Os resultados mostram que as diferenças dos resultados das misturas apresentadas nos testes de absorção por imersão e índice de vazios não foram significativas em relação a mistura controle.

Deste ensaio foram obtidas as massas específicas seca, saturada e real das misturas, como demonstrado na Figura 50.



Nota-se na Figura 50 também que houve uma alteração de mais ou menos 1,9% nas massas específicas das misturas com até 40% de AEF em relação a referência, porém a mistura com 30% de AEF teve resultados muito próximos a referência.

Este resultado está de acordo com Gurumoorthy; Arunachalam (2019) os quais concluíram que as misturas ficaram mais densas com a adição do resíduo de fundição até 30%.

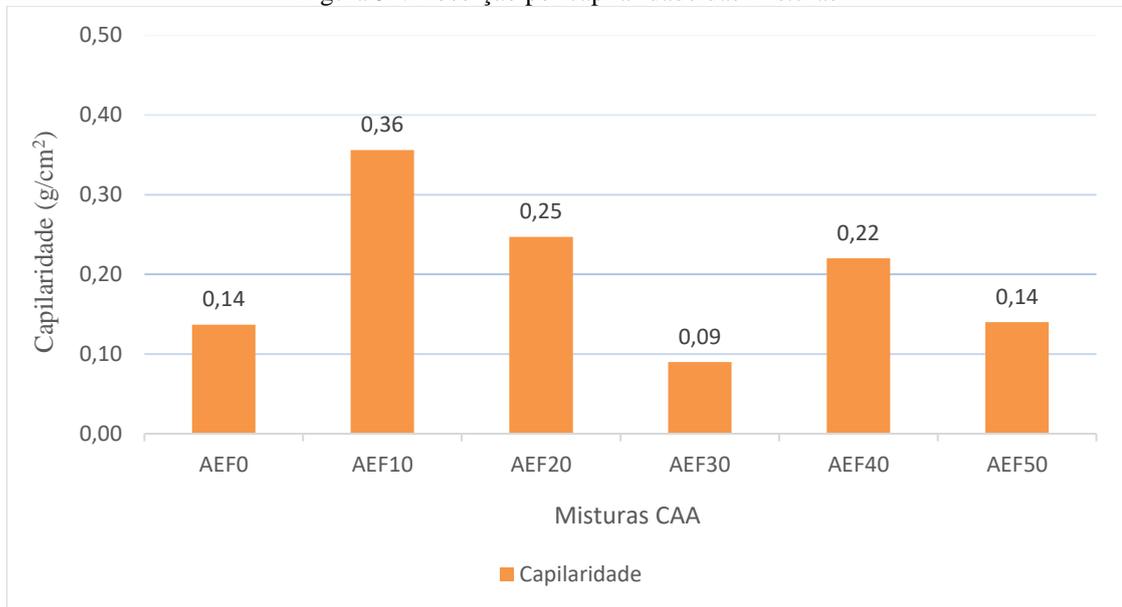
4.2.2.3 Absorção por capilaridade

A evolução da água absorvida por capilaridade foi analisada após 3, 6, 24, 36 e 72h, a qual foi determinada pelo aumento de massa dos corpos de prova. No entanto a Figura 51 apresenta as médias da absorção final de cada mistura.

Esta propriedade está relacionada com a porosidade dos concretos. Quanto mais porosa a matriz do concreto, mais água será absorvida, sendo um dos fatores determinantes para a vida útil das estruturas. Nas misturas AEF 10, AEF20, AEF40 e AEF50 houve aumento da absorção por capilaridade em relação a mistura referência. Este efeito desfavorável pode ser devido ao

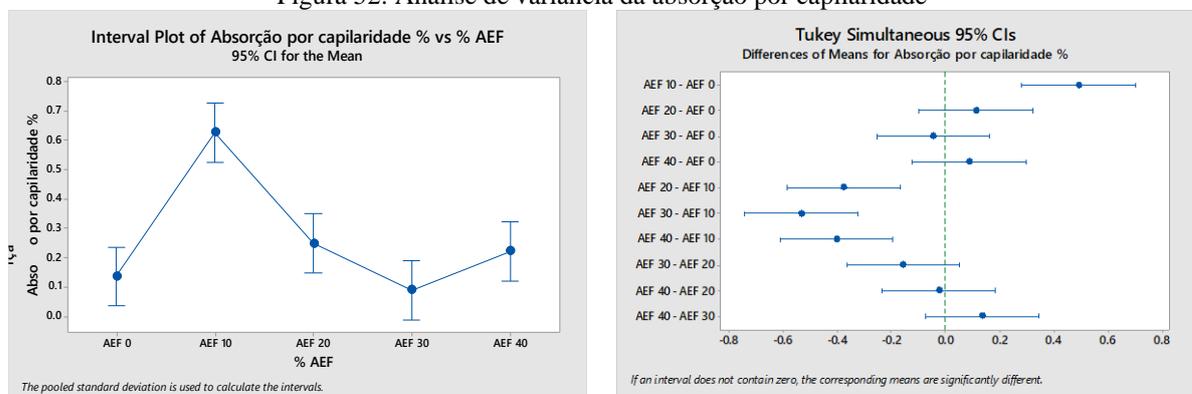
menor empacotamento das partículas de AEF nas substituições de 10, 20, 40 e 50% da areia natural.

Figura 51: Absorção por capilaridade das misturas



Observou-se que nas misturas AEF10, AEF20 e AEF40 a capilaridade foi aumentada e que a areia de exaustão de fundição desempenha um papel na redução da sucção capilar da mistura AEF 30 que apresentou 38,9% menor em comparação com a mistura referência. Provavelmente houve uma redução na conectividade entre os poros. Este resultado está de acordo com o ensaio de absorção por imersão em água. A significância deste resultado foi avaliada como indica na Figura 52.

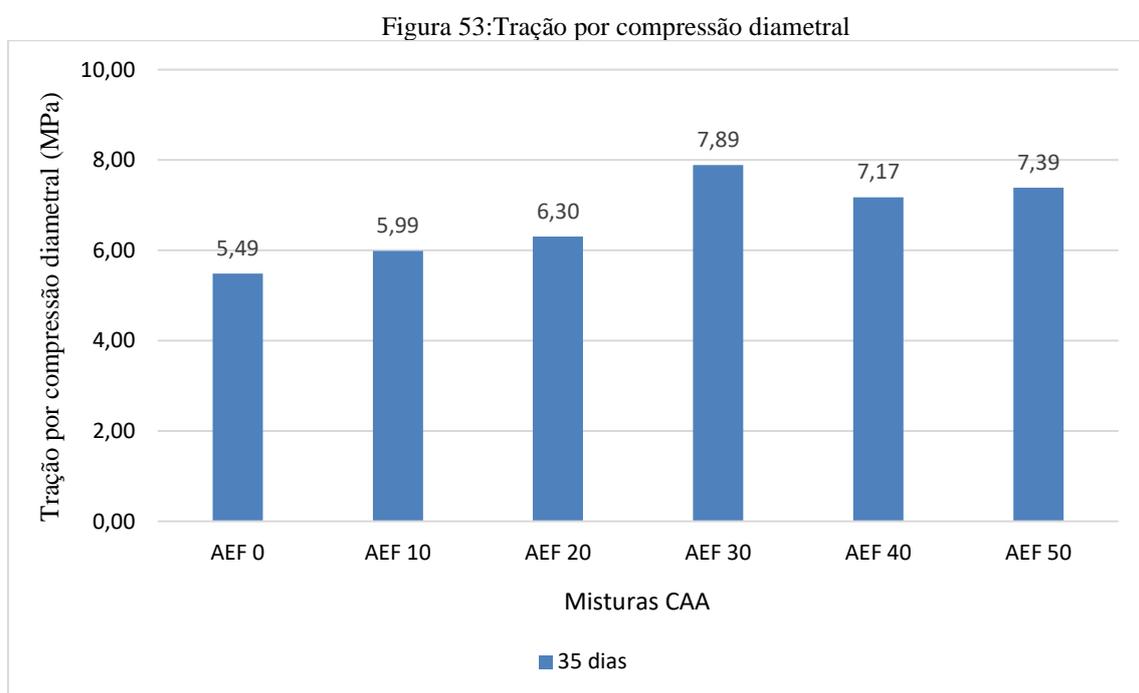
Figura 52: Análise de variância da absorção por capilaridade



As substituições de 20, 30 e 40% não tiveram efeito significativo sobre a capilaridade do concreto, mas a substituição de 10% levou a um aumento significativo no coeficiente de capilaridade em relação a mistura sem AEF.

4.2.2.4 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados da influência da AEF na resistência à tração por compressão aos 35 dias estão demonstrados na Figura 53.



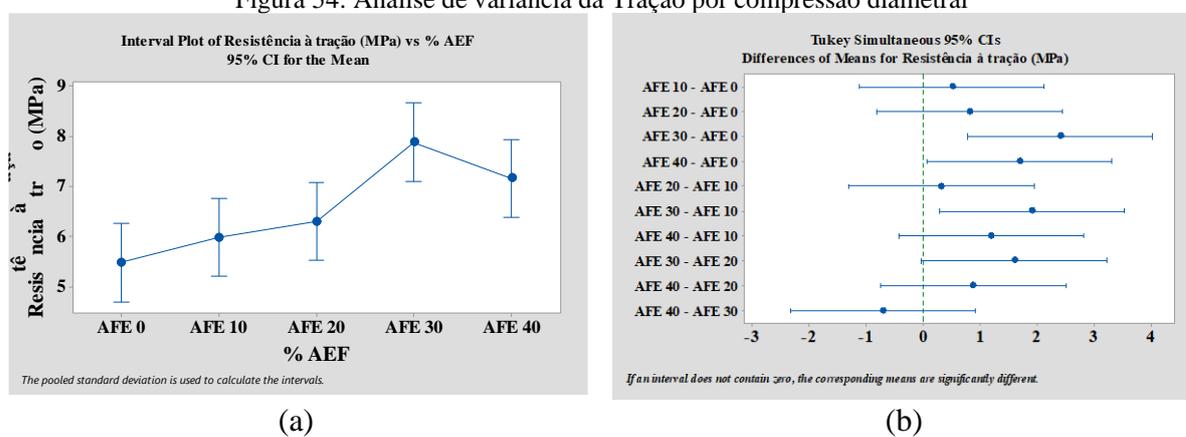
A Figura 53 ilustra o efeito da AEF como substituição da areia natural na resistência à tração por compressão diametral do CAA. Observou-se um aumento da resistência a tração em todas as misturas com AEF em relação a mistura controle. Os aumentos foram de 9,11%; 14,85%; 43,77%; 30,71% e 34,63% para as misturas com 10, 20, 30, 40 e 50% de AEF. A influência do AEF na resistência à tração pode ser descrita por uma função linear, ou seja:

$y = 0,0418x + 5,657$, com $R^2 = 0,7215$ indicando uma alta correlação, onde x é a porcentagem de AEF e y é a resistência à tração por compressão diametral. A significância dos resultados foi analisada conforme mostra a Figura 54.

Os valores de resistência à tração por compressão da mistura controle (SCC0) encontrados por Sandhu, Siddique (2019) foram 4,19 MPa, 4,56 MPa, 5,27 MPa e 5,41 MPa aos 7, 28, 90 e 365 dias de cura, respectivamente. Aos 28 dias de cura, a resistência à tração por

compressão mostra um decréscimo com o aumento de até 30% ADF, ou seja, 3,63%, 4,69%, 6,44%, 8,28%, 9,36% e 11,03% para 5,10,15,20,25 e 30% ADF respectivamente. As misturas de controle exibem valores máximos de resistência à tração em todas as idades de cura. Pathak e Siddique (2012) demonstraram que a resistência à tração por compressão diminuiu com a utilização de areia descartada de fundição nas misturas de CAA. Siddique et al. (2009) estudaram as propriedades de misturas de concreto em que o agregado miúdo foi parcialmente substituído por (10%, 20% e 30%) de AUF. A resistência à tração de misturas de concreto foi medida nas idades de 7, 28, 56, 91 e 365 dias. A resistência à tração na ruptura das misturas de concreto aumentada com o aumento do teor de UFS em todas as idades. Os estudos de Siddique, Sandhu (2013) apresentaram os resultados da resistência à tração por compressão nas misturas com 10, 15 e 20% de AEF realizados aos 7, 28 e 56 dias de idade. A resistência à tração por compressão das misturas de CAA aumentou com o aumento do teor de ADF. Na idade de 28 dias, o aumento foi de 15,14%, 23,94 e 16,55% para as misturas de concreto 10%, 15% e 20% de ADF, respectivamente, quando comparados a mistura controle (2,84 MPa). Observou-se que a mistura de concreto com 15% ADF apresentou maior valor de resistência à tração por compressão entre todas as misturas.

Figura 54: Análise de variância da Tração por compressão diametral



Um aumento significativo da resistência a tração foi observado nas misturas AEF 30 e AEF 40 quando comparadas a mistura AEF 0.

4.2.2.5 Resistência aos sulfatos

Quatro corpos de prova de cada mistura permaneceram na solução de sulfato de magnésio (FIGURA 55), 5% $MgSO_4$, por 180 dias, sendo renovada a cada 30 dias. Outros quatro corpos de prova foram mantidos em água.

Figura 55: Amostras de cada mistura imersas no sulfato



Fonte: Acervo próprio do autor

Nesse período, verificou-se o aparecimento de manchas esbranquiçadas nas superfícies dos quatro corpos de prova (FIGURA 56) mantidos na solução de sulfato. Não foram observadas trincas causadas devido à geração de produtos expansivos, como sulfato de cálcio (Gipsita) e sulfoaluminato de cálcio (etringita).

Figura 56: Análise visual dos corpos de prova a) AEF 0 b) AEF 10 c) AEF 20 d) AEF 30 e) AEF40



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Fonte: Acervo próprio do autor

As manchas das amostras AEF 0 (referência), AEF 20, AEF 30 e AEF 40 apareceram aos 120 dias e das amostras AEF 10 aos 90 dias.

Gil, Siddique (2018) confirmaram que a formação de sulfoaluminato de cálcio (etringita) depende da reação entre alumina (Al_2O_3) e sulfato (SO_4) e da proporção dos dois compostos. É possível que a combinação da sílica ativa, do resíduo de mármore e granito e da AEF resultaram em um menor teor de alumina e um maior teor de sílica.

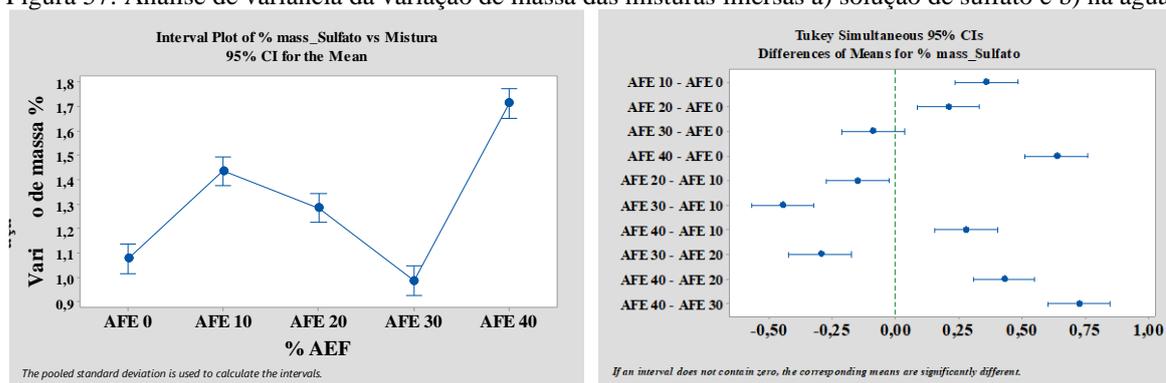
Houve uma pequena porcentagem de variação de massa como mostra a Tabela 32.

Tabela 32: Variação de massa das amostras mantidas em Sulfato e água (%)

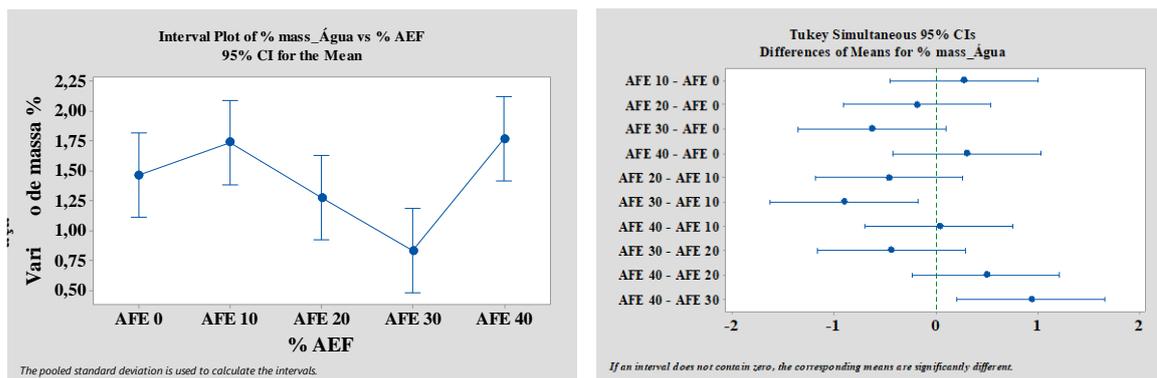
Misturas de CAA	Sulfato	Água
AEF 0	1,08	1,47
AEF 10	1,41	2,03
AEF 20	1,29	1,27
AEF 30	0,99	0,84
AEF 40	1,71	1,77
AEF 50	-0,50	-0,66

Houve ganho de massa nas amostras das misturas AEF 0, AEF 10, AEF 20, AEF 30 e AEF 40 mantidas em solução de sulfato de magnésio e na água. Na mistura AEF 50 houve perda de massa. A Figura 57 compara as médias das misturas para avaliar a significância das diferenças.

Figura 57: Análise de variância da variação de massa das misturas imersas a) solução de sulfato e b) na água



(a)

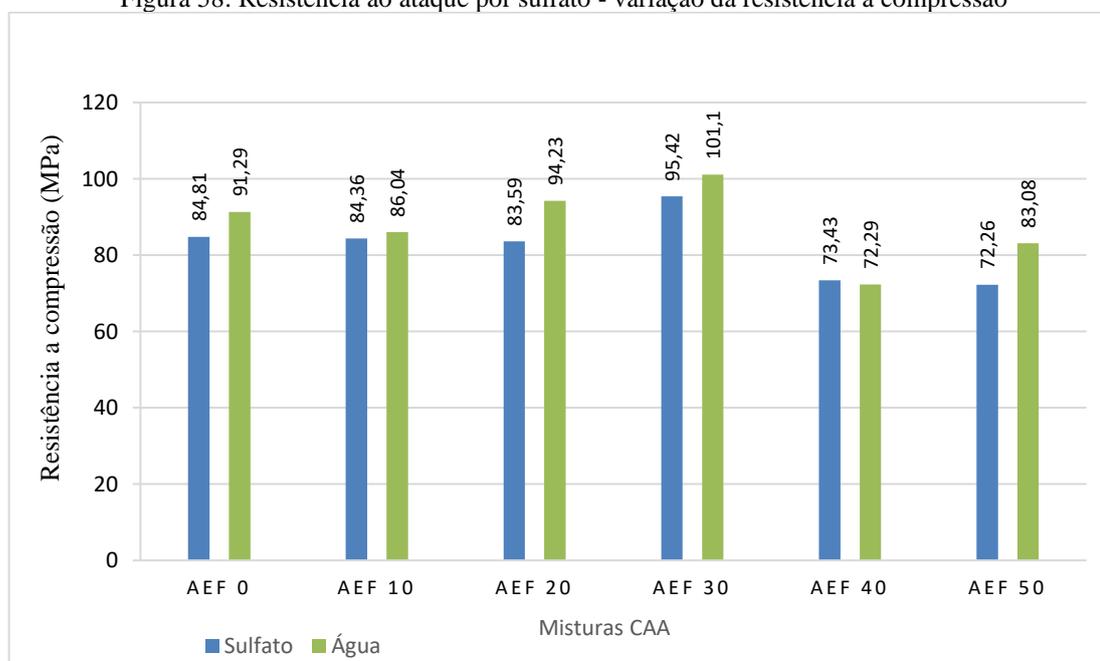


(b)

A Figura 57a mostra um ganho de massa significativo nas misturas AEF 10, AEF 20 e AEF 40 em relação a mistura AEF 0 quando mantidas em solução de sulfato que pode ser explicado pela formação da gipsita. Nas amostras mantidas em água o ganho de massa de todas as misturas não foi significativo quando comparadas a mistura controle como mostra a Figura 56b.

O aumento ou diminuição da resistência à compressão após a imersão na solução de $MgSO_4$ em comparação com a resistência à compressão da amostra curada em água é dado na Figura 58.

Figura 58: Resistência ao ataque por sulfato - variação da resistência à compressão



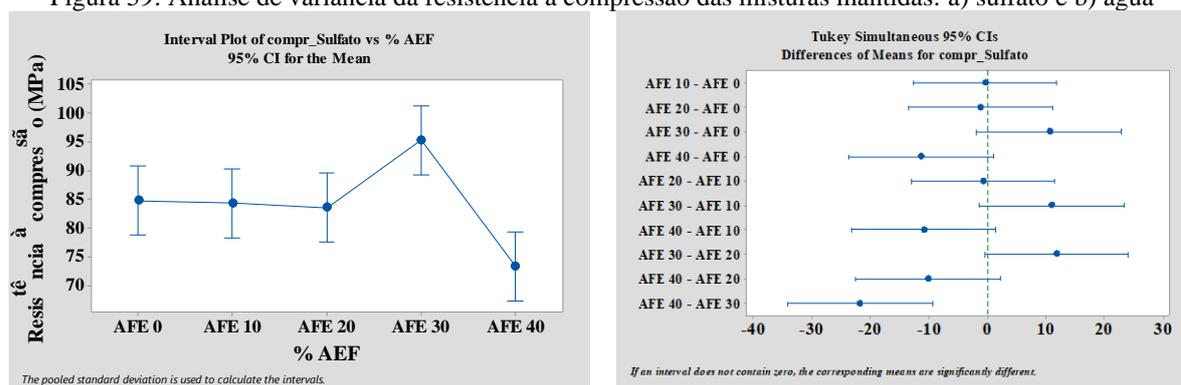
Comparando os resultados entre as diferentes misturas mantidas em água, observa-se que houve aumento de 10,75% da resistência a compressão das amostras da mistura AEF 30,

enquanto a resistência da mistura AEF40 apresentou um decréscimo de 20,81% em relação a mistura AEF0. Nas misturas mantidas em solução de sulfato de magnésio houve redução de resistência em relação a referência em todas as misturas com exceção da mistura com 30% AEF que apresentou um aumento de 12,51%. Prabhu *et al.* (2015) analisaram a resistência aos sulfatos aos 180 dias e afirmaram que o sulfato de magnésio aumenta a formação da etringita causando a deterioração do concreto.

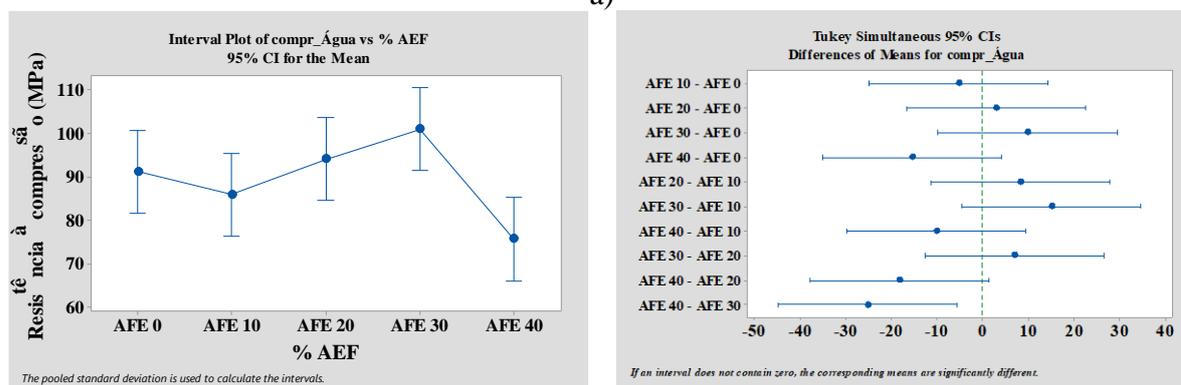
Siddique, Sandhu (2013) observaram que para a mistura de CAA contendo 10% de areia de fundição houve aumento da resistência em relação à mistura controle, mesmo após imersão das amostras em solução de sulfato de magnésio. Porém, para os níveis de substituição de 15% e 20%, há diminuição da resistência em relação ao concreto padrão, em todas as idades após imersão na solução sulfatada. Xu *et al.* (2013) avaliaram a resistência ao ataque aos sulfatos em concreto de alto desempenho. Os autores relataram que houve um aumento da resistência a compressão até aos 90 dias de exposição ao sulfato e depois começou a diminuir. Segundo os autores esse comportamento pode ser atribuído inicialmente ao bloqueio dos poros por materiais expansivos formados pela reação dos íons sulfato com produtos de hidratação de cimento. Quando os poros não podem acomodar a expansão do material ocorrem as fissuras e conseqüentemente a redução da resistência. Singh, Siddique (2016) analisaram o CAA contendo escória de ferro (0, 10, 25 e 40%) em substituição ao agregado miúdo. Os autores observaram que a perda de resistência à compressão aumentava com o aumento do tempo de imersão. Após 365 dias de imersão em solução de sulfato de magnésio observou-se que a perda de resistência à compressão foi de 15% 16,27%, 16,31% e 16,25% na substituição de 0%, 10, 25 e 40% respectivamente. De acordo com Gurumoorthy, Arunachalam (2019), nas amostras imersas na de solução de sulfato de sódio a porcentagem de perda de peso diminui com o aumento da areia de fundição usada tratada de R10 para R30 e ligeiramente aumentada de R40 aos 7, 28, 56 e 90 dias em relação a R30. A porcentagem de perda de peso do R30 é de 0,02%, 0,11%, 0,6% e 0,69% em 7, 28, 56 e 90 dias, respectivamente, o que é menor que o controle de concreto e outras misturas contendo areia usada de fundição tratada. Isso mostra que o R30 é ótimo em comparação com as demais substituições. A perda máxima percentual na resistência à compressão foi observada para o CC em 1,95% aos 90 dias e para o R30 foi de 1,51% aos 90 dias. Os autores, *opus cit.*, afirmaram que a areia de fundição usada tratada como material de substituição no concreto aumenta a resistência ao sulfato do concreto.

A análise estatística dos resultados de resistência à compressão das amostras imersas em solução de sulfato e em água é dada na Figura 59a e 59b respectivamente.

Figura 59: Análise de variância da resistência a compressão das misturas mantidas: a) sulfato e b) água



a)



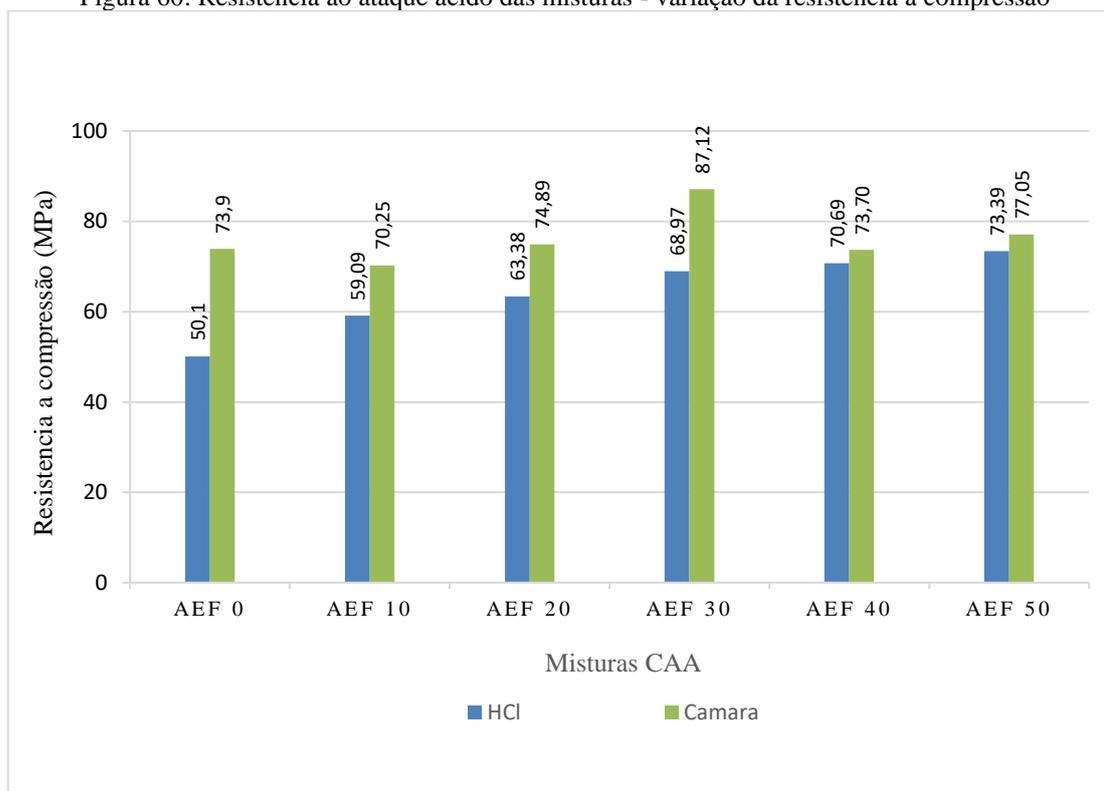
b)

Esta análise mostra que não houve diferença significativa, entre as misturas em relação a referência, nas amostras mantidas em água e nem nas amostras mantidas em sulfato.

4.2.2.6 Resistência ao ataque ácido

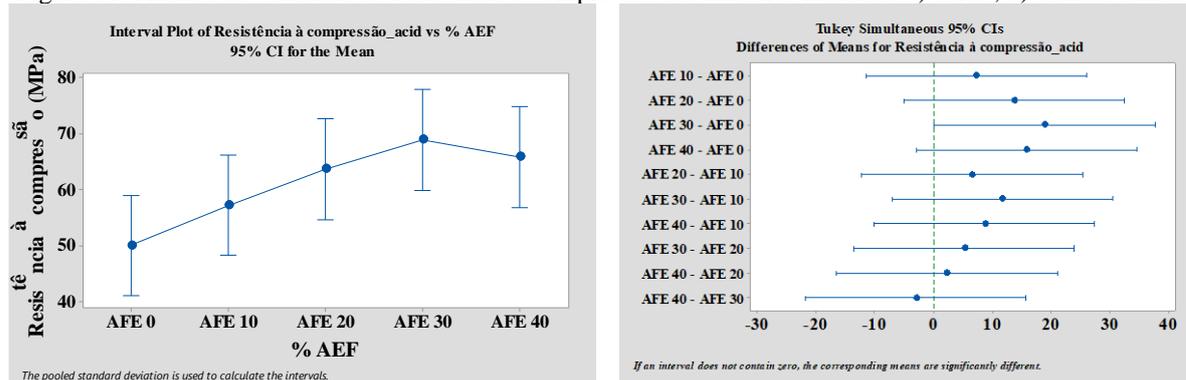
A resistência contra o ataque ácido das amostras de concreto foi avaliada medindo a redução da resistência à compressão e perda de massa dos corpos-de-prova imersos em solução de ácido clorídrico (HCl) a 3% por 1800 h. Os corpos de prova permaneceram imersos em ácido clorídrico, HCl, por um período de 75 dias e depois foram submetidos à compressão e comparados aos corpos de prova que permaneceram na câmara úmida (FIGURA 60).

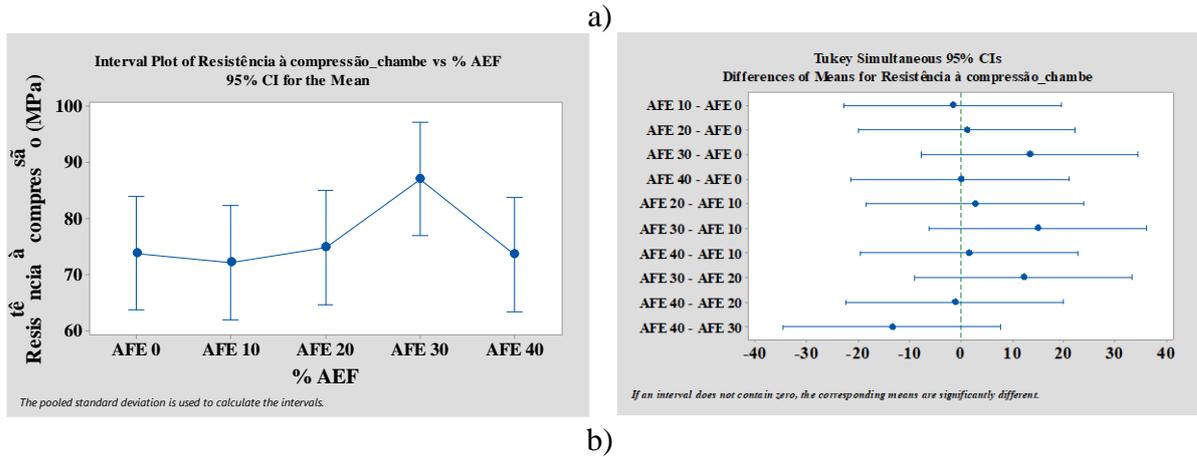
Figura 60: Resistência ao ataque ácido das misturas - variação da resistência à compressão



Observou-se que as amostras mantidas em solução ácida apresentaram menor resistência à compressão do que as amostras mantidas em câmara úmida. A resistência à compressão aumentou 17,94%, 26,51%, 37,66% e 41,09% com o aumento do resíduo de 10%, 20%, 30% e 40% respectivamente, entre as amostras que sofreram o ataque ácido, em comparação com a mistura controle. Isto pode ser devido ao aumento na finura e o conteúdo de sílica levando a um concreto durável em exposição a ácido, HCl. Um aumento de 17,89% foi alcançado na mistura AEF 30 em relação a AEF 0 mantidos na câmara úmida. No entanto, esses resultados foram avaliados por análise de variância, conforme mostrado na Figura 61.

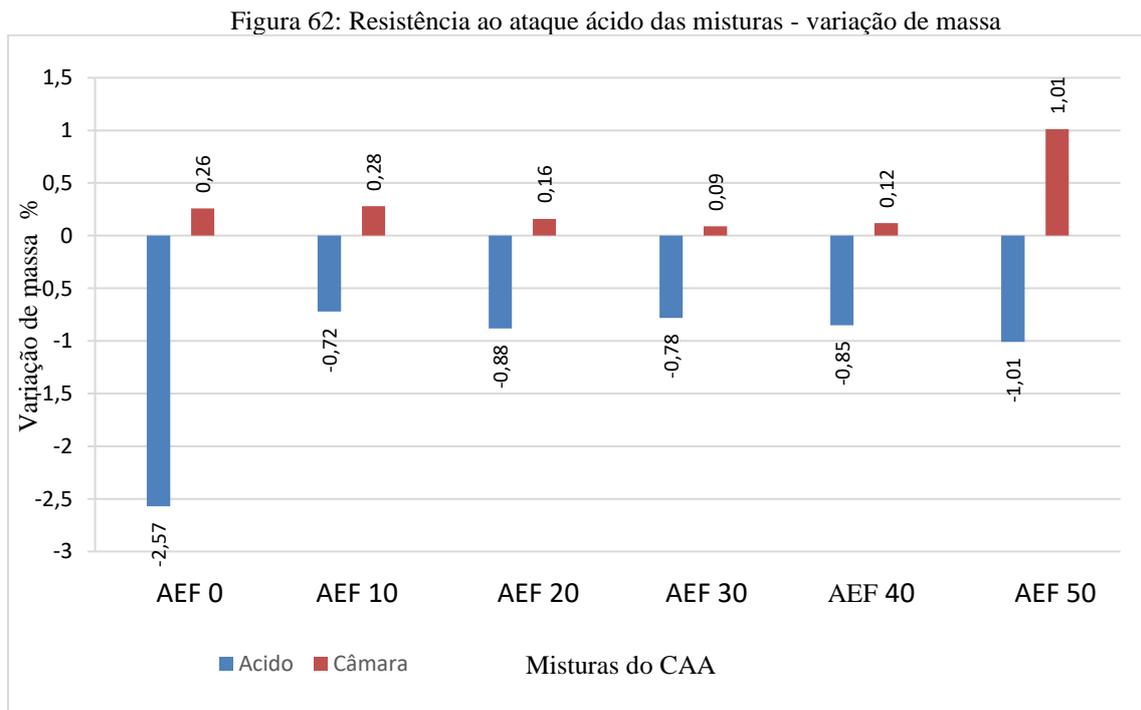
Figura 61: Análise de variância da resistência a compressão das misturas mantidas a) ácido; b) câmara úmida





De acordo com a Figura 60, pode-se concluir que as diferenças nas resistências à compressão das amostras mantidas em solução de HCl e em câmara úmida não foram significativas. Gurumoorthy, Arunachalam (2019) relataram que a perda de resistência do concreto controle foi de 33,5% enquanto na mistura R30 que foi de 24,53% após 90 dias no ácido HCl.

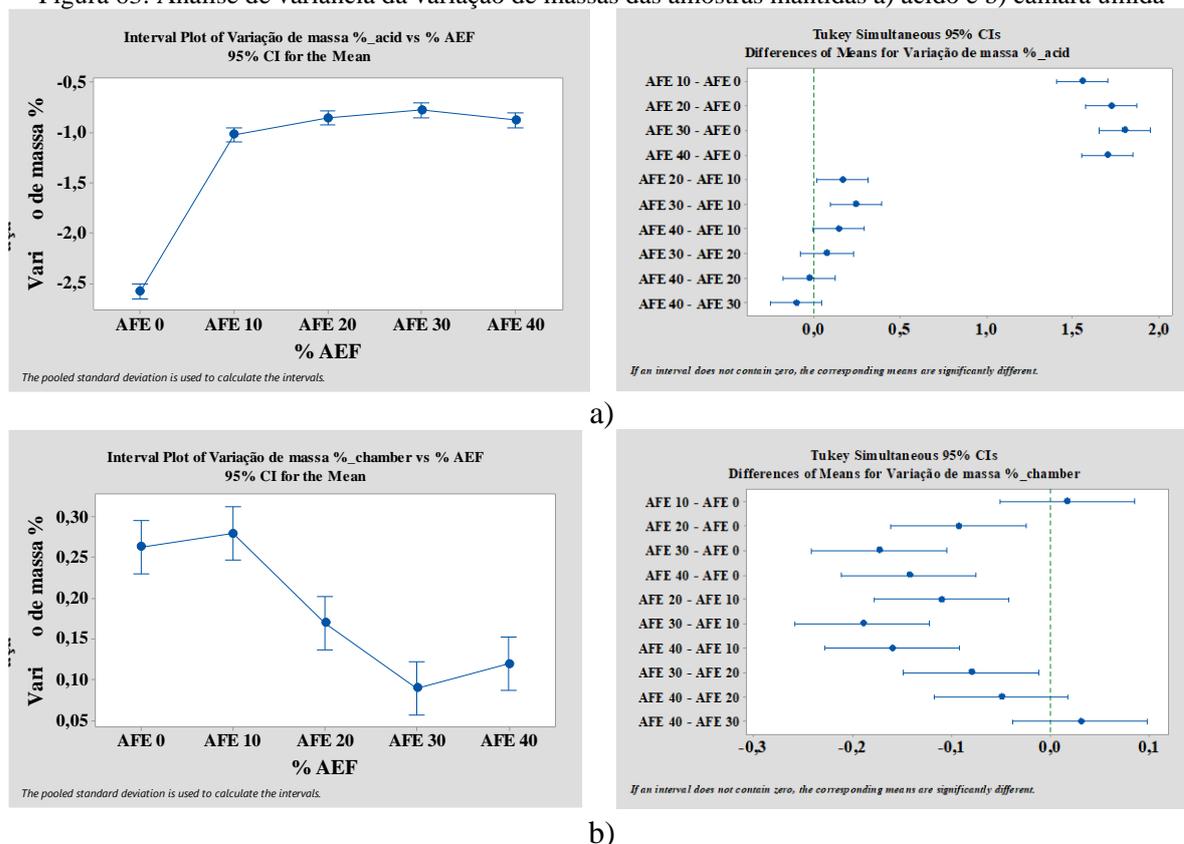
Juntamente com a porcentagem de perda de resistência à compressão, a porcentagem de perda de peso também foi encontrada nas amostras mantidas em solução de HCl e os resultados foram plotados contra o teor de AEF na Figura 62.



O ensaio de resistência ao ácido revelou que a perda máxima de massa foi observada no concreto referência e, além disso, a mistura AEF30 apresentou menor variação de massa nas amostras mantidas em câmara úmida. Maruthachalam *et al.* (2011) afirmam que a redução da porosidade do concreto é o motivo da diminuição da perda de massa. De acordo com a presente pesquisa a mistura AEF 10 apresentou maior índice de vazios que a mistura AEF 30 e, no entanto, a variação de massa desta foi maior que da mistura AEF 10. Todavia todas as misturas tiveram variações menores do que a da mistura controle porque a Areia de Exaustão de Fundição é mais fina que a areia natural que preenche os poros. Gurumoorthy, Arunachalam (2019) observaram que no caso de ambiente ácido HCl a perda de peso percentual máxima é de 4,32% em 90 dias para o concreto controle que é maior em comparação com 3,85% para a mistura com 30% de areia de fundição usada (R30) em 90 dias.

A análise estatística dos resultados da variação de massa de amostras imersas em solução ácida e em câmara úmida é dada na Figura 63a e 63b, respectivamente

Figura 63: Análise de variância da variação de massas das amostras mantidas a) ácido e b) câmara úmida



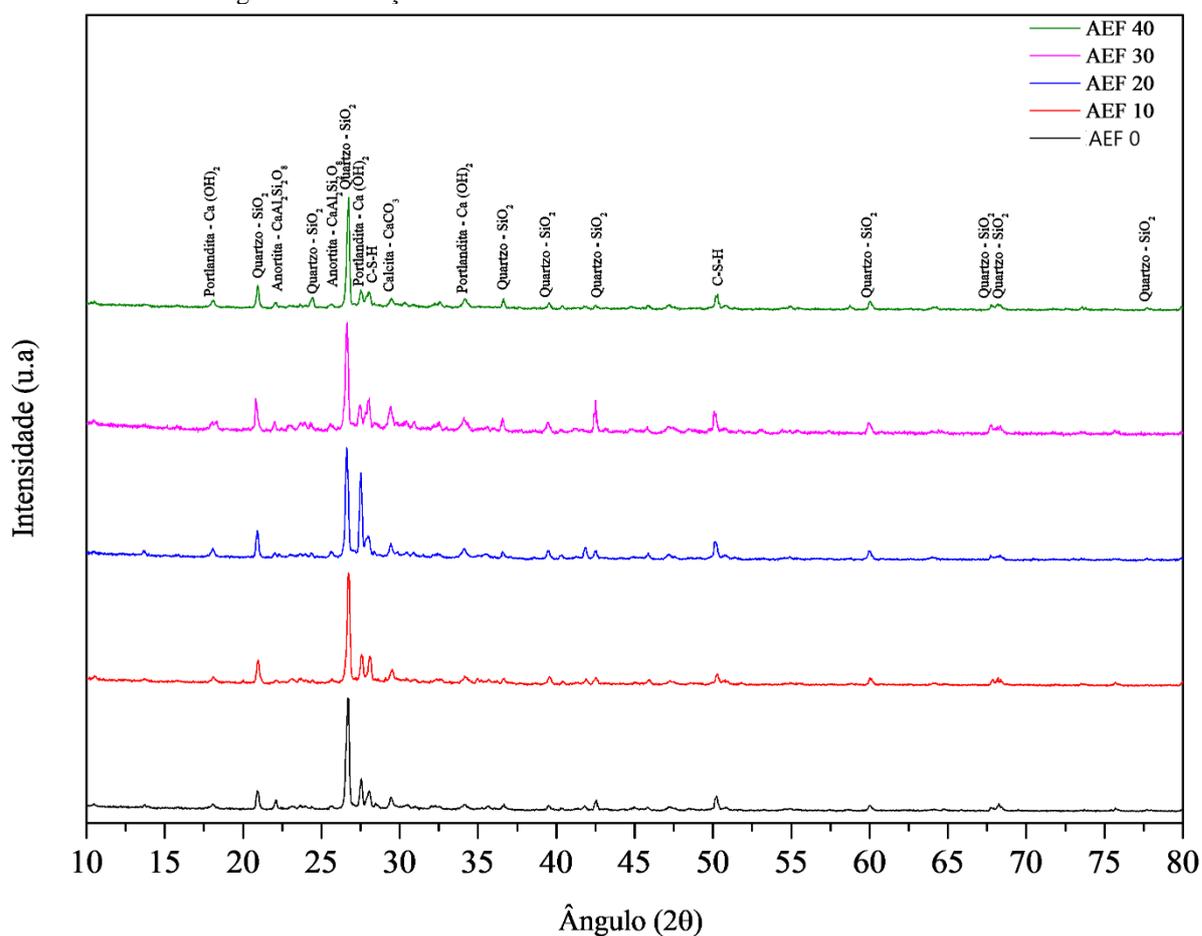
A análise de variância para os resultados da variação de massa de amostras imersas em solução ácida mostra que ocorreu perda de massa significativa da mistura AEF0 (2,57%)

enquanto que nas amostras com AEF (10, 20, 30 e 40%) a perda de massa não foi significativa. No entanto o ganho de massa das amostras AWF 20, AEF 30 e AEF 40 foi significativamente menor que nas amostras AEF0 e AEF 10 mantidas em câmara úmida.

De acordo com Maruthachalam *et al.* (2011) o ataque com ácido causa a lixiviação dos compostos de cálcio do cimento, causando uma diminuição na resistência e durabilidade.

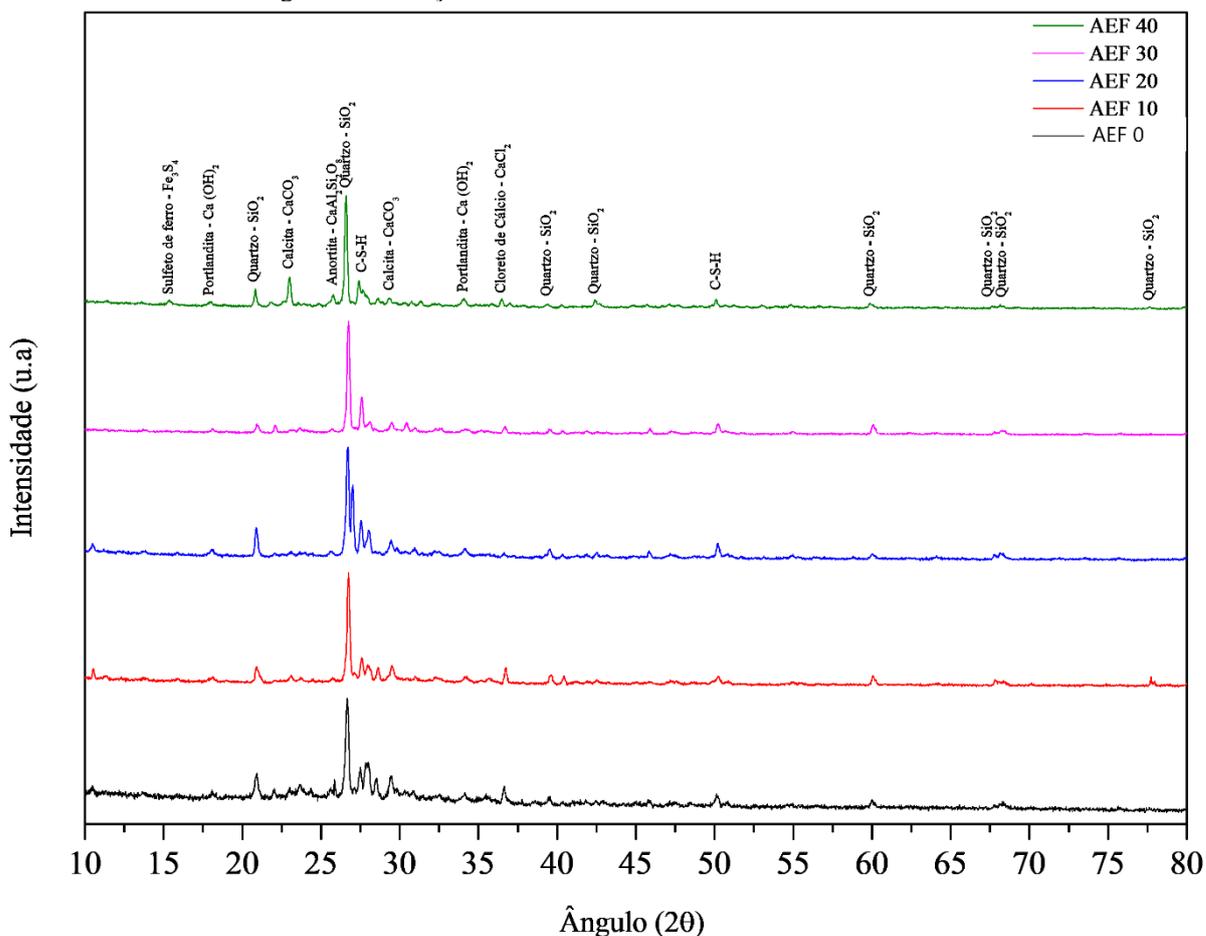
A técnica de Difração de raios-X (DRX) foi realizada para analisar os componentes de misturas de concreto mantidas em câmara úmida e submetidas ao ataque ácido. Os resultados são mostrados nas Figuras 64 e 65.

Figura 64: Difração de raios X das misturas mantidas em câmara úmida.



Foram identificados os compostos resultantes da hidratação do cimento como a Portlandita (Ca(OH)_2), a calcita (CaCO_3), anortita ($\text{Ca Al}_2 \text{SiO}_3$), C-S-H ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e picos intensivos de Quartzo (SiO_2) devido à grande quantidade de agregados miúdos, tanto da areia natural quanto da areia de exaustão de fundição.

Figura 65: Difração de raios X das misturas mantidas em ácido.



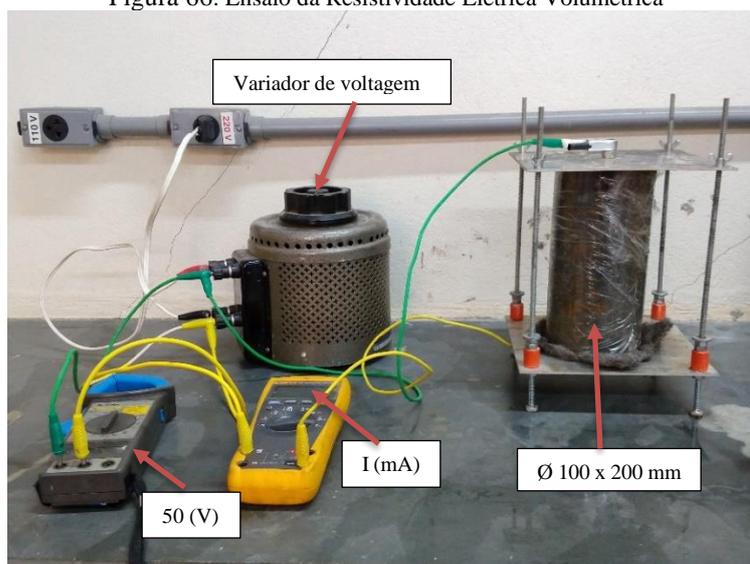
Nas amostras submetidas a solução de ácido foi identificado o Cloreto de cálcio (Equação 15), que é um sal solúvel e portanto pode ser lixiviado provocando o aumento da porosidade do concreto e a consequente diminuição da resistência a compressão.



4.2.2.7 Resistividade elétrica volumétrica

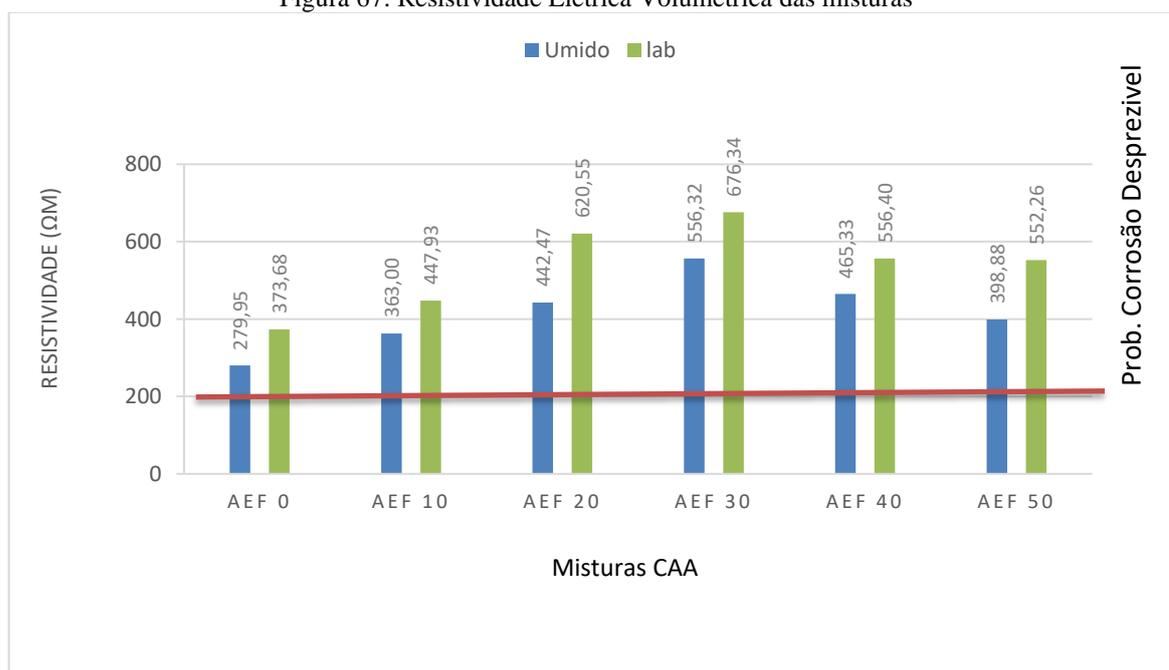
A resistividade elétrica foi avaliada nas amostras mantidas na câmara úmida e em ambiente do laboratório aos 28 dias conforme a Figura 66 e os resultados estão apresentados na Figura 67.

Figura 66: Ensaio da Resistividade Elétrica Volumétrica



Fonte: acervo próprio do autor

Figura 67: Resistividade Elétrica Volumétrica das misturas

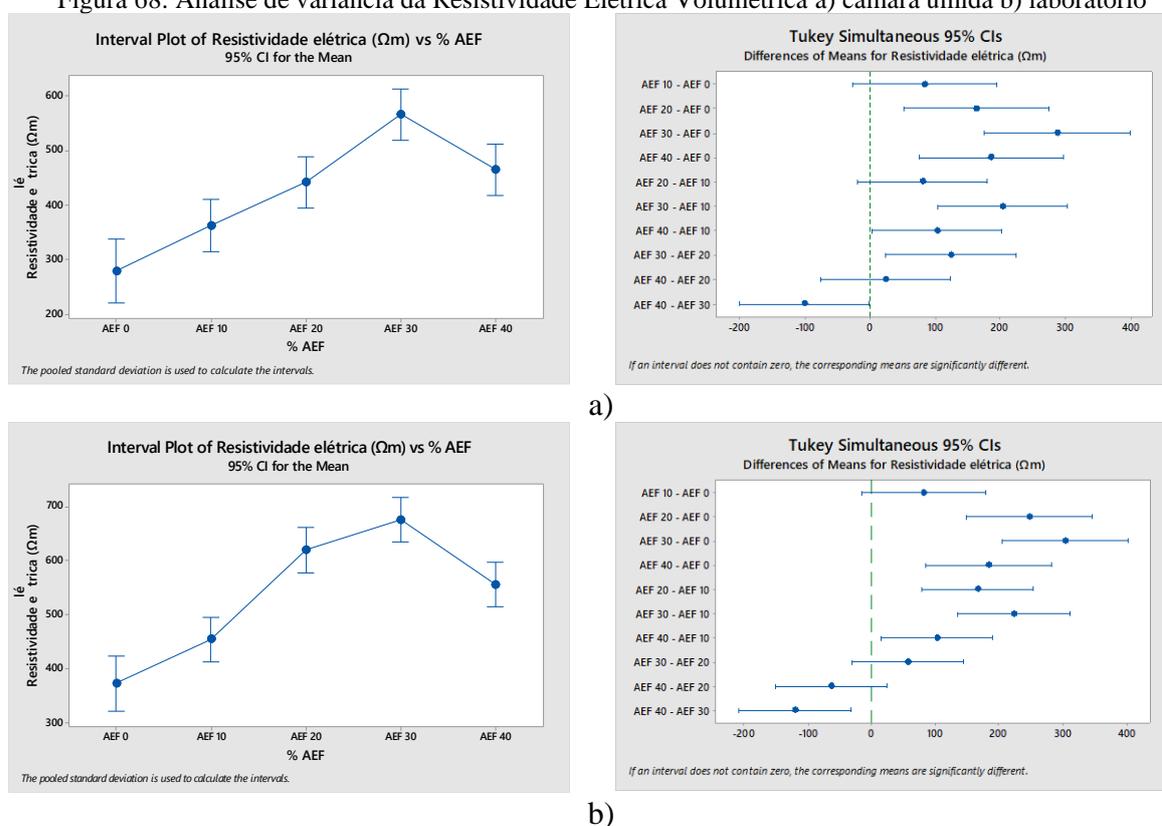


Observa-se que a resistividade elétrica das misturas AEF10, AEF20, AEF30 e AEF40 aumentou em 29,67%, 58,05%, 98,72% e 66,22% para as amostras mantidas na câmara úmida e aumentou 19,87%, 66,06%, 80,99% e 48,90% para as amostras mantidas em ambiente de laboratório respectivamente em relação ao concreto AEF0. Notando que o melhor resultado foi alcançado com 30% de AEF. Isto devido ao fato de que tanto o RCMG quanto a AEF deixaram a matriz mais densa. Além disso a resistividade nas amostras mantidas em laboratório foi maior

pelo fato de que o material úmido tem maior condutividade elétrica. Todas as misturas apresentaram resistividade elétrica $> 200 \Omega\text{m}$ o que significa que a probabilidade de ocorrer corrosão é desprezível. Segundo Polder (2001) quanto maior a resistividade menor a penetração de agentes agressivos e menor a velocidade de corrosão. Este resultado corrobora com os resultados de Prabhu *et al.* (2015) onde todas as misturas apresentaram resistividade elétrica maiores que $200 \Omega\text{m}$ demonstrando baixa tendência a corrosão.

A significância dos resultados das amostras mantidas em câmara úmida e ambiente de laboratório foi analisada como apresentada nas Figuras 68a e 68b.

Figura 68: Análise de variância da Resistividade Elétrica Volumétrica a) câmara úmida b) laboratório

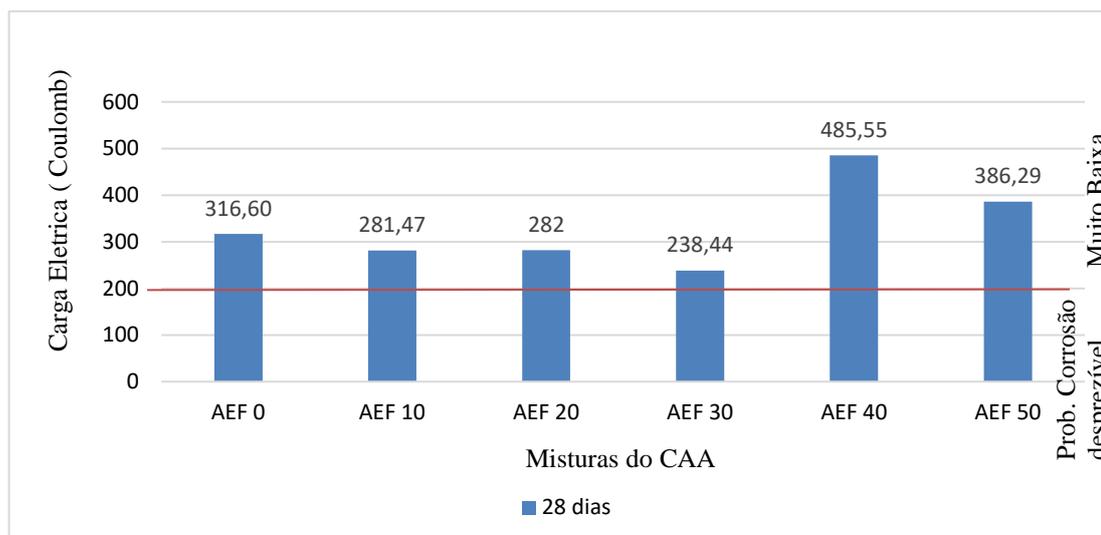


Percebe-se que houve aumento significativo da resistividade elétrica nas misturas AEF20, AEF30 e AEF40 com relação a mistura referência, AEF0, tanto nas amostras mantidas em câmara úmida quanto nas amostras mantidas em ambiente de laboratório.

4.2.2.8 Permeabilidade rápida de íons de cloreto

A permeabilidade aos íons de cloreto foi verificada por aceleração da passagem dos íons com aplicação de uma tensão. Os resultados estão demonstrados na Figura 69.

Figura 69: Comparação da permeabilidade aos íons de Cloreto das misturas

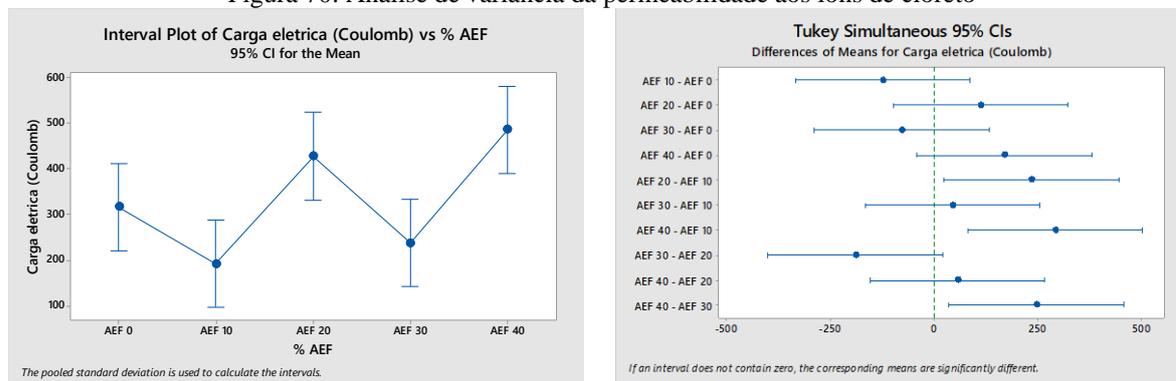


De acordo com a Figura 68 a carga elétrica foi reduzida nas misturas AEF10, AEF20 e AEF30 e aumento da carga elétrica na mistura AEF40 em relação AEF0. Houve um decréscimo de 24,7% na carga elétrica da mistura referência para a AEF 30. A carga elétrica passando através de todas as amostras foi inferior a 1000 Coulombs, a qual indica que a chance de ocorrer corrosão, em todas as misturas, é muito baixa. Considerando que o tempo de iniciação da corrosão está relacionado com a penetração de íons de cloreto na estrutura, então a adição de AEF pode aumentar a sua vida útil.

Resultado semelhante foi apresentado por Gurumoorthy; Arunachalam (2019) os quais afirmaram que as misturas mostraram baixa permeabilidade ou seja, ficaram mais densas e impermeáveis com até 30% do resíduo. Neste estudo todas as misturas de concreto apresentaram baixa permeabilidade, ou seja, a carga entre 1000 e 2000 coulombs. Os valores das taxas diminuíram com o aumento do conteúdo de TUFs em até 30%. No entanto, R40 mostra um ligeiro aumento no valor de Coulomb em comparação com R30. No estudo de Prabhu *et al.* (2015) a penetração de íons de cloreto aumentou com o aumento do resíduo até 50%. Os valores da carga elétrica, variaram de 420 Coulombs no concreto controle a 1021 Coulombs no concreto com 50%, confirmaram muito baixa a tendência a corrosão. Siddique, Sandhu (2013) observaram que a permeabilidade do íon-cloreto das misturas de concreto diminuiu com o aumento do teor de ADF em relação a mistura controle. Aos 28 dias, para as combinações 0%, 10%, 15% e 20% de ADF as cargas elétricas foram de 1200, 910, 720 e 970 coulombs respectivamente. Estes valores são maiores que os encontrados nesta pesquisa devido a AEF ter menor granulometria e ter gerado concreto menos permeável.

A significância dos resultados está demonstrada na Figura 70.

Figura 70: Análise de variância da permeabilidade aos íons de cloreto

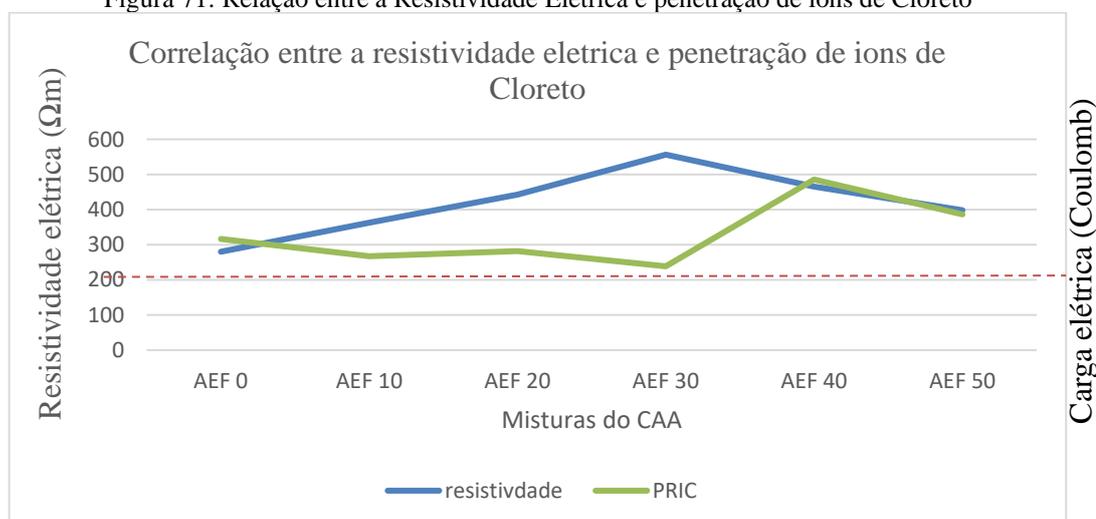


Observando a Figura 65 nota-se que em relação a mistura controle, AEF 0, não houve diferença significativa na permeabilidade aos íons de cloreto das misturas com AEF.

4.2.2.9 Relação entre a resistividade elétrica e difusão de íons de cloreto

A resistividade elétrica está correlacionada com certas características de desempenho do concreto, como taxa de difusão de cloreto, absorção de água e taxa de corrosão do aço (LAYSSI *et al.*, 2015). Existe uma correlação inversa entre a resistividade do concreto e a taxa de difusão de cloretos (FIGURA 71). Em uma estrutura específica, pontos mais permeáveis terão uma resistividade comparativamente baixa e forte penetração de cloreto (AZARSA; GUPTA, 2017).

Figura 71: Relação entre a Resistividade Elétrica e penetração de íons de Cloreto



Os dados da Figura 71 comprovam a relação inversa entre a resistividade elétrica e a taxa de difusão de íons de cloreto indicando que na mistura AEF 30 a iniciação da corrosão deverá ocorrer mais tarde que nas demais misturas.

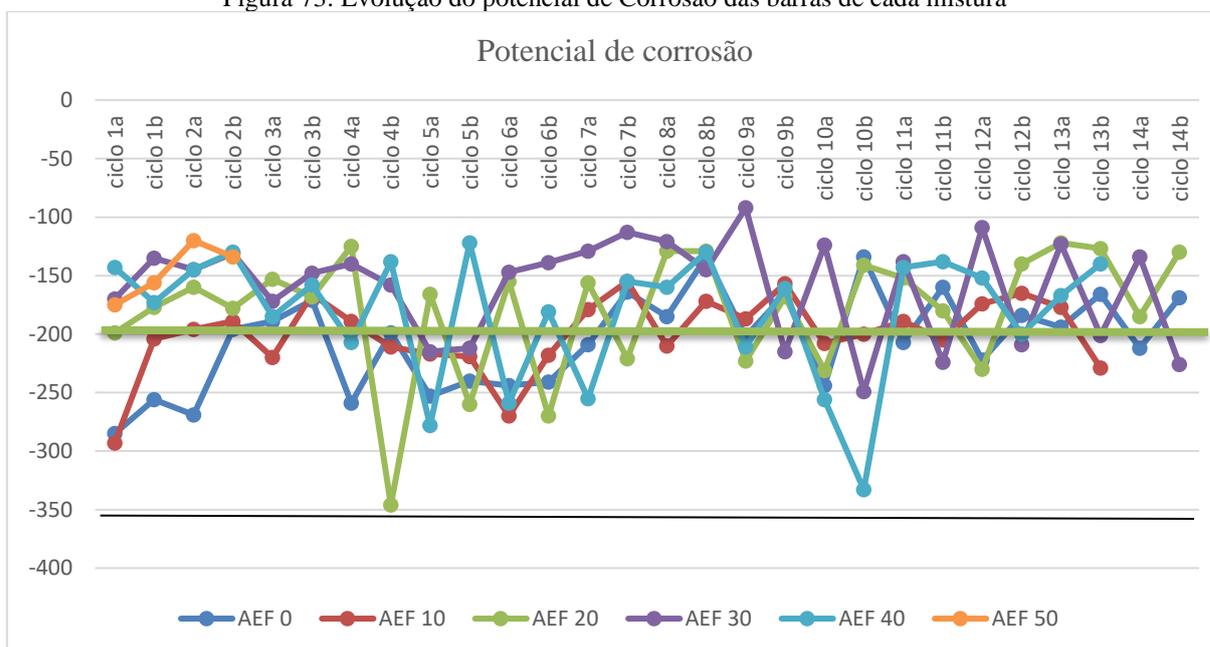
4.2.2.10 Potencial de Corrosão

O Potencial de corrosão foi avaliado durante um processo de aceleração da corrosão que constou de semi ciclos em imersão das amostras em cloreto de sódio (FIGURA 72) e secagem em estufa. Cada semi ciclo teve duração de 7 dias totalizando 28 semanas. A evolução do potencial corrosivo nas barras de aço está mostrada na Figura 73.

Figura 72: Processo de aceleração de corrosão das amostras imersas em cloreto de sódio



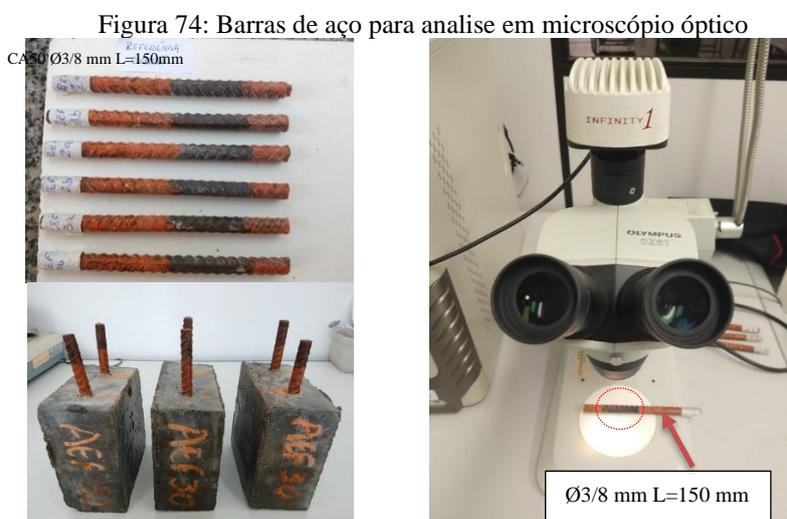
Figura 73: Evolução do potencial de Corrosão das barras de cada mistura



As curvas apresentam resultados das médias da diferença de potencial, ddp's das barras de cada mistura. Observou-se uma variação, -90 mV e -350 mV, entre os semi ciclos de molhagem e secagem sendo os valores mais negativos após os ciclos de molhagem devido ao maior volume de eletrólito. Os valores indicam uma baixa e incerta probabilidade de corrosão e não foi possível verificar o início de corrosão ou rompimento da camada passivadora por uma queda brusca do potencial. É importante salientar que o potencial de corrosão apresenta uma avaliação qualitativa sobre a possibilidade de corrosão sem quantificar a velocidade do processo (RIBEIRO; CUNHA, 2014).

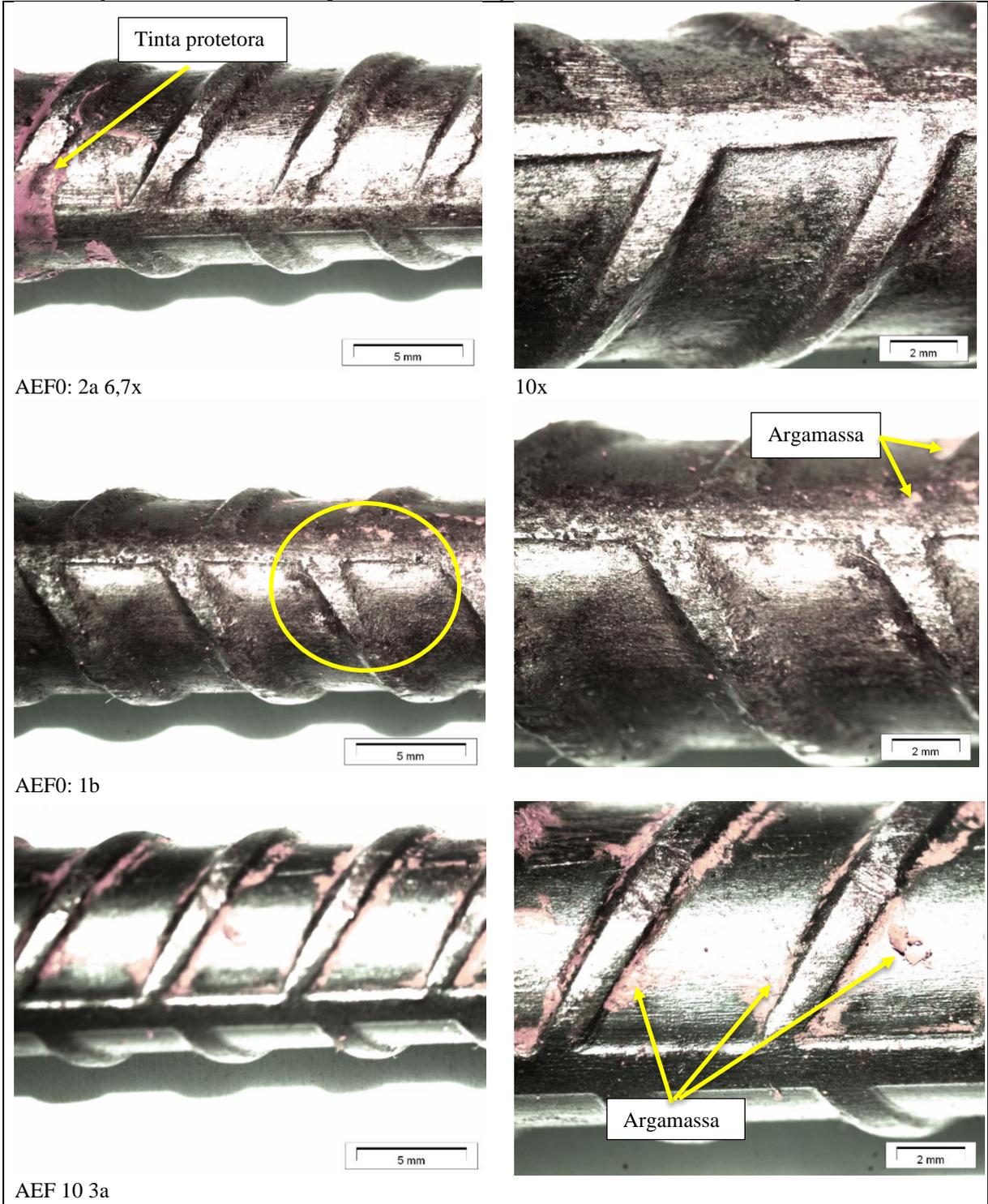
Kannan (2018) estudou os efeitos da cinza da casca de arroz (CCA) e do metacaulim (MK) na corrosão de concretos autoadensáveis. O cimento foi substituído de 0% a 30% por CCA ou MK como sistema binário, enquanto de 0% a 40% por CCA e MK como sistema ternário. O estudo do potencial de meia-célula foi usado para um ciclo úmido de 18 meses (solução de NaCl a 3%) e um ciclo seco alternativo. Os valores de potencial de circuito aberto para diferentes misturas foram obtidos de acordo com a recomendação ASTM C 876 (ASTM, 2015). A maioria do CCA e MK combinados SCC (em sistemas binários e ternários) indicam um bom desempenho contra a probabilidade de corrosão do aço de reforço por até 6 meses (menos negativo) na faixa de 163–345. Após 18 meses do ciclo seco-úmido, as misturas 15% CCA, 10% MK e 20% CCA + MK SCC combinados mostraram menor probabilidade de corrosão do que todas as misturas

Embora o potencial corrosivo tenha se mostrado incerto houve uma queda brusca nas amostras AEF 20 e AEF 40. Desta forma foi feita a ruptura dos corpos de prova e a verificação das barras no microscópio óptico Olympus SZ61 e câmara acoplada “Infinity 1” (FIGURA 74).



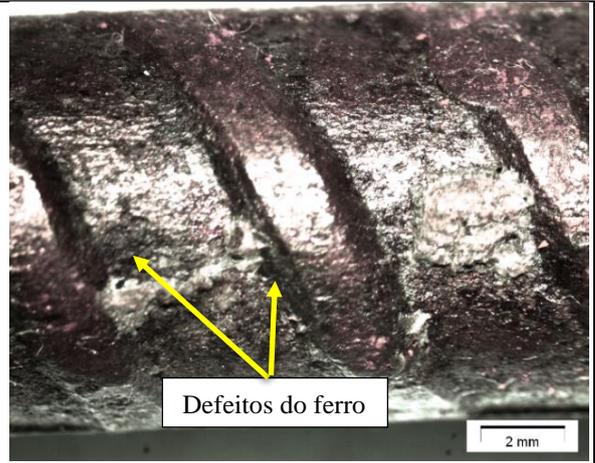
As imagens do microscópio óptico foram capturadas e salvas pelo *software* ANALYSIS FIVE Digital Imaging Solutions para verificação de corrosão nas barras de aço (FIGURA 75).

Figura 75: Análise microscópica das barras de aço com aumento de 6,7x e 10x respectivamente

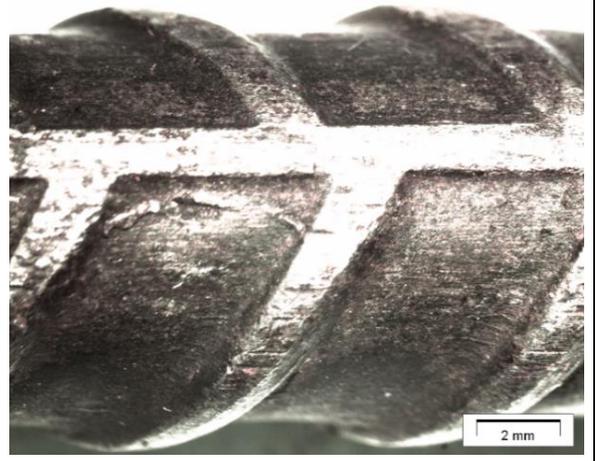




AEF 10 2b



AEF 20 2b

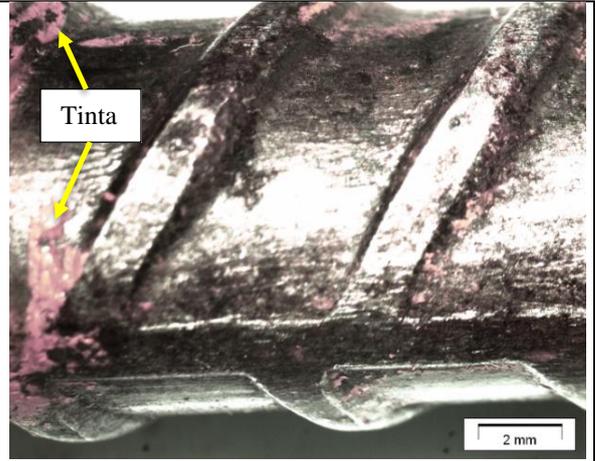


AEF 20 3a





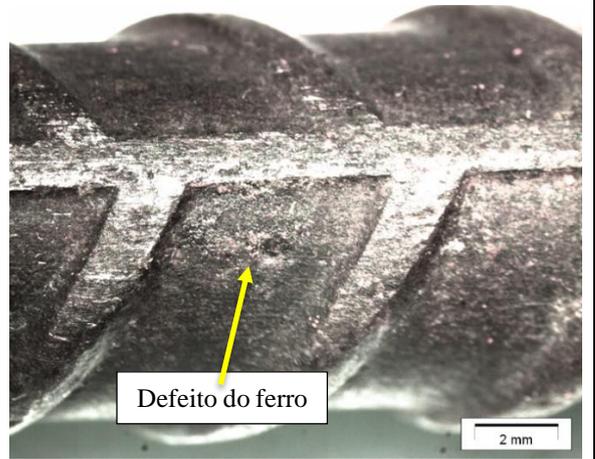
AEF 30 1a



Tinta



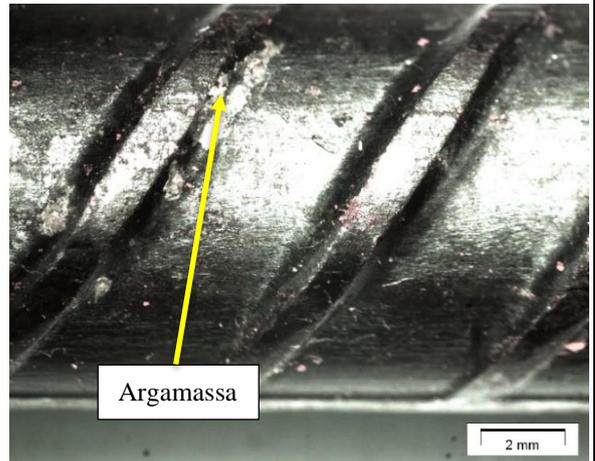
AEF 30 3a



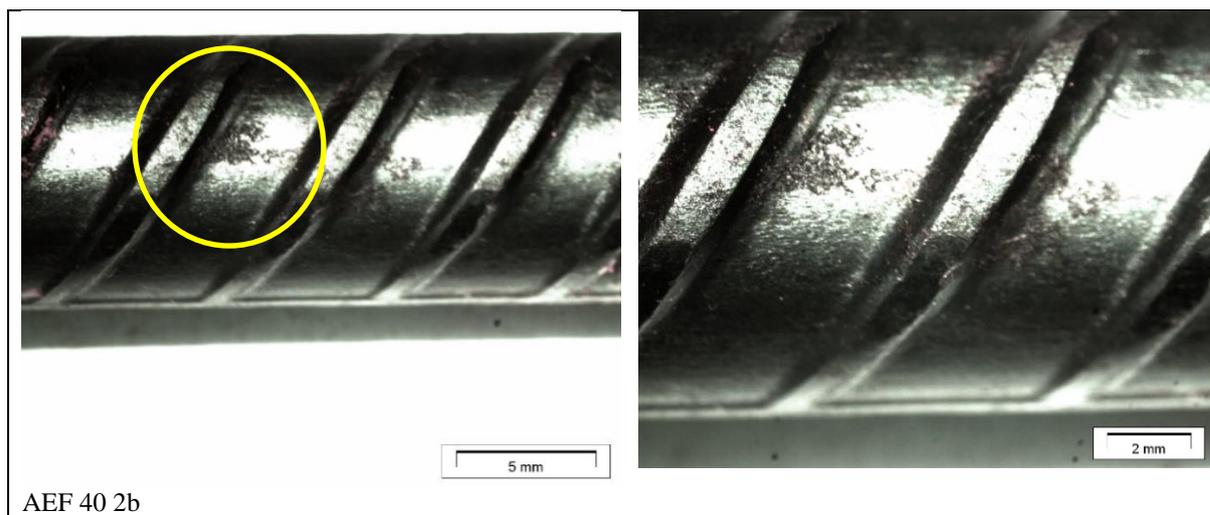
Defeito do ferro



AEF 40 1a



Argamassa



Pelas imagens realizadas por Microscópio Óptico foram observados defeitos nas barras, restos de argamassa e tinta, no entanto não se verificou sinais de corrosão. Este resultado corrobora com os resultados da resistividade elétrica e permeabilidade de íons de cloreto.

CONCLUSÃO

A metodologia para o cálculo do traço do CAA se mostrou eficaz e o uso do programa EMMA para a obtenção do esqueleto granular entre os agregados e evitou várias etapas de misturas entre esses.

Nos ensaios da argamassa, obteve-se as características de CAA com até 50% de AEF, mantendo a massa de cimento e a relação a/c de 0,38. Ainda foi obtida argamassa autoadensável com 100% de AEF; porém, foi necessário aumentar a relação a/c para 0,45.

As características do CAA no estado fresco, como: fluidez, viscosidade e coesão foram alcançadas com a utilização do RCMG como *filler* e AEF em substituição de 10, 20, 30 e 40% da areia natural em massa.

O RCMG, utilizado como adição mineral, colaborou para que em todas as misturas tivessem bons resultados tanto na propriedade mecânica de resistência a compressão quanto nos parâmetros de durabilidade. Isto devido ao efeito *filler* que deixaram as misturas mais densas.

Sobre a ação da Areia de Exaustão de Fundição no CAA endurecido concluiu-se o seguinte:

A resistência a compressão foi aumentada com a substituição da areia por 30% de AEF e com a idade da mistura.

Quanto a absorção por imersão as variações não foram significativas mesmo que na mistura AEF 30 tenha apresentado menor absorção. As misturas foram enquadradas na categoria de baixa a média absorção e os concretos classificados como duráveis. No entanto, no ensaio de absorção por capilaridade a mistura AEF 10 apresentou aumento significativo com relação a amostra referência.

A resistência ao sulfato de magnésio foi melhorada na mistura AEF 30 embora as variações em todas as misturas não tenham sido significativas. Quanto a resistência ao ácido clorídrico os resultados não foram significativos, mas por outro lado, as amostras da mistura referência apresentaram maior perda de massa.

Por meio do ensaio de permeabilidade rápida de íons de cloreto verificou-se que a carga elétrica passante pelas amostras foi inferior 1000 Coulomb. Por este resultado pode-se afirmar que a chance de ocorrer corrosão em todas as misturas é muito baixa.

Quanto a resistividade elétrica volumétrica, todas as misturas apresentaram resistividade superior a 200 Ωm o que significa que a probabilidade de ocorrer corrosão é desprezível

Pelos indicadores de durabilidade, resistividade elétrica e permeabilidade aos íons de cloreto, pode-se dizer que as misturas com até 30% de AEF se mostram mais duráveis que a mistura referência.

O Potencial corrosivo foi avaliado após um processo de aceleração da corrosão por imersão nas amostras em solução de cloreto de sódio e os resultados demonstraram baixa e incerta probabilidade de corrosão. O período de teste não foi suficiente para iniciar processo de corrosão.

A adição de RCMG e agregados mais finos, como a AEF, contribuíram para deixar a matriz de cimento mais densa e dificultar a penetração de agentes deletérios no concreto embora as diferenças não sejam significativas.

Diante destes resultados o autor conclui que os resíduos RCMG e AEF podem ser usados para confecção do CAA indicando alta resistência a compressão e maior durabilidade além de trazer benefícios para o meio ambiente minimizando o depósito do resíduo em aterros.

É possível a substituição da areia natural por AEF em maiores porcentagens para confecção do CAA aumentando a relação água/cimento.

Sugestões para trabalhos futuros

1. Desenvolver um traço com menor consumo de cimento para que seja mais econômico;
2. Desenvolver o traço com maior relação água/cimento a fim de aumentar a proporção de substituição da areia natural por areia de exaustão;
3. Aplicar os testes de resistência e durabilidade nestes novos traços;
4. Aumentar o tempo de exposição ao sulfato;
5. Realizar o ensaio de ataque ácido e permeabilidade aos íons de cloreto nas amostras Ø100x200mm.
6. Realizar o ensaio de Potencial Corrosivo por um tempo maior até que indique início do processo para que se obtenha melhor comparação das misturas com e sem AEF.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ABICHOU, T.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Foundry Green Sands as Hydraulic Barriers: Field Study. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 128, n. 3, p. 206–215, 2002.
- ADITIBRAS Aditivos para concreto e auxiliares para construção civil , <http://www.aditibras.com.br/> acesso em 2017
- AGGARWAL, Y.; SIDDIQUE, R. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 210–223, 2014.
- AGULLÓ, L.; TORALLES-CARBONARI, B.; GETTU, R.; AGUADO, A. “Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer – a study based on the Marsh cone test”, **Materials Structures** 32, 7 (1999) 479-485.
- AICTICIN, P. C. **High-Performance Concrete**. Quebec, Canada: E & FN SPON, 2004.
- ALMEIDA, F.C.R., SALES, A., 2014, Efeitos da ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto in RIBEIRO, D.V., SALES, A., SOUZA, C.A.C., ALMEIDA, F.C.R., CUNHA, M.P.T., LOURENÇO, M.Z., HELENE, P., **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**, 1ª ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2014, Cap. 4, pp 51-74
- ALONSO-SANTURDE, R.; COZ, A.; VIGURI, J. R.; ANDRES, A. Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: green and core sand in clay bricks.(Technical report). **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 97-106, 2012.
- 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.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Self-Consolidating Concrete**. Report ACI Committee C 237, 2007 (revisado 2019)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM. **C 1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration** West Conshohocken, PAASTM International, , 2019. DOI: 10.1520/C1202-19. Disponível em: www.astm.org.
- _____. ASTM C876-15, **Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org DOI: 10.1520/C0876-15
- _____. ASTM C1012 / C1012M-18b, **Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org DOI: 10.1520/C1012_C1012M-18B
- _____. ASTM. C452 - 21: **Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate** West Conshohocken, PAASTM International, , 2021. DOI: DOI: 10.1520/C0452-21.
- _____. ASTM C1152 / C1152M-04(2012), **Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org DOI: 10.1520/C1152_C1152M-04R12E01
- AMIT, V.; SINGH, R. R. Utilization of marble slurry to enhance soil fertility and to protect environment. **Journal of Environmental Research And Development**, v. 7, n. 4, p. 1479–1483, 2013.
- ANDRADE, T., Tópicos sobre Durabilidade do Concreto, In **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2005, cap. 25p. 753-792.
- ANEPAC, ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO, 2020. <http://www.anepac.org.br/anepac/a-entidade> acesso em 01/02/2021
- ARULRAJAH, A.; YAGHOUBI, E.; IMTEAZ, M.; HORPIBULSUK, S. Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and pipe-bedding construction material: Engineering and environmental evaluation. **Sustainable Cities and Society**, v. 28, p. 343–349, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670716305121>>.

ASLANI, F. et al. Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1835–1847, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.003>>.

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

____NBR 15823-2:2017: **Concreto-autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

____NBR 15823-4:2017: **Concreto-autoadensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017c

____NBR 15823-5:2017: **Concreto-autoadensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017d

____NBR 10004: **Resíduos sólidos - Classificação**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

____NBR 6118:2014: **Projeto de estruturas de concreto-Procedimento**, Rio de Janeiro, 2014.

____NBR 16697: **Cimento Portland de alta resistência inicial**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2018a.

____NBR 9204:2012: **Concreto endurecido - Determinação da resistividade elétrica- volumétrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012, 12 p.

____NBR NM 248: 2003: **Agregados - Determinação da Composição Granulométrica**, Rio de Janeiro, 2003

____NBR 5739:2018: **Concreto-Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**-. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.

____NBR NM 52: 2009: **Agregado Miúdo, Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente**, Rio de Janeiro, 2009.

____NBR NM 30:2001: **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**, Rio de Janeiro, 2001.

____NBR NM 53:2009: **Agregado Graúdo, Determinação da Massa Específica, Massa Específica Aparente e absorção de água**, Rio de Janeiro, 2009.

____NBR 9833: **Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**ABNT Rio de Janeiro, Brasil, 2009. DOI: 01.080.10; 13.220.99.

____NBR NM 45: 2006: **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**, Rio de Janeiro, 2006.

____NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2009.

____NBR 9779:2012: **Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção da água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012

____NBR 7181: **Solo - Análise granulométrica** Rio de Janeiro, Brasil ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, , 2018. b.

____NBR 7211: 2009: **Agregados para concreto - Especificação**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO, ABIFA (2020) Desempenho do setor de fundição mantém tendência ascendente em janeiro, **Revista da ABIFA Fundição & Matérias-Primas**, 208ª ed., março 2019 pp16-17.

____**Anuário ABIFA 2020**, Guia ABIFA de Fundição, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 2018, 152p

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, [S. l.], v. 2017, 2017.

AYDIN, A.B., 2013. **The Effect of the Marble Powder Used as Fine Material on the Durability of Concrete** MSc Thesis. Firat University, Elazig, Turkey

- BABU, G.M.; DURGA, R. PRASAD. Study on self-Compacting Concrete Using Portland Slag Cement with Partial Replacement of Fine Aggregate by Foundry Sand, **International Journal of Engineering Research and Applications**, 01 December 2016, Vol..6(12), pp.57-62
- BARBUTA, M. et al. **Effects of Tire Wastes on the Mechanical Properties of Concrete**. Procedia Engineering. **Anais...**2017
- 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, R. M. (2013), **Tratado Sobre Resíduos Sólidos - Gestão, Uso e sustentabilidade**, ed. Interciência, Rio de Janeiro, RJ, 2013, cap. 9, pp. 229-288.
- BEDDOE, Robin E. Modelling acid attack on concrete: Part II. A computer model. **Cement and concrete research**, v. 88, p. 20–35, 2016.
- BERTOLINI, L., **Materiais de Construção: patologia, reabilitação e prevenção**, Tradução Leda M.M.D., Oficina de textos, São Paulo, 2010, 414p
- BHARDWAJ, B.; KUMAR, P. Waste foundry sand in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 661–674, 2017.
- BOUKHELKHAL, D. et al. Effect of mineral admixture type on stability and rheological properties of self-compacting concrete. **HAL archives-ouvertes**, p. 8, 2015.
- CALADO, C. et al. Durability Indicators Comparison for SCC and CC in Tropical Coastal Environments. **Materials**, [s.l.], v. 8, n. 4, p.1459-1481, 2015.
- CALLEJA, M. Durability of concrete. *In*: **7th Int. Congress on the chemistry of cement**. Paris: [s.n.], 1980, p. 2–48.
- CAMPOS, R. S. et al. Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável Influence of recycled aggregates on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete. **Revista Materia**, v. 23, n. 1, p. 20, 2018.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. São Paulo: Ed. Pini, 1997.
- 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.
- CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão : Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18–32, 2009.
- CAVALIERE, I. S. G. et al. **Efeito dos agregados graúdos reciclados nas propriedades de concretos autoadensáveis dosados por empacotamento de partículas**. Libro de Comunicaciones / Livro das Comunicações. **Anais...**Valencia: Universitat Politècnica València, 5 mar. 2018
- CHEN, Z.; YANG, M. The Research on Process and Application of Self-Compacting Concrete. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 5, n. 8, p. 12–18, 2015.
- CHIODI FILHO, C. Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2017, Informe 2018 **Abirochas**, Associação Brasileira da Indústria de Rochas, Brasília, DF, 2018.
- CHOPRA, D.; SIDDIQUE, R.; KUNAL. Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. **Biosystems Engineering**, v. 130, p. 72–80, 2015.
- CHOUHAN, D. S. et al. Utilization of Granite Slurry Waste in Concrete: A Review. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 10, n. 6, p. 1–9, 2017.
- CIMENTO LIZ, <http://www.cimentosliz.com.br/>
- CIRILO, F. **Redução na Emissão de CO2 é Sinônimo de Competitividade na Indústria Global do Cimento**, Associação Brasileira de Cimento Portland, 2019, <https://abcp.org.br> acesso em 26/03/2020
- CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 1, p. 113–117, 2010.
- COSTA, J. M.; AZZI, S. S. Comparação Da Resistividade Elétrica Superficial E Volumétrica. **Revista Construindo**, v. 8, n. 1, p. 36–46, 2017.

- CÚNICO, F. R. et al. **Uso de pó de exaustão gerado na indústria de fundição como matéria prima para a indústria de revestimento cerâmico**. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...Cuiabá, Brasil: 2014**
- DAL MOLIN, D. C. C., Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, p. 345-379. 2005.
- DAL MOLIN, D.C.C.; SENISSE, J.A.L.; ZUCCHETTI, L.; STOLZ, C.M. (2012), Technical and economic analysis of self-compacting concrete bond with similar levels of compressive strength. I SILAMCAA, **Anais**, 54º IBRACON, Maceió.
- DALLA VALENTINA, L. V. O.; WITSMISZYN, C.; SANTOS, C. , Avaliação da viabilidade de uso do resíduo pó de exaustão de fundição. 25º SIC UDESC. **Anais Seminário de Iniciação Científica, Universidade do Estado de Santa Catarina: 2015**
- DALLA VALENTINA L.O.V; FOLGUERA M.V.; KNOP W.R.; PRATES G.A. Physical and Mechanical Properties Exhauster Powder Generated in the Foundry Process for a New Ceramic Material considering the ISO 10545-1:2014 and 13006:2012 **Espacios**. Vol. 37 (Nº 02) Ano 2016, p. 22
- 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.
- DAYTON, E. A. et al. Characterization of physical and chemical properties of spent foundry sands pertinent to beneficial use in manufactured soils. **Plant and Soil**, v. 329, n. 1, p. 27–33, 2010.
- De LARRARD, F.; FERRARIS, C.; SEDRAN, T. Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material. **Materials and Structures**, v. 31, n. 7, p. 494–498, 1998.
- De LARRARD, F.; SEDRAN, T. “Mixture-proportioning of high-performance concrete, **Cement Concrete Research**. 32, 11 (2002) 1699-1704
- 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.
- DÍAZ PACE, D. M. et al. Quantitative analysis of metals in waste foundry sands by calibration free-laser induced breakdown spectroscopy. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 131, p. 58–65, 2017.
- DNER. DNER ME 052: Solos e agregados miudos- determinação da umidade com o emprego do Speedy. p. 4, 1994.
- DOMONE, P. L.; JIN, J. Properties of mortar for self-compacting concrete. In: **First International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete**, p. 109-120, 1999, Estocolmo: E & FN Spon, A.SKARENDAHL, A.; PETERSSON, Ö. (eds.),1999
- 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
- EFNARC. European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete, **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**, Surrey ,UK, , 2002.
- EFNARC. **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use**, The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.
- EFNARC. European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete, **Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante. Especificaciones, Producción y Uso**, 2006.
- ELKEM. **EMMA Elkem Materials Mixture Analyzer**. 2019. Disponível em: <https://www.elkem.com/download-centre/?query=&tags=Concrete&cat=3>.
- EL MIR, A.; NEHME, S. G. Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 507–517, 2017.
- FAGUNDES, A. B.; VAZ, C. R.; OLIVEIRA, I. L. O fortalecimento do setor de fundição através da aplicação de conceitos e metodologias ambientais: os excedentes de areia de fundição em foco. **Revista ADMpg Gestão Estratégica**, v. 2, n. 2, p. 27–34, 2009.

- FERRARIS, C. F.; OBLA, K.H.; HILL, R. “The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete”, **Cement Concrete Research**. 31, 2 (2001) 245-255.
- FERRARIS CF, DE LARRARD F. **Testing and modeling of fresh concrete rheology**. NISTIR 6094: National Institute of Standards and Technology; 1998
- FRACALOSSO, Romulo Augusto Rigon. **Aditivos á base de Policarboxilatos: Influencia nos tempos de pega e na manutencao do abatimento em pastas de cimento Portland**. 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2011
- FUNK, J.E.; DINGER, D.R.; JR, J.E.. Funk. **Coal grinding and particle size distribution studies for coal-water slurries at high solids content**. New York: Empire State Electric Energy Research Corporation, 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.
- GHERNOUTI, Y. et al. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC). **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 89–100, 2015.
- 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.
- GHODDOUSI, P.; ADELZADE SAADABADI, L. Study on hydration products by electrical resistivity for self-compacting concrete with silica fume and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 219–228, 2017.
- GOMES, P. C. C.; BARROS, A. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. First ed. São Paulo: Editora PINI LTDA, 2009.
- GOMES, P.C.C; GETTU, R.; AGULLÓ E JONATHAS JUDÁ LIMA TENÓRIO. Concreto Auto-Adensável: Um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto. 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, agosto de 2003, **Anais**, CD-ROM, 2003.
- GOPINATH, S. et al. Optimised mix design for normal strength and high performance concrete using particle packing method. **Archives of Civil Engineering**, v. 57, n. 4, p. 357, 2011.
- GÜNEYISI, E. et al. Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 29–44, 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.
- HANSSON, C. M. Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 14, n. 4, p. 574–584, 1984.
- HEBHOUH, H. et al. Use of waste marble aggregates in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1167–1171, 2011.
- HEIDER, M.; MAIA, C. M. **Sumario Mineral 2018, rochas ornamentais, Departamento Nacional de Produção Mineral**, 2018.
- HELENE, P.; P. TERZIAN. **Manual de dosagem e controle do concret**. Sao Paulo: PINI, 1992.
- HELENE, Paulo. Corrosion de las armaduras en él hormigon armado. **Cemento-Hormigon**, [S. l.], v. 54, p. 591–593, 1983.
- HELENE, Paulo. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo, SP: PINI, 1986.
- HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas de concreto. *In: International Conference on HighPerformance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures*. Gramado, RS, Brasil: [s.n.], 1999
- JANOTKA, I. et al. Metakaolin sand-blended-cement pastes: Rheology, hydration process and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 791–802, 2010.
- JIANG, S.; KIM, B.-G; AİTCIN, P.-C “Importance of adequate soluble alkali content to ensure cement/superplasticizer compatibility”, **Cement Concrete Research**, 29, 1 (1999) 71-78
- JOHN, V. M. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. *In: II Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*. **Anais**, São Paulo, 1999. IBRACON, p. 44-45

- KANELLOPOULOS, A.; PETROU, M. F.; IOANNOU, I. Durability performance of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 320–325, 2012.
- KANNAN, V. Strength and durability performance of self compacting concrete containing self-combusted rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 169–179, 2018.
- 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.
- KAUR, E. A.; BANSAL, R. S. Strength and Durability Properties of Concrete with Partial Replacement of Cement with Metakaolin and Marble Dust. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 4, n. 07, p. 1032–1035, 2015.
- KHAN, R. A. Mechanical and Durability Performance of Self Compacting Concrete Containing Fly Ash and Metakaolin. **Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies**, v. 2, n. 1, p. 68–78, 2017.
- KHAYAT, Kamal H.; SCHUTTER, Geert De. **Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete**. [s.l.] : Springer, 2014. v. 14 DOI: 10.1007/978-3-319-03245-0. Disponível em: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-03245-0](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-03245-0%5Cnhttp://hdl.handle.net/1854/LU-4343086%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-03245-0%5Cnhttp://link.springer.com/10.1007/978-3-319-03245-0_4).
- 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.
- KRAUS, R. N. et al. Use of foundry silica-dust in manufacturing economical self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 11, p. 3439–3442, nov. 2009.
- LAMOUNIER, A. S.; PINTO, C.Z.F.; AGUILAR, M. T. P.; PAULINO, J.O.S., Determinação da resistividade elétrica e da porosidade aberta de compósitos cimentícios de engenharia. 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...Cuiabá, MT: 2014** Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/104-010.pdf>>
- LOURENÇO M.Z., SOUZA, C.A.C., Métodos de proteção e aumento da durabilidade do concreto armado. In RIBEIRO, D.V., SALES, A., SOUZA, C.A.C., ALMEIDA, F.C.R., CUNHA, M.P.T., LOURENÇO, M.Z., HELENE, P., **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**, 1ª ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2014, Cap. 7, pp 119-170
- LOURENÇO M.Z., Técnicas eletroquímicas para reabilitação de estruturas. In RIBEIRO, D.V., SALES, A., SOUZA, C.A.C., ALMEIDA, F.C.R., CUNHA, M.P.T., LOURENÇO, M.Z., HELENE, P., **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**, 1ª ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2014, Cap. 9, pp 223-246
- MAHALINGAM, B. et al. Assessment of hardened characteristics of raw fly ash blended self-compacting concrete. **Perspectives in Science**, v. 8, p. 709–711, 2016.
- MAHAKAVI, P. ..; KAVITHA, C. K. Effect of recycled coarse aggregate and foundry sand on the properties of self-compacting concrete. *Magazine of Concrete Research*, [S. l.], v. 71, n. 9, p. 449–460, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00455>.
- MAKUL, N. Combined use of untreated-waste rice husk ash and foundry sand waste in high-performance self-consolidating concrete. **Results in Materials**, v. 1, n. August, p. 100014, 2019.
- MALHOTRA, V. M. Sustainable development and concrete technology. **Concrete International**, v. 24, n. 7, p. 22, July 2002.
- MANOHARAN, T. et al. Engineering properties of concrete with partial utilization of used foundry sand. **Waste Management**, v. 71, p. 454–460, 2018.
- MARINHO, E. Z.; ROCHA, R. C.; GALDINO, A. G. S. Análise e perspectivas de alternativas para destinação de resíduos de rochas ornamentais através de um estudo bibliométrico. **Espacios**, v. 38, n. 29, p. 22–39, 2017.
- MARTINS, M. A. B. et al. Study on waste foundry exhaust sand, WFES, as a partial substitute of fine aggregates in conventional concrete. **Sustainable Cities and Society**, v. 45, p. 187–196, fev. 2019.
- MARTINS, M. A. B.; PINTO, F. B.; BARROS, R. M.; MELO, M. L. N. M. Analysis of the specimen ' s dimensions variation influence in self - compacting concrete bulk electrical resistivity. *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 50959–50973, 2021a. DOI: 10.34117/bjdv7n5-477. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/30117>.

- MARTINS, M. A. de B. et al. Physical and Chemical Properties of Waste Foundry Exhaust Sand for Use in Self-Compacting Concrete. *Materials*, [S. l.], v. 14, n. 19, p. 5629–5650, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14195629>.
- MARUTHACHALAM, D.; GURUNATHAN, M.; PADMANABAN, I.; VISHNURAM, B. G. Durability Properties of Fibrillated Polypropylene fibre reinforced high performance concrete. *J. Struc. Engg*, [S. l.], v. 38, n. 1, p. 1–9, 2011
- MASHALY, Ahmed O.; EL-KALIOUBY, Baher A.; SHALABY, Basel N.; EL-GOHARY, Amr M.; RASHWAN, Mohammed A. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 112, p. 731–741, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.023>.
- MASTELLA, M. A. et al. Mechanical and toxicological evaluation of concrete artifacts containing waste foundry sand. *Waste Management*, v. 34, n. 8, p. 1495–1500, 2014.
- MAURICIO, G. R. et al. Characterization of Waste Molding Sands, for Their Possible Use as Building Material BT - Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2016. In: IKHMAYIES, S. J. et al. (Eds.). . Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 615–621. DOI: 10.1007/978-3-319-48210-1_77.
- MEDEIROS, M.; ANDRADE, J.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). . **Concreto: ciência e tecnologia**. [s.l.] IBRACON, 2011. v. 1p. 773–808.
- MEHTA, P. K. Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete International*, v. 24, n. 7, p.23 – 27, July 2002.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª ed. [s.l.] Pini Ltda, 2008.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª ed. IBRACON, 2014, 782p. ISBN / ISSN: 978-85-98576-21-3
- MENEZES, Romualdo R.; FERREIRA, Heber S.; NEVES, Gelmires A.; LIRA, Helio de L.; FERREIRA, Heber C. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, [S. l.], v. 25, n. 7, p. 1149–1158, 2005. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.04.020.
- MIGUEL, R.E; IPPOLITO, J.A.; PORTA, A.A.; *et al.* Analysis of total metals in waste molding and core sands from ferrous and non-ferrous foundries. *J. Environmental Mananger*, v. 110, p. 77–81, 2012.
- MIRANDA, T.R.V *et al.*, Utilização do nitrito de sódio como inibidor do processo corrosivo de armaduras. In Seminário de corrosão na construção civil, 4, Rio de Janeiro, 1990. *Anais*, ABRACO, p. 94-109
- MOHSENI, E. et al. Engineering and microstructural assessment of fibre-reinforced self-compacting concrete containing recycled coarse aggregate. *Journal of Cleaner Production*, v. 168, p. 605–613, 2017.
- MONOSI, S. et al. Effect of two different sources and washing treatment on the properties of UFS by-products for mortar and concrete production. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 260–266, 1 jul. 2013.
- NAIK, T.R.; PATEL, V.M.; PARIKH, D.M.; THARANIYIL, M.P. “Utilization of used foundry sand: characterization and products testing”, Report No. CBU-1992-20, **Center for By-Products Utilization**, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, Wisconsin, June 1992
- NEVILLE, A. M. M.; BROOKS, J. J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ed. Porto Alegre, 2013. ISBN 978-85-8260-071-9
- NICOARA, Adrian Ionut; STOICA, Alexandra Elena; VRABEC, Mirijam; *et al.* End-of-Life Materials Used as Supplementary Cementitious Materials in the Concrete Industry. *Materials*, v. 13, n. 8, p. 1954, 2020.
- NOVAK, R., SCHNEIDER, W., LANG, E., New knowledge regarding the super- sulphated cement Slagstar. *Material Science*. v.58, p.70-78, 2005
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 1, n. 1, p. 5–15, 2003.
- PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 11, n. 3, p. 395–406, 1981.
- PATHAK, N.; SIDDIQUE, R. Properties of self-compacting-concrete containing fly ash subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 274–280, 2012.

PARK, C.K.; NOH, M.H.; PARK, T.H. “Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures”, **Cement Concrete Research**, 35, 5 (2005) 842-849.

PETERSSON, O.; BILLBERG, P.; VAN, B.K. A model for self-compacting concrete. 1996

PINTO, F. B.; MARTINS, M. A. B.; WERDINE, D.; SANTOS, V. C.; GONÇALVES, P. C.; BARROS, R. M.; MELO, M. L. N. M. Mixture design for self-compacting concrete using a virtual particle packing method. *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 50029–50049, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n5-415. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/30020>

POLDER R., with contributions from ANDRADE C., ELSENER B., VENNESLAND Ø., GULIKERS J., WEIDERT R. and RAUPAC M.. Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete, RILEM TC 154-EMC: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 33, pp 603-611.2000

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**, Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 265 p, 2010.

PRABHU, G. Ganesh; BANG, Jin Wook; LEE, Byung Jae; HYUN, Jung Hwan; KIM, Yun Yong. Mechanical and Durability Properties of Concrete Made with Used Foundry Sand as Fine Aggregate. **Advances in Materials Science and Engineering**, [S. l.], v. 2015, 2015. DOI: 10.1155/2015/161753.

RAMANATHAN, P. et al. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 17, n. 2, p. 465–472, 2013.

RAMEZANIANPOUR, A. M. et al. Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 187–194, 2014.

RAMOS, T. et al. Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1001–1009, 2013.

RANJBAR, N. et al. Durability and mechanical properties of self-compacting concrete incorporating palm oil fuel ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 723–730, 2016.

RASBAND, W. **ImageJ**Bethesda, Maryland, USAUS National Institutes of Health, , 2010. Disponível em: <https://imagej.nih.gov/ij/>.

REPETTE, W. L. Concretos de última geração: presente e futuro. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Concreto - Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, v. 2, p. 1509-1550, 2005

RIBEIRO, D.V., 2014, Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto in RIBEIRO, D.V., SALES, A., SOUZA, C.A.C., ALMEIDA, F.C.R., CUNHA, M.P.T., LOURENÇO, M.Z., HELENE, P., **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**, 1ª ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2014, Cap. 3, pp 37-50

RIBEIRO, D.V., 2014, Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto. In RIBEIRO, D.V., SALES, A., SOUZA, C.A.C., ALMEIDA, F.C.R., CUNHA, M.P.T., LOURENÇO, M.Z., HELENE, P., **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**, 1ª ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2014, Cap. 5, pp 75-85.

RIBEIRO, D.V., CUNHA, M.P.T., 2014, Deterioração das estruturas de concreto armado. In RIBEIRO, D.V., SALES, A., SOUZA, C.A.C., ALMEIDA, F.C.R., CUNHA, M.P.T., LOURENÇO, M.Z., HELENE, P., **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**, 1ª ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2014, Cap. 6, pp 87-118

RIBEIRO, R. A. C.; MYMRINE, V.; PONTE, H. A. Utilização de pó de exaustão e areia de fundição no desenvolvimento de cerâmica vermelha. In: 17 CBECiMat - Congresso brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006, Foz do Iguaçu. **Anais do 17 CBECiMat - Congresso brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 2006.

RIBEIRO, R. A. C.; MYMRINE, V.; PONTE, H. A. Development of ceramic materials with exhaust powder and other industrial waste. In: 2º International Congress University-Industry Cooperation, 2007, Perugia - Itália. **Anais**

ROSEMBERG A., GRACE and CO, W.R., HANSSON, C.M., ANDRADE, C. Mechanisms of corrosion of steel in concrete. In SKALNY, I.P., **Materials science of concrete I**. Westerville, OH- EUA. The American Ceramic Society Inc, 1989, p. 285-313.

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.

SADRMOMTAZI, A. et al. The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of selfcompacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2363–2373, 2016.

ŞAHMARAN, M. et al. Use of spent foundry sand and fly ash for the development of green self-consolidating concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 44, n. 7, p. 1193–1204, 2011.

SANDHU, Ravinder Kaur; SIDDIQUE, Rafat. Strength properties and microstructural analysis of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 225, p. 371–383, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.216. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.216>.

SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciaçãoda corrosão induzida por cloretos em estruturasde concreto. **Dissertação (Mestrado) - Brasília, UNB**, p. 161, 2006.

SANTOS, C.; DALLA VALENTINA, L.; CUZINSKY, F. Peças de concreto para pavimentos intertravados produzidos com resíduos de areia de fundição. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica. **Anais...Agua de Lindoia, SP: 2016**

SANTOS, C.C.; DALLA VALENTINA, L. V. O.; SOUZA, R. O. (2015), Caracterização do Resíduo Pó de Exaustão de Fundição na Indústria da Construção Civil, **Revista Espacios**, vol. 36, nº5, p. 9.

SANTOS, F. N. et al. Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using Mixture Design of Experiments. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 92–103, 2017a.

SANTOS, S. A. et al. Fresh State Properties of Self-compacting Concrete with Recycled Aggregates - A Literature Review. **Athens Journal of Technology & Engineering**, n. March, p. 33–46, 2017b.

SARDINHA, M.; DE BRITO, J.; RODRIGUES, R. Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 45–52, 2016.

SEDRAN T, DE LARRARD F. Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. In: **Proceedings 1st SCC Symposium**, CBI Sweden, RILEM PRO7; 1999

SHEEN, Y. N.; LE, D. H.; SUN, T. H. Greener self-compacting concrete using stainless steel reducing slag. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 341–350, 2015.

SHI, C. et al. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 387–398, 2015.

SIDDIQUE, R.; AGGARWAL, P.; AGGARWAL, Y. Mechanical and durability properties of self-compacting concrete containing fly ash and bottom ash. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 1, n. 3, p. 67–82, 1 set. 2012.

SIDDIQUE, Rafat; KADRI, El Hadj. Effect of metakaolin and foundry sand on the near surface characteristics of concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 25, n. 8, p. 3257–3266, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.012>.

SIDDIQUE, R.; NOUMOWE, A. **Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concreteResources, Conservation and Recycling**, 2008.

SIDDIQUE, R.; SANDHU, R. K. Properties of Self-Compacting Concrete Incorporating Waste Foundry. p. 23, 2013.

SIDDIQUE, Rafat; SCHUTTER, Geert De; NOUMOWE, Albert. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 976–980, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.05.005. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061808001311>.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 11, p. 885–892, 2011.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G.; SINGH, M. Recycle option for metallurgical by-product (Spent Foundry Sand) in green concrete for sustainable construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1111–1120, 2018.

SILVA, C. G.; ALBUQUERQUE, A. C.; LIMA, S. M. Pesquisas E Iniciativas Na Cadeia Do Concreto Para O Desenvolvimento Sustentável. **Concreto&Construções Ibracon**, n. 1809–7197, p. 46–52, 2013.

SILVA, F. G.; LIBORIO, J. B. L. **A importância da seleção de materiais para concretos de elementos estruturais submetidos à ação de cloretos**. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pre-Moldado. **Anais...**São Carlos, SP: 2005

SINGH, G.; SIDDIQUE, R. The effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 416–422, 2012.

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.

SOARES, A. P. F. ; VASCONCELOS, L. T. ; NASCIMENTO, F. B. C. Corrosão em Armaduras de Concreto. **Ciencias exatas e tecnologicas**, v. 3, n. 1, p. 177–188, 2015.

SOHAIL; WAHAB, Abdul; KHAN, Arfath. A Study on the Mechanical Properties of Concrete by Replacing Sand with Waste Foundry Sand. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, [S. l.], v. 3, n. 11, p. 83–88, 2013.

SOUZA, C. S. ; ANTUNES, M.L.P.; VALENTINA, L. V. O. D.; RANGEL, E. C. ; DA CRUZ, N.C. Use of waste foundry sand (WFS) to produce protective coatings on aluminum alloy by plasma electrolytic oxidation **Journal of Cleaner Production**, 10 June 2019, Vol.222, pp.584-592

SOUZA, C.A.C., 2014, Princípios da Corrosão Eletroquímica in RIBEIRO, D.V., SALES, A., SOUZA, C.A.C., ALMEIDA, F.C.R., CUNHA, M.P.T., LOURENÇO, M.Z., HELENE, P., **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**, 1ª ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2014, Cap. 2, pp 13-35.

SU, N.; HSU, K.-C.; CHAI, H.-W. A simple mix design method for self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 12, p. 1799–1807, dez. 2001.

TECNOSIL, <https://www.tecnosilbr.com.br>

TENNICH, M.; BEN OUEZDOU, M.; 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.

TORRES, A.; BARTLETT, L.; PILGRIM, C. Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 674–681, 2017.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. Dal. **Concreto autoadensável**. 1ª ed. Sao Paulo: PINI, 2008.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. [s.l.] IBRACON, 2011. p. 439–471.

TUUTTI K., **Corrosion of steel in concrete**, Stockholm, Swedish, Cement and Concrete Research Institute, 198, 469p

ULUBEYLI, Gulden Cagin; ARTIR, Recep. Properties of Hardened Concrete Produced by Waste Marble Powder. In: WORLD CONFERENCE ON TECHNOLOGY, INNOVATION AND ENTREPRENEURSHIP 2015, **Anais [...]**. : Elsevier B.V.Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2015. p. 2181–2190. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.06.294. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877042815037738>..

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.

VARDHAN, K. et al. 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.

VIEIRA, G. L. Estudo Do Processo De Corrosão Sob a Ação De Íons Cloreto Em Concretos Obtidos a Partir De Agregados Reciclados De Resíduos De Construção E Demolição. p. 151, 2003.

VISHWAKARMA, Vinita; RAMACHANDRAN, D. Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as

alternatives – A review. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 162, p. 96–103, 2018. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.11.174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817323930>. Acesso em: 21 mar. 2018.

WINSLOW, D.; LIU, D. The pore structure of paste in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 2, p. 227–235, 1 mar. 1990.

WONGKEO, W. et al. Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume. **Materials and Design**, v. 64, p. 261–269, 2014.

XU, Hui; ZHAO, Yu Xi; CUI, Lei; XU, Bi. Sulphate attack resistance of high-performance concrete under compressive loading. **Journal of Zhejiang University: Science A**, [S. l.], v. 14, n. 7, p. 459–468, 2013. DOI: 10.1631/jzus.A1300067.

YANG, S. et al. Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 444–453, 2015.

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

YEN, T.; TANG, C.-W.; CHANG, C.-S.; CHEN, K.-H. “Flow behavior of high strength high-performance concrete”, **Cement Concrete Composites**, 21, 5-6 (1999) 413-424

YIN, Ke; AHAMED, Ashiq; LISAK, Grzegorz. Environmental perspectives of recycling various combustion ashes in cement production – A review. **Waste Management**, v. 78, p. 401–416, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.012>>.