

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

Josiane Moraes Costa

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TEORES DE MATERIAIS
CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES EM CONCRETO**

Belo Horizonte
2021

Josiane Moraes Costa

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TEORES DE
MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES EM CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Construção Civil como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Chahud

Coorientadores:

Prof.^a Dr.^a Maria Teresa Paulino Aguilar
Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo

Belo Horizonte
2021

C837a Costa, Josiane Moraes.
Análise da influência de diferentes teores de materiais cimentícios suplementares em concreto [recurso eletrônico] / Josiane Moraes Costa. – 2021.
1 recurso online (73 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Eduardo Chahud.
Coorientadores: Maria Teresa Paulino Aguiar, Enio José Pazini Figueiredo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 68-73.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses. 3. Concreto - Durabilidade - Teses. 4. Pozolonas - Teses. 5. Metacaulim - Teses. 6. Cerâmica - Teses. I. Chahud, Eduardo. II. Aguiar, Maria Teresa Paulino. III. Figueiredo, Enio José Pazini. IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. V. Título.

CDU: 691(043)

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Roseli Alves de Oliveira CRB/6 2121
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

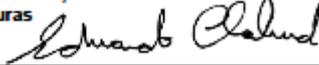
ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL DA ALUNA JOSIANE MORAES COSTA.

Às nove horas e trinta minutos do dia trinta e um de maio de dois mil e vinte e um, reuniu-se, por meio de sistema de interação de áudio e vídeo em tempo real (plataforma Google Meet) a Comissão Examinadora de Dissertação de Mestrado, aprovada *ad referendum* pelo Coordenador do Colegiado do Curso de Mestrado em Construção Civil - EE.UFMG, Prof. Dr. Eduardo Chahud, para julgar, em exame final, o trabalho intitulado “Análise da influência de diferentes teores de materiais cimentícios suplementares em concreto”, requisito final para a obtenção do Grau de MESTRE EM CONSTRUÇÃO CIVIL na área de: TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, o Prof. Dr. Eduardo Chahud, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra à candidata para apresentação do seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa da candidata. Logo após, sem a participação da candidata na transmissão, houve o julgamento e expedição do resultado pela Comissão. Foram atribuídas as seguintes indicações:

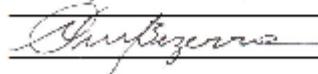
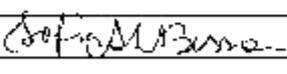
PROF. DR. EDUARDO CHAHUD	(X) APROVADA () REPROVADA
PROFA. DRA. MARIA TERESA PAULINO AGUILAR	(X) APROVADA () REPROVADA
PROF. DR. ÊNIO JOSÉ PAZINI FIGUEIREDO	(X) APROVADA () REPROVADA
PROF. DR. AUGUSTO CESAR DA SILVA BEZERRA	(X) APROVADA () REPROVADA
PROFA. DRA. SOFIA ARAÚJO LIMA BESSA	(X) APROVADA () REPROVADA

Pelas indicações dos membros acima, a candidata foi considerada **APROVADA**. Caso tenham sido sugeridas correções no trabalho, conforme pareceres anexos, a candidata terá o prazo máximo de 60 (sessenta) dias para efetuá-las e entregar a versão final da dissertação à Secretaria do Curso de Mestrado em Construção Civil. O resultado foi comunicado à candidata pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a transmissão e lavrou a presente ATA, que será assinada eletronicamente por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, trinta e um de maio de dois mil e vinte e um.

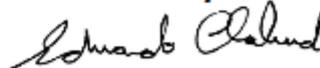
Assinaturas





Obs.: Este documento não terá validade sem a assinatura e carimbo da Coordenação do Curso de Mestrado em Construção Civil.



Prof. Dr. Eduardo Chahud
Coordenador do Curso de Mestrado em Construção Civil
ESCOLA DE ENGENHARIA/UFMG

AGRADECIMENTOS

Em especial, ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Chahud, pela orientação durante a realização da pesquisa e pela contribuição na minha formação como pessoa, pesquisadora e acadêmica.

Aos meus coorientadores, Prof.^a Dr.^a Maria Teresa Paulino Aguilar que me guiou e inspirou por esse caminho desde a especialização, e Prof. Dr. Enio Pazini Figueiredo por todo auxílio na realização do mestrado.

Aos membros da banca pela disponibilidade e colaboração.

À Universidade Federal de Minas Gerais pelo apoio. A todos os professores e funcionários do Departamento de Materiais e Construção Civil, em especial William e Ariela.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida para a realização desta pesquisa.

Aos laboratórios da UFMG e aos técnicos que auxiliaram na realização das análises.

Aos colegas do Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica que certamente colaboraram direta e indiretamente na minha evolução como pesquisadora.

À Supermix pelo apoio integral à pesquisa, cedendo o laboratório, equipe e ensaios necessários.

À MRK pela disponibilização do Depozo utilizado.

À Metacaulim do Brasil pela disponibilização do metacaulim utilizado.

À Cimento Nacional pela disponibilização do cimento e apoio em realização de análises.

Ao meu companheiro e amigo de jornada, Glayson, pelo apoio incondicional na realização dos meus sonhos.

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para que a realização dessa pesquisa fosse possível.

RESUMO

A busca pelo por concretos com maior durabilidade é importante no sentido de reduzir os custos de manutenções, reabilitações ou mesmo com demolições de edificações que geram a necessidade de novas edificações. A substituição parcial do cimento Portland por materiais suplementares cimentícios (MSC) no concreto pode colaborar para um melhor desempenho mecânico e da durabilidade da estrutura de concreto. Ademais, o uso dos MSC pode vir a contribuir para que a indústria da construção civil reduza o impacto ambiental causado pela extração de minerais não renováveis e pela emissão de CO₂ gerada na produção do clínquer. Este trabalho propõe analisar a influência de diferentes teores de materiais cimentícios suplementares no concreto. Para tanto, os materiais empregados foram caracterizados quimicamente e fisicamente, e desenvolveu-se uma dosagem referência de concreto usual para obras de infraestrutura. A partir dessa, mais 9 dosagens foram produzidas, nas quais houve a substituição parcial do cimento Portland CPV-ARI por um determinado percentual de MSC. Os MSC empregados serão o Metacaulim, o Depozo e o resíduo de Cerâmica Vermelha, nas proporções de 5%, 10% e 20%. A caracterização mecânica dos corpos de prova ocorreu por meio dos ensaios de resistência à compressão e de módulo de elasticidade dinâmico. Os parâmetros de durabilidade foram avaliados por meio da resistividade elétrica volumétrica, da permeabilidade à água, da absorção, e da carbonatação. Os resultados encontrados mostram que a substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares podem colaborar para um concreto de melhor qualidade e melhor desempenho das propriedades mecânicas do concreto. Os MCS empregados apresentaram teor de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ superior a 70%. A resistência à compressão dos concretos com aplicação de Metacaulim apresentou aumento em quando comparados com o concreto referência. Todos os MCS aplicados colaboraram para o aumento do módulo de elasticidade das dosagens. Além disso, os resultados apontam que houve um refinamento de poros proporcionado pelos MCS que colaborou para concretos com alta resistividade elétrica, conseqüentemente, concreto com maior durabilidade menos propícios à corrosão.

Palavras-chaves: Concreto. Durabilidade. Materiais Cimentícios Suplementares. Pozolanicidade. Metacaulim. Depozo. Cerâmica Vermelha.

ABSTRACT

The search for increasing the durability of concrete is important to reduce maintenance costs, rehabilitation or even with demolitions of buildings that generate the need for new buildings. The partial replacement of Portland cement by supplementary cementitious materials (SCM) in concrete can contribute to a better mechanical performance and durability of the concrete structure. In addition, the use of SCM may contribute to the construction industry to reduce the environmental impact caused by the extraction of non-renewable minerals and the CO₂ emission generated in the production of clinker. This work proposes to analyze the influence of different levels of supplementary cementitious materials on concrete. For this purpose, a reference dosage of usual concrete for infrastructure works was developed. From that, 9 more dosages were produced, in which Portland CPV-ARI cement was partially replaced by a certain percentage of SCM. The SCM employed will be Metacaulim, Depozo and the Red Ceramics residue, in the proportions of 5%, 10% and 20%. The mechanical characterization of the specimens occurred through the tests of compressive strength and dynamic elastic modulus. The durability parameters were evaluated using bulk electrical resistivity, water permeability, absorption, and carbonation. The results found show that the partial replacement of cement by supplementary cementitious materials can contribute to a concrete of better quality and better performance of the mechanical properties of the concrete. The compressive strength of concretes with application of Metacaulim showed an increase in relation to the reference concrete. All SCM applied significantly increased the dosage dynamic elastic modulus. In addition, the results indicate that there was a pore refinement provided by the SCM that contributed to concretes with high bulk electrical resistivity, consequently, concrete with greater durability less conducive to corrosion.

Keywords: Concrete. Durability. Supplementary Cementitious Materials. Pozzolanicity. Metakaolin. Depozo. Red Ceramics

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema do Equipamento de Resistividade Elétrica Volumétrica	26
Figura 2: Fluxograma do Procedimento Experimental.....	29
Figura 3: Materiais Cimentícios Suplementares: (A) Depozo (B) Cerâmica Vermelha (C) Metacaulim	33
Figura 4: Corpos de Prova Cilíndricos	35
Figura 5: Equipamento de Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante	40
Figura 6: Equipamento de Ensaio da Resistividade Elétrica Volumétrica	41
Figura 7: Câmara de Carbonatação.....	42
Figura 8: Espectros de DRX do Metacaulim, Depozo e Cerâmica Vermelha.....	44
Figura 9: Curvas de Termogravimetria (TGA) das pastas de cimento da referência (REF) e com 10% de substituição por Metacaulim (MET), Cerâmica Vermelha (CV) e Depozo (DEP).....	47
Figura 10: Curvas de derivada Primeira da Termogravimetria (DTG) das pastas de cimento da referência (REF) e com 10% de substituição por Metacaulim (MET), Cerâmica Vermelha (CV) e Depozo (DEP).....	48
Figura 11: Análise colorimétrica da profundidade de carbonatação dos concretos	64
Figura 12: Imagens de lupa estereoscópica com aumento de 50 vezes.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva granulométrica da Areia Natural	31
Gráfico 2: Curva granulométrica da Areia Artificial.....	31
Gráfico 3: Curva granulométrica da brita 0.....	32
Gráfico 4: Curva granulométrica da brita 1	32
Gráfico 5: Resultados médio da resistência à compressão da dosagem referência em função das dosagens com Metacaulim	49
Gráfico 6: Resultados médio da resistência à compressão da dosagem referência em função das dosagens com Depozo	50
Gráfico 7: Resultados médio da resistência à compressão da dosagem referência em função das dosagens com Cerâmica Vermelha	50
Gráfico 8: Resistência à compressão da dosagem referência em função das dosagens com substituição do cimento por 5% por Metacaulim (MET5), Depozo (DEP5) e Cerâmica Vermelha (CV5).....	51
Gráfico 9: Resistência à compressão da dosagem referência em função das dosagens com substituição do cimento por 10% por Metacaulim (MET10), Depozo (DEP10) e Cerâmica Vermelha (CV10).....	52
Gráfico 10: Resistência à compressão da dosagem referência em função das dosagens com substituição do cimento por 20% por Metacaulim (MET20), Depozo (DEP20) e Cerâmica Vermelha (CV20).....	52
Gráfico 11: Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante da dosagem referência em função das dosagens com Metacaulim.....	53
Gráfico 12: Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante da dosagem referência em função das dosagens com Depozo	54
Gráfico 13: Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante da dosagem referência em função das dosagens com Cerâmica Vermelha.....	54
Gráfico 14: Módulo de elasticidade por frequência Ressonante do concreto referência em função das dosagens com substituição do cimento por 5% por Metacaulim (MET5), Depozo (DEP5) e Cerâmica Vermelha (CV5).....	55

Gráfico 15:Módulo de elasticidade por frequência Ressonante do concreto referência em função das dosagens com substituição do cimento por 10% por Metacaulim (MET10), Depozo (DEP10) e Cerâmica Vermelha (CV10)	56
Gráfico 16:Módulo de elasticidade por frequência Ressonante do concreto referência em função das dosagens com substituição do cimento por 20% por Metacaulim (MET20), Depozo (DEP20) e Cerâmica Vermelha (CV20)	56
Gráfico 17:Resistividade Elétrica Volumétrica da dosagem referência em função das dosagens com Metacaulim.....	57
Gráfico 18: Resistividade Elétrica Volumétrica da dosagem referência em função das dosagens com Cerâmica Vermelha.....	58
Gráfico 19:Resistividade Elétrica Volumétrica da dosagem referência em função das dosagens com Depozo	58
Gráfico 20:Resistividade Elétrica Volumétrica do concreto referência em função das dosagens com substituição do cimento por 5% por Metacaulim (MET5), Depozo (DEP5) e Cerâmica Vermelha (CV5)	60
Gráfico 21:Resistividade Elétrica Volumétrica do concreto referência em função das dosagens com substituição do cimento por 10% por Metacaulim (MET10), Depozo (DEP10) e Cerâmica Vermelha (CV10)	60
Gráfico 22:Resistividade Elétrica Volumétrica do concreto referência em função das dosagens com substituição do cimento por 20% por Metacaulim (MET20), Depozo (DEP20) e Cerâmica Vermelha (CV20)	61
Gráfico 23:Profundidade de carbonatação.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização do cimento CPV – ARI	30
Tabela 2: Caracterização da Areia Natural	31
Tabela 3: Caracterização da Areia Artificial	31
Tabela 4: Caracterização da Brita 0	32
Tabela 5: Caracterização da Brita 1	32
Tabela 6: Composição química	43
Tabela 7: Superfície específica	45
Tabela 8: Massa específica	45
Tabela 9: Índices de pozolanicidade IABNT e INF e a razão entre sesses valores (IABNT/INF)	46
Tabela 10: Absorção por imersão e Índice de vazios	62

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ASTM – American Society for Testing and Materials
BET – Brunauer, Emmett e Teller
BS – British Standard
CP – Cimento Portland
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado
DTA – Análise Térmica Diferencial
DRX – Difração de Raios-X
DTG – Derivada Primeira da Termogravimetria
MCS – Materiais Cimentícios Suplementares
NBR – Norma Técnica Brasileira
TGA – Termogravimetria

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Materiais cimentícios suplementares	16
3.1.1 MCS nos compósitos cimentícios	17
3.1.2 Metacaulim	19
3.1.3 Depozo	20
3.1.4 Resíduos de Cerâmica Vermelha	21
3.2 Durabilidade do concreto	21
3.2.1 Degradações físicas	22
3.2.2 Degradações químicas	23
3.2.3 Parâmetros de durabilidade	24
3.2.3.1 Resistividade Elétrica Volumétrica	24
3.2.3.2 Permeabilidade à água e aos gases	27
3.2.3.3 Carbonatação	28
4 MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 Materiais	30
4.1.1 Dosagens	33
4.2 Métodos	35
4.2.1 Caracterização das matérias primas	35
4.2.1.1 Caracterização dos materiais cimentícios suplementares	36
4.2.2 Elaboração da dosagem	37
4.2.3 Confeccção dos concretos	38
4.2.4 Propriedades Mecânicas e Avaliação da Durabilidade	39
4.2.4.1 Ensaio de resistência à compressão	39
4.2.4.2 Módulo de elasticidade	39
4.2.4.3 Avaliação da resistividade elétrica volumétrica	40
4.2.4.4 Carbonatação	41
4.2.4.5 Absorção de água por imersão	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43

5.1 Caracterização dos Materiais Cimentícios Suplementares	43
5.1.1 Composição química	43
5.1.2 Superfície específica e massa específica	45
5.1.3 Granulometria	45
5.1.4 Pozolanicidade	46
5.1.4.1 Chapelle Modificado	46
5.1.4.2 Termogravimetria	47
5.2 Caracterização mecânica das dosagens	48
5.2.1 Resistência à compressão	49
5.2.2 Módulo de elasticidade por frequência ressonante	53
5.2.3 Resistividade Elétrica Volumétrica	57
5.2.4 Absorção por imersão e índice de vazios.	62
5.2.5 Carbonatação	63
5.2.6 Microscopia Óptica.....	65
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica do concreto é um assunto de destaque nas pesquisas científicas. As abordagens visam o estudo do aumento da durabilidade do concreto por meio do aprimoramento das propriedades mecânicas. (KHODABAKHSHIAN, *et al.*, 2017; MEDINA *et al.*, 2017; SEGUL, 2014). A busca pelo aumento da durabilidade do concreto é importante no sentido de reduzir os custos de manutenções, reabilitações ou mesmo com demolições de edificações que geram a necessidade de novas edificações.

Concomitante a necessidade de um concreto com maior vida útil, há, também, preocupação em tornar a construção civil mais ecoeficiente e preservar os recursos naturais (XIE; VISINTIN, 2018). Uma vez que, o aumento do consumo de energia e recursos naturais, nos últimos tempos, é atribuído à construção civil (SAMOUH *et al.* 2018; ANDREW, 2018). MILLER (2018) afirma que a construção civil é responsabilizada por cerca 9% da emissão de CO₂ no mundo, anualmente.

Neste sentido, diversos estudos mostram que a inserção de resíduos agroindustriais podem melhorar as propriedades do concreto relacionadas diretamente à durabilidade, como menor permeabilidade e porosidade, tornando-o menos susceptível às agressões do meio (SHARMA E KHAN, 2018; JUENGER E SIDDIQUE, 2015). Além de outras propriedades como resistência à compressão e módulo de elasticidade que são melhoradas (HAN *et al.*, 2018). E, ainda, direciona de forma mais adequada os resíduos gerados pela indústria, evitando o descarte no meio ambiente.

WU *et al.* (2018) desenvolveram em seu trabalho um cimento verde composto por cimento Portland superfino e resíduos finos de escória de alto forno e cinza volante. Os resultados mostram que o cimento composto com os resíduos apresentou melhores resultados mecânicos quando comparados ao cimento Portland comum. HUANG *et al.* (2019) estudaram um concreto ternário composto por cimento Portland, Metacaulim e sílica ativa. De acordo com os resultados, a inserção desses materiais cimentícios suplementares colaboraram para melhoria das propriedades de resistência à compressão e resistência à permeabilidade à íons cloreto do concreto.

Os ensaios de permeabilidade à água e à gases, absorção de água e difusão são amplamente utilizados para avaliação da durabilidade do concreto (DHANYA *et al.*, 2018; MEHRA; GUPTA; THOMAS, 2016). Entretanto, o emprego de ensaios não destrutivos é cada vez mais preferido para análise da estruturas de concreto (JAFARI *et al.*, 2018). Dentre estes

ensaios, pode-se citar o ensaio de resistividade elétrica. A resistividade elétrica representa o quanto um material se opõe à passagem do fluxo da corrente elétrica. CHEN; CHANG; YEIH, (2014), afirmam que os valores de resistividade elétrica podem ser utilizados como índices de qualidade e durabilidade do concreto, devido à correlação entre porosidade e permeabilidade encontrada em suas análises.

MEDEIROS e LIMA (2016) analisaram o comportamento da resistividade elétrica em cimentos comerciais brasileiros. Os cimentos estudados foram os cimentos Portland dos tipos CP II, CP III, CP IV e CPV-ARI. Os resultados apurados mostram que a composição do cimento influencia significativamente os valores de resistividade elétrica do material. Os cimentos do tipo CPIII, com alto teor de escória de alto-forno, e o cimentos do tipo CP IV, com alto teor de pozolana, apresentaram maiores valores de resistividade quando comparados aos cimentos do tipo CP II e CPV-ARI. Os autores atribuem esta diferença ao efeito do refinamento dos poros do concreto, e, assim proporciona a redução da permeabilidade devido a adições.

Diante do exposto, observa-se que o uso de materiais suplementares cimentícios é um importante fator no desempenho do concreto visando à durabilidade da estrutura. Um grande destaque, atribuído ao uso de resíduos agroindustriais no concreto, está relacionado a colaboração para redução do impacto ambiental causado pela produção do clínquer, uma vez que seu uso é reduzido. Ressalta-se que cada país faz uso dos resíduos agroindustriais abundantes no seu território. Assim, um estudo com os resíduos disponíveis no Brasil é relevante pois colabora para a prática local, além de possibilitar uma comparação com materiais estudados em outros países.

Desse modo, para uso adequado dos MCS é necessário um melhor entendimento sobre as proporções a serem empregadas e as mudanças significativas que causam na estrutura do concreto. Assim, este trabalho, propõem buscar um melhor entendimento sobre a análise da influência de diferentes teores de adições pozolânicas em parâmetros de durabilidade do concreto, com o intuito de contribuir no avanço das pesquisas em concretos com melhores propriedades mecânicas, maior durabilidade e mais ecoeficientes.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência de diferentes teores de adições de materiais cimentícios suplementares em concreto. Para tanto, os objetivos específicos deste trabalho são:

- determinar a influência de diferentes teores de materiais cimentícios suplementares nas propriedades mecânicas do concreto como resistência à compressão e módulo de elasticidade.
- determinar a influência de diferentes teores de materiais cimentícios suplementares nos parâmetros de durabilidade do concreto como resistividade elétrica,

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Concomitante ao crescimento da civilização tem-se o aumento do consumo de materiais cimentícios (SCRIVENER; JUILLAND; MONTEIRO, 2015). Embora a indústria dos materiais cimentícios vise a evolução tecnológica mais ecoeficiente, pouco avanço houve nessa área (BIERNACKI *et al.*, 2017; SCHNEIDER, 2015). No âmbito da construção civil, o processo de produção do clínquer é o maior responsável pela emissão de CO₂ ao meio ambiente (ANDREW, 2018; MILLER *et al.*, 2016).

Nesse contexto, XU *et al.* (2015) afirmam que esforços são direcionados para implementar equipamentos de alta eficiência e processo limpo, além da utilização abrangente de resíduos agroindustriais na composição dos materiais cimentícios. ANDREW (2018) afirma que menores razões de clínquer tem sido empregada na produção do cimento por todo o mundo, nas últimas 3 décadas.

Assim, o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS), segundo LUDWIG; ZHANG (2015), é a alternativa mais viável para a produção de materiais cimentícios com menor emissão de CO₂. Além de menor impacto ambiental, a inserção de MCS contribui significativamente na melhoria de propriedades do concreto relacionado a maior resistência à compressão a longo prazo e maior durabilidade (JUENGER; SIDDIQUE, 2015).

3.1 Materiais cimentícios suplementares

Os materiais cimentícios suplementares (MCS) são geralmente materiais cimentantes ou pozolânicos (PARIS *et al.*, 2016). Os materiais cimentantes se comportam semelhante ao cimento comum endurecendo em contato com água. As pozolanas são materiais procedentes de uma fonte original que seja rica em silício (Si) e alumínio (Al) (APRIANTI *et al.*, 2015). A atividade pozolânica corresponde à reação de SiO₂ e Al₂O₃ em materiais pozolânicos com hidróxido de cálcio formado durante o processo de hidratação do cimento Portland (XIE; VISINTIN, 2018)

A inserção dos MCS no concreto, geralmente, conferem melhorias nas propriedades mecânicas e de durabilidade por meio dos efeitos químicos e físicos (CHEN; LI; JIN, 2017a). A interação vítrea da pozolana com o hidróxido de cálcio é o efeito químico, nesse momento forma-se silicato de cálcio hidratado (CSH) responsável pela resistência mecânica da pasta cimentícia. O efeito físico está relacionado ao refinamento da matriz cimentícia, o qual confere maior densidade e compacidade ao preencher os vazios entre o grão de cimento (ZHANG *et al.*, 2017). Um concreto com uma matriz cimentícia menos porosa e mais densa tende a ter uma maior durabilidade.

3.1.1 MCS nos compósitos cimentícios

A identificação de novos MCS adequados, a maximização de seu uso e a melhoria de seu desempenho podem ser melhor alcançados por meio da caracterização apropriada do material (PARIS *et al.*, 2016). Os MCS são materiais necessariamente finos, e a característica principal a ser analisada é a sua pozzolanicidade. Pode-se citar como MCS a cinza volante, o Metacaulim, a escória de alto forno, a cinza de casca de arroz, a argila calcinada entre outros (APRIANTI S, 2017).

Quanto à reatividade pozzolânica, os MCS são avaliados por ensaios qualitativos classificados como diretos e indiretos (BAHURUDEEN *et al.*, 2015). Os métodos diretos como teste do Chapelle Modificado e teste Frattini controlam a presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e sua imediata redução em relação ao tempo. Nos indiretos mede-se uma propriedade física da amostra que indica a extensão da atividade pozzolânica como nos testes de resistência mecânica, condutividade elétrica, termogravimetria e calor pela condução (AZARSA; GUPTA, 2017; CORDEIRO e KURTIS, 2017; CORDEIRO *et. al.*, 2009; HOLLANDERS *et al.*, 2016; TIRONI *et al.*, 2012).

CARNEIRO *et al.*, (2018) fizeram uso do método da variação de condutividade elétrica, proposto por LUXAN e MADRUGA, (1988), para avaliar a pozzolanicidade da sílica ativa e da sílica nanoestruturada geo-sol. Trata-se de ensaio no qual observa-se a relação linear entre o consumo de íons Ca^{2+} durante a reação de pozzolana e a diminuição da condutividade de uma solução saturada de hidróxido de cálcio. Os resultados alcançados mostraram que ambos os produtos testados são altamente reativos.

Outro método de análise é a determinação por meio do índice de resistência à compressão. Nesse método indireto compara-se a resistência à compressão de uma argamassa referência com outra argamassa em que 35% do volume de cimento foi substituído pelo MCS. Esse método é abordado na NBR 5751(2015) e na NBR 5752(2014). A primeira trata-se do índice de atividade pozzolânica com cimento e a segunda com cal. CORDEIRO; KURTIS, (2017) avaliaram a pozzolanicidade do bagaço de cana de açúcar por meio do índice de resistência à compressão com cimento aos 7 e 28 dias. Os valores encontrados foram considerados satisfatórios

Ainda, pode-se determinar a pozzolanicidade de uma material por meio da avaliação do teor de hidróxido de cálcio fixado, em miligramas (mg) de CaO por grama (g) de amostra, na

qual quanto maior o teor de óxido de cálcio fixado, maior será a reatividade do produto avaliado (EMBONG *et al.*, 2016). Esse método é chamado de Chapelle Modificado. O método foi empregado por HOLLANDERS *et al.*, (2016) para avaliar argilas calcinadas em diferentes temperaturas. Os MCS calcinados a cerca de 900°C apresentaram o consumo de CaO maior que 800mg/g, sendo assim, altamente reativo, considerando que consumo mínimo deve ser 330mg/g.

As análises térmicas, termogravimetria (TGA) e análise térmica diferencial (DTA), são empregadas para análise de pozolanicidade. O método TGA baseia-se em medir a variação de massa em função da temperatura da amostra. A DTA consiste na medição regular das temperaturas do material referência e da amostra avaliada. Assim, pode-se estimar a quantidade de Ca(OH)_2 presente nos MCS (KAZMI *et al.*, 2017; HOLLANDERS *et al.*, 2016;).

Diversos estudos abordam o uso do MCS em substituição ao clínquer na concepção do cimento, ou em substituição ao cimento na execução dos concretos e das argamassas.(AL-AYISH *et al.*, 2018; SCHULZE; RICKERT, 2018; APRIANTI *et al.*, 2015;CRUZ *et al.*, 2013). Os estudos destacam que a inserção dos MCS colabora tanto no estado fresco quanto no endurecido do concreto, melhorando a trabalhabilidade e a durabilidade. E ainda reduz a permeabilidade e o calor liberado durante a hidratação, o que diminui a incidência de fissuração nos elementos cimentícios (JIAO *et al.*, 2017; AHARI,ERDEM, RAMYAR, 2015; BEYCIOLU e YILMAZ ARUNTAŞ, 2014;).

No trabalho de HOOTON *et al.*, (2018) analisou-se a inserção de sílica ativa, subproduto da indústria de ligas de silício e ferro-silício. Os resultados mostram que a dosagem com adição de 10% de sílica ativa aumentou a resistência à compressão e o módulo de elasticidade quando comparado a dosagem sem adição. Os autores atribuem essas melhorias, principalmente, ao fato de a partícula apresentar um tamanho cerca de 12 vezes menor que a do cimento. Essa diferença pode levar ao preenchimento de vazios gerando um concreto menos poroso e, conseqüentemente, propicia melhora nas propriedades mecânicas.

KURDA *et. al.*, (2019), apresentaram um estudo no qual fizeram o uso de cinza volante, produto obtido no processo de combustão das termoelétricas ao carvão, em substituição ao cimento. Os resultados encontrados mostram que a absorção de água diminui e os valores de resistividade elétrica aumentam com o uso da cinza volante. Em relação à absorção de água, os autores destacam que a forma esférica e o tamanho reduzido das partículas de cinza volante aumentam a densidade do concreto uma vez que preenchem os vazios entre as partículas dos outros materiais utilizados. Outro ponto relevante abordado é que a cinza volante devido ao seu alto teor de Al_2O_3 pode diminuir a penetração de íons.

O uso da cinza de casca de arroz no concreto é estudado amplamente, um vez que trata-se de um resíduo agrícola abundante na maior parte do mundo (KANG *et al.*, 2019; PARK *et al.*, 2016). GURSEL *et al.*, (2016) mostram os resultados alcançados ao utilizar cinza de casca de arroz no concreto. As propriedades de resistência mecânica aprimoram com adição do material suplementar, resultados melhores foram obtidos em idades mais avançadas. A permeabilidade dos espécimes reduziu, colaborando assim para um concreto com maior durabilidade.

O resíduo de cerâmica vermelha foi abordado no trabalho de SCHACKOW *et al.*, (2015). Os pesquisadores confeccionaram corpos de prova com substituição parcial do cimento Portland por 0, 10, 25 e 40% do resíduo. Dentre os vários ensaios realizados, aos 28 e 90 dias, os corpos de prova foram submetidos ao teste de carbonatação. Os resultados indicam que aos 28 dias a extensão da carbonatação não foi afetada pela adição do resíduo. Porém, aos 90 dias, os espécimes com 10% e 25% apresentaram menor taxa de carbonatação quando comparado aos demais.

3.1.2 Metacaulim

O Metacaulim é um material aluminossilicoso com partículas extremamente finas, altamente pozzolânico, obtido por meio da calcinação das argilas cauliníticas. O processo de calcinação, em torno de 600°C a 900°C, promove a redução das hidroxilas e destrói a estrutura cristalina, tornando o composto altamente amorfo (FABBRI *et al.*, 2013). Após a calcinação o material é denominado metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$) com composição proporções semelhantes de SiO_2 e Al_2O_3 (BAHURUDEEN *et al.*, 2015).

O uso do metacaulim como material cimentício suplementar se tornou interessante devido à alta propriedade pozzolânica e a abundância de reservas de caulim. Cerca de 95% das reservas mundiais de caulim, 15 bilhões de toneladas, concentram-se nos Estados Unidos da América, 53%, Brasil, 28%, Ucrânia (7%) e Índia (7%) (HUANG *et al.*, 2018). Embora haja uma quantidade relevante de matéria prima, o custo do produto no mercado é elevado pois o uso ainda não é difundido em larga escala.

Outro ponto relevante que contribui para o interesse em ampliar o seu uso é que no processo de produção envolve temperaturas mais baixas o que leva a um menor consumo energético e menor emissão de gases tóxicos quando comparado ao processo de fabricação do cimento Portland e do clínquer (ANDREW, 2018; XU *et al.*, 2015). Considera-se o metacaulim

eficiente tecnologicamente e ambientalmente, não só quando comparado ao clínquer , mas também quando comparado com outros materiais cimentícios suplementares como escória de alto forno e cinza volante (ANDREW, 2018).

SHARMA e KHAN, (2018) avaliaram a durabilidade do concreto por meio ensaio de resistividade elétrica, absorção de água e o ataque de sulfatos. O concreto com adição Metacaulim apresentou uma maior resistividade elétrica, logo, trata-se de um concreto menos propenso à penetração de agentes nocivos na estrutura. Esta afirmativa se confirma com base nos resultados de ataque de sulfatos e absorção de água. O concreto sem adição de Metacaulim apresentou maior penetração quando comparado ao concreto com adição do material. A absorção diminuiu com a adição do Metacaulim, indicando uma menor porosidade nesse concreto.

3.1.3 Depozo

O Depozo é uma mistura ternária de escória de alto forno, resíduo de cerâmica vermelha e resíduo de porcelanato, numa proporção de 6:1:1. A escória de alto forno é rica em sílica e alumina. Quando finamente moída e com estrutura não cristalina, apresenta propriedades similares aos aglomerantes hidráulicos (ELAKNESWARAN *et al.*, 2016). O resíduo de cerâmica vermelha é obtido por meio da moagem de resíduos de tijolos ou telhas de cerâmica vermelha. O resíduo de porcelanato é procedente do próprio processo de fabricação no momento do acabamento das peças, as peças de porcelanato são fabricadas com argilas caulínicas.

O material é finamente moído e empregado na fabricação de cimentos do tipo CP IV, cimentos pozolânicos, na região de Minas Gerais. Ele é comercializado por empresas de beneficiamento de resíduos diversos, como por exemplo resíduos de fábricas de revestimento cerâmico, de produção de aço e de resíduos de fábrica de blocos e telhas cerâmicas. Como o Depozo é composto integralmente por resíduos de outros processos industriais ele se torna muito atrativo do ponto de vista da sustentabilidade. E, ainda, atrativo economicamente quando se considera a redução do uso do clínquer na fabricação do cimento.

3.1.4 Resíduos de Cerâmica Vermelha

Os resíduos de cerâmica vermelha são provenientes de tijolos e telhas de cerâmica vermelha. Esses materiais são produzidos por meio de tratamentos térmicos das argilas vermelhas com temperaturas em torno de 800°C (ANDREOLA *et al.*, 2021). O tratamento térmico promove a desidroxilação de minerais de argila e forma fases amorfas reativas (NAVRÁTILOVÁ; ROVNANÍKOVÁ, 2016). Os resíduos para serem usados em substituição parcial do cimento Portland, geralmente, devem apresentar grãos mais finos do que do próprio cimento. Por isso, os resíduos são submetidos a um processo de cominuição para atingirem uma finura desejada.

Ge *et al.*, (2015) verificaram que o concreto com substituição do cimento pela cerâmica vermelha apresenta baixa penetrabilidade dos íons cloretos e alta resistência ao congelamento-degelo. À medida que o percentual de resíduo aumentou, a resistência mecânica da idade precoce diminuiu. No entanto, à medida que a idade de cura aumentava, a resistência do concreto com o resíduo era semelhante à do concreto de referência.

3.2 Durabilidade do concreto

As estruturas de concreto ficam expostas a diferentes meios os quais podem colaborar para a redução da vida útil (CAI *et. al.*, 2018; MEDINA *et. al.*, 2013). A vida útil de uma estrutura de concreto está relacionada com as propriedades de durabilidade do sistema construtivo e dos materiais que o constituem. A durabilidade é a capacidade do concreto de resistir às ações dos intempéries, ataques químicos ou qualquer outra situação que cause a degradação da estrutura e comprometa a eficiência da edificação (MEHTA e MONTEIRO, 2013)

Nesse contexto, diversos autores estudam os fatores que afetam a durabilidade do concreto e, ainda, buscam possibilidades de melhoria com intuito de aumentar a vida útil das edificações (HAO *et. al.*, 2018; MEHRA *et. al.*, 2016; ADAMSON *et. al.*, 2015). Embora as propriedades mecânicas como resistência à compressão e módulo de elasticidade sejam tão abordadas, os estudos mostram que quanto à durabilidade as propriedades de permeabilidade à água e gases e a capacidade de absorção são mais relevantes (ABRAHAM e RANSINCHUNG, 2018; ZEYAD *et al.*, 2017; MEHTA e MONTEIRO, 2013)

No que diz respeito à permeabilidade à água e a gases, a literatura afirma que dosagens de concreto elaboradas com uma menor relação água/cimento apresentam uma estrutura menos porosa (SUN *et al.*, 2018). VALENTINI *et al.* (2018) alegam que a propriedade da permeabilidade é o fator principal a ser controlado quando o objetivo é ter maior durabilidade.

Uma vez que, através dos poros os agentes nocivos ao concreto atingem a armadura causando deterioração. HU(2017) confeccionou corpos de provas com relação água/cimento 0,45 e 0,35. Aos 90 dias, os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de penetração de cloreto e a penetração de CO₂. O concreto com menor relação água cimento sofreu menos ataque quando comparado com o concreto com maior relação água/cimento.

Quanto à durabilidade, a NBR 6118 (ABNT, 2014a) determina a relação água/cimento e o cobrimento adequado em função do grau de agressividade do ambiente. *AL-AYISH et al.*, 2018, estudaram concretos com diferentes cobrimentos e com adição de materiais cimentícios suplementares. Os corpos de prova foram expostos a cloretos, simulando um ambiente marítimo, classificado no grau III, forte, pela NBR 6118 (ABNT, 2014a). Os resultados mostram que os corpos de prova com maior cobrimento, bem como os com adição de cinza volante resistiram mais ao ataque.

A inclusão de materiais suplementares no concreto pode colaborar para uma maior durabilidade a longo prazo (JUENGER; SIDDIQUE, 2015). Em seus estudos, GILL; SIDDIQUE (2018) analisaram as propriedades de absorção de água e permeabilidade de corpos de provas com adição de 0%, 5%, 10% e 20% de Metacaulim. Os resultados mostram que o concreto adição de 5% de Metacaulim apresentou menor absorção em relação ao sem adição e em relação aos demais corpos de prova. Os autores relacionam este efeito ao módulo de finura da adição. O menor valor de módulo de finura demanda mais água no processo de mistura de concreto, colaborando para um concreto mais poroso e, conseqüentemente, mais permeável e menos durável.

Nesse âmbito, HOOTON e BICKLEY (2014) afirmam que a durabilidade do concreto está diretamente relacionada com o projeto de concreto mais sustentável. Uma vez que, um material sustentável é aquele que tem maior vida útil, justificando o consumo de energia despendido para sua criação. Portanto, as pesquisas tecnológicas em concreto acompanham essa tendência analisando as melhorias nas propriedades de durabilidade por meio de tecnologias mais ecoeficientes.

3.2.1 Degradações físicas

O meio no qual a estrutura de concreto está inserido pode colaborar para o surgimento de patologias e por conseguinte a redução da sua vida útil (JOSHAGHANI *et al.*, 2018).

Desgaste superficial, cristalização de sais nos poros, congelamento e ação do fogo no concreto são alguns dos fenômenos responsáveis pela degradação física de uma estrutura de concreto.

A condição da camada superficial do concreto é importante para durabilidade das estruturas, o desgaste superficial colabora para a perda de espessura da estrutura e leva a redução da durabilidade (KOTHANDARAMAN e KANDASAMY, 2017). Os fenômenos responsáveis podem ser: a abrasão, desgaste devido ao tráfego de pessoas, veículos e vento, a erosão, causada pelo fluidos em movimento que colidem ou escoam pela superfície, e a cavitação, o fluxo de água em alta velocidade pequenas cavidades na superfície (ROSENQVIST *et al.*, 2017).

Em regiões com presença de sal nas águas, a cristalização de sais nos poros do concreto é um fato recorrente. Esse material depositado provoca um aumento de volume e manifestação de eflorescências comprometendo o desempenho mecânico do concreto. A água com presença de sais percolam através dos poros e condutos capilares, como a superfície está exposta ao ar a água evapora deixando os sais (HAN *et al.*, 2018).

Os fenômenos de temperatura, congelamentos, descongelamentos e aquecimentos, agredem severamente as estruturas de concreto. Ao congelar a água expande de volume e provoca fissuras na estrutura que possibilita a entrada de agentes agressivos como íons de cloreto no concreto, o que colabora para processos de degradação das armaduras. Os compósito cimentícios mais porosos são o mais afetados (HAO *et al.*, 2018; HUDA *et al.*, 2015). As altas temperaturas provocam lascamentos no concreto que afetam o desempenho mecânico da estrutura, além de, também, permitir a entrada de agentes agressivos (YUAN e LI, 2015).

3.2.2 Degradações químicas

As estruturas de concreto, expostas ao meio ambiente, sofrem alterações que podem comprometer a qualidade da estrutura devido às reações químicas na estrutura que permitem a redução dos CSH (VALENTINI *et al.*, 2018). Pode-se citar alguns mecanismos de degradação química como ataque por sulfatos e de gás carbônico entre outros.

A degradação da pasta cimento por ataque químico do sulfato surge das reações que ocorrem entre os íons sulfato e os produtos de hidratação do concreto, alterando assim a composição da matriz cimentícia. IKUMI *et al.* (2017) concluíram em sua pesquisa, por meio de análises de DRX que a solução de sulfato reagiu com a matriz cimentícia formando gesso.

ZHANG *et al.*, (2020) demonstraram com seus resultados que concretos imersos em soluções de sulfato alteram negativamente a resistência ao cisalhamento.

As estruturas de concreto expostas a altas concentrações de gás carbônico estão sujeitas ao efeito da carbonatação. Em contato com a umidade, o CO₂ e os outros gases de ação ácida que se encontram no interior do concreto reagem com os produtos alcalinos liberados das reações de hidratação do cimento, principalmente com o Ca(OH)₂, que se encontra em maior quantidade nos poros, formando o carbonato de cálcio (CaCO₃) (MEHTA e MONTEIRO, 2013). Esse processo de carbonatação é um dos causadores da redução do potencial hidrogeniônico (pH) em compósitos cimentícios. Com a perda de alcalinidade pode levar a despassivação das armaduras, dando condições ao início de um processo de corrosão e a redução da vida útil da estrutura (SHEN *et al.*, 2020).

3.2.3 Parâmetros de durabilidade

A vida útil das estruturas de concreto é um fator de impacto econômico da indústria da construção civil. Assim, um melhor entendimento dos agentes que acentuam o processo de degradação das estruturas de concreto é relevante. Esses estudos proporcionam a oportunidade de inserir novos materiais, como por exemplo os materiais cimentícios suplementares, e, até mesmo novas tecnologias construtivas.

Dentre os diversos parâmetros que auxiliam no controle dos processos de degradação no concreto, pode-se citar a resistividade elétrica, capacidade de absorção e a carbonatação. A porosidade do concreto, no que tange ao tamanho de poros e conectividade, é um aspecto relevante que pode interferir nesses parâmetros citados, além de influenciar na resistência à compressão.

3.2.3.1 Resistividade Elétrica Volumétrica

A resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca de cada material, e refere-se à quanto um material se opõe à passagem do fluxo da corrente elétrica (HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, 2016). Nos materiais cimentícios, usualmente, os métodos empregados para medição dessa propriedade são a resistividade elétrica superficial e a volumétrica, ambos não destrutivos (GHOSH; TRAN, 2015). CHEN; CHANG; YEIH, (2014)

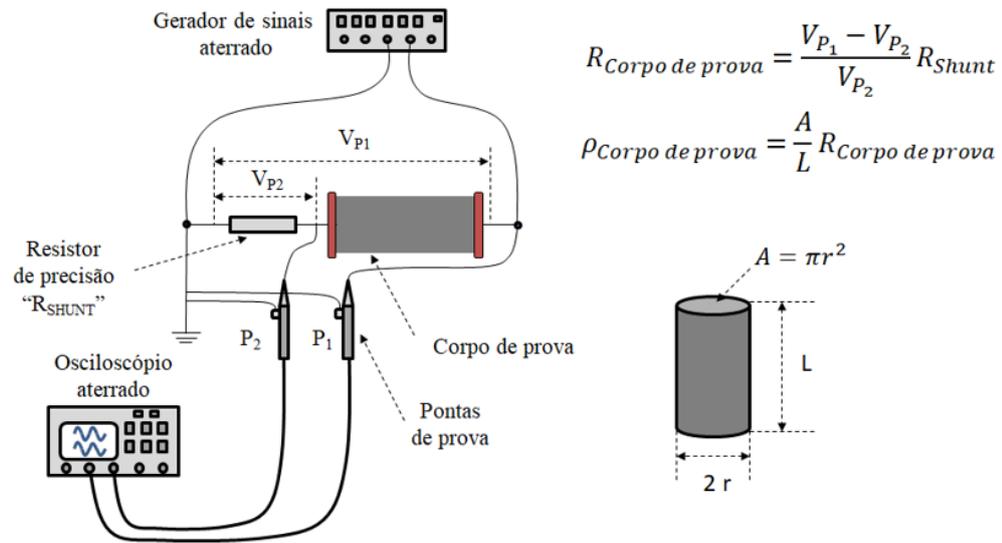
afirmam que a resistividade elétrica pode ser usada como um índice da conectividade dos poros dentro do concreto e, portanto, pode ser empregada como um indicativo da qualidade do concreto quanto à susceptibilidade de corrosão das armaduras por íons cloreto.

Nesse contexto, diversos estudos abordam correlações entre a resistividade elétrica e algumas propriedades dos materiais cimentícios. Como exemplo, pode-se citar os trabalhos de LIU *et al.* (2015) e KURDA *et al.* (2018b) nos quais se abordou a relação da capacidade de absorção de água e da permeabilidade de cloretos no concreto com os valores de resistividade elétrica. YIM *et al.* (2017) dedicou seu estudos a analisar a evolução da resistividade em função do tempo de pega das argamassas. GHODDOUSI e SAADABADI (2017) propuseram uma correlação entre a evolução dos produtos de hidratação do cimento com a resistividade elétrica. LIU *et al.* (2014) fizeram uma correlação quantitativa da resistividade elétrica e do volume de poros.

As literaturas disponíveis apresentam métodos distintos para análise da resistividade elétrica. A medição de resistividade elétrica sem contato foi usada para avaliar a hidratação de pastas de cimento por DONG *et al.* (2016), e a formação de microfissuras em idades precoces por CHEN *et al.* (2017). O método dos quatro eletrodos, baseado no trabalho do WENNER, (1916), é amplamente utilizado devido a sua praticidade de aplicação (CHEN *et al.*, 2014; MOSAVINEJAD *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2014). NGUYEN *et al.*, (2018) propôs uma adaptação ao método anterior para avaliar a corrosão em armaduras.

Neste trabalho será aplicado o método dos dois eletrodos, denominado, também, como resistividade elétrica volumétrica. O método foi aplicado em diversos trabalhos no quais avaliaram-se propriedades do concreto relacionado a durabilidade (JAFARI *et al.*, 2018; GUI, QIN e LI, 2016; HORNBOSTEL *et al.*, 2015) . Trata-se de uma corrente alternada entre dois eletrodos paralelos que são colocados em ambas as extremidades da amostra de concreto e, em seguida, mede-se o potencial elétrico entre eles, Figura 1. Os valores apurados são usados para determinar a resistência e posteriormente a resistividade elétrica.

Figura 1: Sistema do Equipamento de Resistividade Elétrica Volumétrica



Fonte: Laboratório de Caracterização UFMG

Quanto às variáveis que influenciam na medição da resistividade elétrica, pode-se defini-los ao analisar a equação que a determina. De acordo com Halliday (2016), a resistividade elétrica tem como variantes a natureza do material utilizado, que determinará a resistividade elétrica específica (ρ), o comprimento L (m) e a seção transversal A (m²).

Formando a Equação 1:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Onde: R é a resistência elétrica (Ω/m);

ρ é a resistividade elétrica específica do material ($\Omega.m$);

L é o comprimento (m);

A é a área de seção transversal (m²).

CHEN *et al.* (2014) afirmam que a geometria do corpo de prova deve ser considerada para análise da resistividade elétrica superficial e volumétrica. Considerando as condições do material analisado, LIU *et al.* (2015) abordam a influência do grau de saturação. LIU *et al.*, (2013) estudaram a influência da variação de temperatura. Quanto à composição dos corpos de prova, foi estudada a adição de materiais suplementares (MOTAHARI KAREIN *et al.*, 2018), a adição de agregados reciclados (FANECA *et al.*, 2018), a inserção de fibras (BERROCAL *et al.*, 2018), entre outros.

3.2.3.2 Permeabilidade à água e aos gases

A microestrutura do concreto é formada por uma rede de poros de diâmetros distintos, na qual a tortuosidade e conectividade o deixam vulnerável aos processos de degradação físicos e químicos (PARK *et al.*, 2018). A determinação do percentual de absorção de água pode ser aplicada como um parâmetro de durabilidade, uma vez que é um indicativo das condições de porosidade do concreto, conseqüentemente, da resistência desse frente à penetração de líquidos e gases agressivos a matriz cimentícia.

Quanto aos mecanismos de transporte no concreto, a literatura afirma que a configuração dos poros, interconexões e distribuição de tamanho dos poros, determinam o tipo: permeabilidade, difusão ou absorção. Enquanto a velocidade é determinada pela distribuição do tamanho dos poros na microestrutura (MEHTA e MONTEIRO, 2013).

A permeabilidade ocorre em virtude de uma diferença de pressão, a qual permite a entrada de fluídos que levam os agentes agressivos ao concreto. A absorção associa-se ao transporte de líquidos por ação de uma tensão superficial atuando nos poros capilares. A difusão é um processo natural que pode ocorrer tanto em meios líquidos como em meios gasosos, sendo mais rápido em gases. Trata-se do deslocamento de gases ou líquidos no interior do concreto devido à diferença de concentração, com pressões e temperaturas iguais.

Considerando que a formação porosa da microestrutura esta diretamente relacionada à facilidade de transporte dos agentes danosos à durabilidade do concreto, estudos buscam o refinamento dos poros por meio de inserção de pozolanas, filler e redução de relação água cimento. Gill & Siddique (2018) avaliaram a porosidade e capacidade de absorção de concretos com adição de metacaulim e cinza de casca de arroz frente a concretos sem adição. Os concretos com adição apresentaram redução de aproximadamente 45% na absorção de água e 46% na porosidade comparado a dosagem de referência.

Gui *et al.*, (2016) confeccionaram concretos com quatro relações água/cimento distintas: 0,3, 0,4, 0,5 e 0,6. À dosagem controle, concebida com cimento Portland comum, foi incorporado 30% de cinza volante, e em outra 50% de escória. Ao avaliar os tamanhos característicos dos poros, os resultados obtidos mostram que o uso de materiais cimentícios suplementares colaboraram para o refinamento dos poros. Bem como, as amostras com menor relação água/cimento mostraram menor disposição à permeabilidade de água ou gases.

3.2.3.3 Carbonatação

A carbonatação do concreto é um processo de degradação físico-químico, que colabora o a redução da vida útil das estruturas (KAZMI *et al.*, 2020). Inicia-se pela reação do gás carbônico (CO_2), que penetra pelos poros por meio do mecanismos de transporte de absorção capilar e a difusão, e, em seguida, com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), produto alcalino formado nas reações de hidratação do cimento. Resultando, então, na precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) (P. KUMAR e MONTEIRO, 2013).

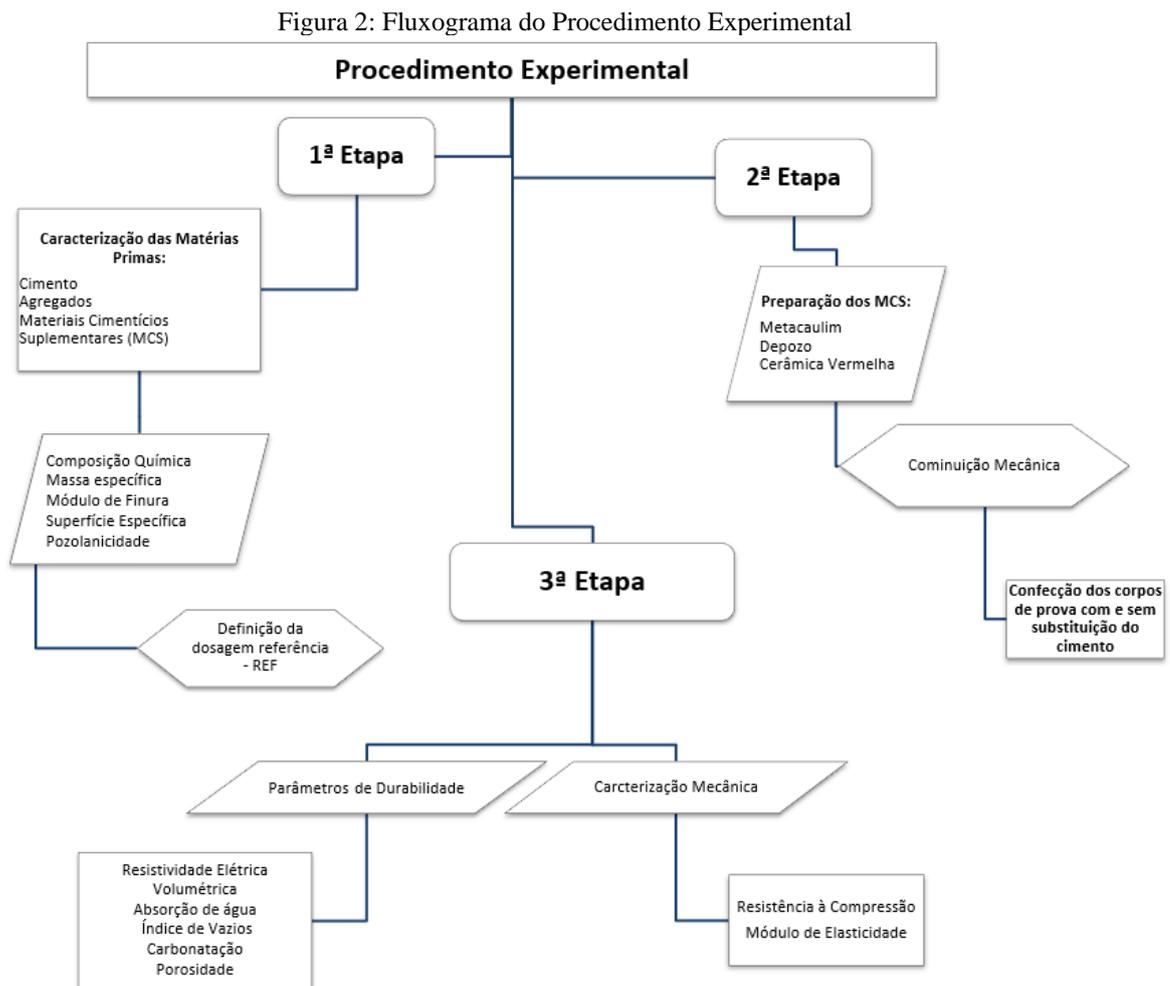
A dissolução dos compostos cimentícios ocasiona a redução da alcalinidade na solução dos poros, reduzindo os valores do potencial hidrogeniônico (pH) do meio. Ao perder a proteção química do meio, que é formada por uma camada de óxido aderido à barra de aço, torna-o suscetível à despassivação das armaduras, conseqüentemente inicia-se um processo de corrosão danificando os elementos estruturais (SCHACKOW *et al.*, 2015).

Zhao *et al.*, (2020) analisaram a formação da camada passivadora em concreto com cimento Portland comum e concreto com Escória ativada por álcali, no intuito de buscar um concreto com melhor desempenho de durabilidade frente à carbonatação. Os espécimes foram expostos as concentrações de CO_2 de 0,03%, 3% e 20% em volume. Baseado na análise do elemento Fe no filme passivo realizado aos 28 dias, pode-se afirmar que a formação do filme passivador no concreto com escoria ocorreu mais rápido que no concreto comum. Porém, aos 140 dias, o concreto referência mostrou melhor desempenho a não penetração da carbonatação em comparação ao concreto com escória ativada por álcali. A maior concentração de CO_2 colabora para o aceleração da carbonatação em todos os espécimes.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da influência de diferentes teores de adições pozolânicas em parâmetros de durabilidade do concreto é um trabalho experimental que ocorreu em quatro etapas. Inicialmente foi definido e caracterizado as matérias primas utilizadas, e elaborada a dosagem do concreto referência. Na segunda etapa, os materiais cimentícios suplementares foram preparados e os corpos de provas confeccionados. A terceira etapa consistiu na realização dos ensaios, os quais se dividem em ensaios de caracterização mecânica e ensaios de parâmetros de durabilidade. Por fim, na quarta etapa, ocorreu a apreciação dos dados obtidos e elaboração deste trabalho final, conforme a Figura 2 que mostra o fluxograma das atividades.

As atividades foram desenvolvidas no Laboratório de Caracterização de Materiais da Construção Civil e Mecânica, da Escola de Engenharia da UFMG, no Centro Tecnológico de Minas Gerais, Unidade Olhos D'água da Supermix em Belo Horizonte/MG.



4.1 Materiais

As matérias primas utilizadas na confecção dos concretos estudados são usuais na indústria da construção civil em Belo Horizonte/MG. Empregou-se agregado miúdo natural e artificial, agregado graúdo de gnaiss, água potável, aditivos plastificantes e poli funcional e materiais cimentícios suplementares.

O cimento empregado na produção das dosagens foi o cimento Portland de Alta resistência Inicial CPV ARI Max fabricado pela Nacional Brennand. Esse cimento é característico por conter o menor percentual de adições minerais entre os disponíveis no mercado. A caracterização do cimento é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização do cimento CPV – ARI

ENSAIOS FÍSICOS CP V-ARI		Valores	Limite da NBR 5733/91
FINURA	BLAINE (cm ² /g)	458	≥300
	# 200 %	0,2	≥6,0
	# 300 %	2,40	-
Tempo de pega (min)	Início de pega	130	≥60
	Fim de Pega	205	≥600
Resistência à compressão (NBR 7215:2014)	1 dia (MPa)	22,2	≥14
	3 dias (MPa)	35,5	≥24
	7 dias (MPa)	42,4	≥34
	28 dias (MPa)	53,9	-

Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais (Supermix)

Os agregados miúdos utilizados foram a areia natural silicosa, com diâmetro máximo de 4,8 mm, e areia artificial de gnaiss, com diâmetro máximo de 6,3 mm, na proporção de 70% para 30%, respectivamente. A caracterização dos agregados miúdos é apresentada na tabela 2 e 3 e as curvas granulométricas nos gráficos 1 e 2. Os agregados graúdos empregados foram a brita gnaiss tipo brita 0, com diâmetro máximo de 12,5 mm, e brita 1, com diâmetro máximo de 25 mm, na proporção de 15% para 85%, respectivamente. A caracterização dos agregados miúdos é apresentada nas tabelas 4 e 5 e as curvas granulométricas nos gráficos 3 e 4. Essas proporções foram determinadas em função da prática usual nas concreteiras.

Tabela 2: Caracterização da Areia Natural

Massa Unitária NBR NM 52 (kg/dm ³)	1,418
Massa Específica NBR NM 52 (kg/dm ³)	2,646
Materiais Pulverulentos NBR NM 46	1,1%
Teor de Argila NBR NM 7218	0,04%
Módulo de Finura NBR 7211	2,709
Impurezas Orgânicas NBR 7211	< 300 ppm
Diâmetro Máximo NBR 7211 (mm)	4,8
Coefficiente de Vazios	46,39%

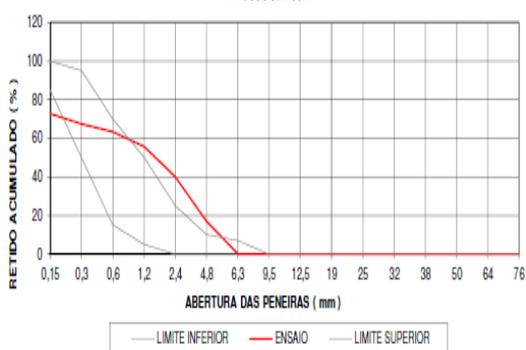
Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais
(Supermix)

Tabela 3: Caracterização da Areia Artificial

Massa Unitária NBR NM 52 (kg/dm ³)	1,719
Massa Específica NBR NM 52 (kg/dm ³)	2,703
Materiais Pulverulentos NBR NM 52 # 200	11,34%
Teor de Argila NBR NM 7218	-
Módulo de Finura NBR 7211	3,160
Diâmetro Máximo NBR 7211 (mm)	6,3
Coefficiente de Vazios	36,40%

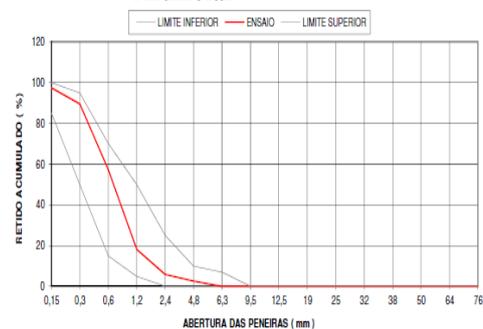
Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais
(Supermix)

Gráfico 1: Curva granulométrica da Areia Natural



Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais (Supermix)

Gráfico 2: Curva granulométrica da Areia Artificial



Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais
(Supermix)

Tabela 4:Caracterização da Brita 0

Massa Unitária NBR NM 53 (kg/dm ³)	1,392
Massa Específica NBR NM 53 (kg/dm ³)	2,778
Materiais Pulverulentos	0,40%
Módulo de Finura NBR 7211	6,1
Diâmetro Máximo NBR 7211 (mm)	12,5
Coefficiente de Vazios	49,89%

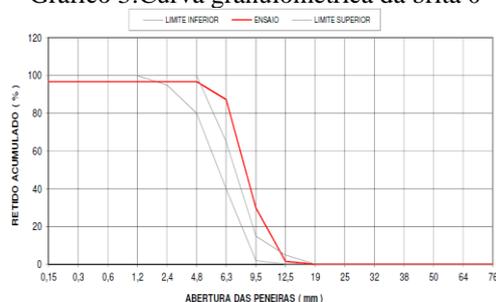
Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais (Supermix)

Tabela 5:Caracterização da Brita 1

Massa Unitária NBR NM 53 (kg/dm ³)	1,378
Massa Específica NBR NM 53 (kg/dm ³)	2,702
Materiais Pulverulentos	0,20%
Módulo de Finura NBR 7211	7,05
Diâmetro Máximo NBR 7211 (mm)	25
Coefficiente de Vazios	49,00%

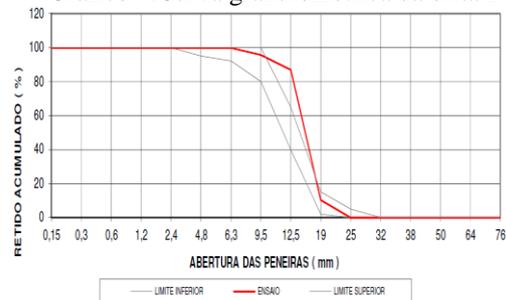
Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais (Supermix)

Gráfico 3:Curva granulométrica da brita 0



Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais (Supermix)

Gráfico 4:Curva granulométrica da brita 1



Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais (Supermix)

A água utilizada foi a fornecida pela concessionária de abastecimento local. Os aditivos utilizados foram o PolykenTM 790 da Novaken, aditivo polifuncional redutor de água, e o RecoverTM da Grace Constrution destinado a controlar o processo de hidratação do cimento. Ambos os aditivos são usuais em concretos usinados. O uso de um concreto usinado possibilita observar os resultados da pesquisa em um concreto amplamente utilizado no mercado. Os materiais cimentícios suplementares estudados foram o resíduo de cerâmica vermelha, o de poço e o Metacaulim.

O resíduo de cerâmica vermelha foi proveniente de telhas cerâmicas. Foi preparado pelo processo de cominuição mecânica a fim de obter uma granulometria inferior a granulometria do cimento utilizado. A britagem primária das telhas de cerâmica vermelha, realizada apenas para desbaste, ocorreu em um britador de mandíbula em 3 etapas de processamento contínuo. Após essa redução, efetuou-se a fragmentação secundária (moagem fina) em um moinho de bolas. Nessa etapa de cominuição, a cada trinta minutos se retirava uma amostra do material para avaliação da finura obtida. Essa

avaliação foi feita por meio do peneiramento a úmido até se obter a granulometria desejada, material 95% passante na peneira 325.

O Depozo, composto por escória de alto forno, resíduo de cerâmica vermelha e resíduo de porcelanato, é fornecido em uma granulometria irregular e requer um processo de cominuição. O depozo passou pelo processo de cominuição por meio do moinho de bolas. A cada trinta minutos se retirava uma amostra do material para avaliação da finura obtida. Essa avaliação foi feita por meio do peneiramento a úmido até se obter a granulometria desejada, material passante 95% na peneira 325. O Metacaulim, da marca Metacaulim HP Ultra, foi fornecido na granulometria necessária pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio LTDA. A Figura 3 mostra os materiais cimentícios suplementares (MCS).

Figura 3: Materiais Cimentícios Suplementares: (A) Depozo (B) Cerâmica Vermelha (C) Metacaulim



4.1.1 Dosagens

A dosagem aplicada na pesquisa é uma dosagem usual das concreteira para aplicação em obras de arte como por exemplo pontes, viadutos, sistemas de drenagem e transposição de águas, com resistência característica de 45 MPa aos 28 dias. A partir da dosagem de referência, no traço 1: 2,04: 2,8 com relação a/c de 0,55 e consumo de 350kg/m^3 , foram feitas as substituições, totalizando 10 concretos distintos. Nas quais substitui-se parte do cimento por material cimentício suplementar, nas proporções 5%,

10% e 20%. Considera-se MET para Metacaulim, DEP para depozo e CV para Cerâmica Vermelha, conforme tabela 6.

Tabela 6 – Relação da dosagem base e substituições

Descrição	Metacaulim	Depozo	Cerâmica Vermelha	Cimento	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	a/c
Referência	0	0	0	1,00	2,04	2,08	0,55
Substituição de 5% do cimento por MET	5	0	0	0,95	2,04	2,08	0,55
Substituição de 10% do cimento MET	10	0	0	0,90	2,04	2,08	0,55
Substituição de 20% do cimento MET	20	0	0	0,80	2,04	2,08	0,55
Substituição de 5% do cimento por DEP	0	5	0	0,95	2,04	2,08	0,55
Substituição de 10% do cimento DEP	0	10	0	0,90	2,04	2,08	0,55
Substituição de 20% do cimento DEP	0	20	0	0,80	2,04	2,08	0,55
Substituição de 5% do cimento por CV	0	0	5	0,95	2,04	2,08	0,55
Substituição de 10% do cimento CV	0	0	10	0,90	2,04	2,08	0,55
Substituição de 20% do cimento CV	0	0	20	0,80	2,04	2,08	0,55

A moldagem dos corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 100mm de diâmetro por 200mm de altura, ocorreu seguindo a NBR 5738 (ABNT, 2015). Foram concretadas 33 unidades de corpos de prova por dosagem, totalizando 330 amostras. Os corpos de prova foram identificados, Figura 4, desenformados após 24 horas, retificados e submetidos a cura úmida.

Figura 4: Corpos de Prova Cilíndricos



4.2 Métodos

Inicialmente as matérias primas foram caracterizadas química e fisicamente, para em seguida se confeccionar as dosagens determinadas. Tanto o concreto de referência como os outros nove concretos com substituição parcial do cimento por material cimentício suplementar foram caracterizados mecanicamente por meio dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade e analisadas quanto aos parâmetros de durabilidade por meio da resistividade elétrica volumétrica, absorção de água, índice de vazios e carbonatação.

4.2.1 Caracterização das matérias primas

Os materiais cimentícios suplementares foram preparados e encaminhados para análises químicas e físicas.

4.2.1.1 Caracterização dos materiais cimentícios suplementares

O Metacaulim, o Depozo e o resíduo de Cerâmica Vermelha após moagem foram caracterizados quanto à composição química, granulometria, massa específica, superfície específica e pozolanicidade. Os materiais, quando necessário, foram maceradas em almofariz e pistilo de porcelana para ficarem 100% passante na peneira nº 400, abertura 38 μm , e separadas em várias porções de 10g cada. Cada análise foi realizada nos mesmos equipamentos e seguindo as mesmas metodologias e processos para cada material.

A composição química foi realizada por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X, FRX. O equipamento foi o sequencial PHILIPS (PANALYTICAL) modelo PW 2400. Esse procedimento é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes na amostra em uma proporção qualitativa e, a partir de então, estabelecer a concentração desses elementos presentes na amostra. A identificação dos elementos é em função da excitação dos átomos na absorção dos raios emitidos, o qual um comprimento de onda previamente conhecido na base de dados. O cálculo de perda ao fogo ocorre por meio da calcinação a 1000°C.

A difração de raios-X, DRX, permite analisar qualitativamente a estrutura do arranjo atômico e determinar as fases cristalinas presentes em cada amostra. O difratômetro utilizado foi da marca PANalytical e modelo Empeyream com $\text{CuK}\alpha$, varredura no intervalo de 3 – 90° 2 θ e passo de 0,06° por segundo. O banco de dados utilizado para identificar as fases cristalinas foi as fichas cristográficas (CIF) disponibilizadas por *Crystallography Open Database* (COD) e *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD).

A massa específica dos materiais cimentícios suplementares foi avaliado no Picnometro da ACP modelo *Autodensity* com nitrogênio gasoso (N_2). O processo empregado é o princípio de Arquimedes de deslocamento de fluido (gás) e da técnica de expansão de gás. A amostra empregada estava 100% passante na peneira com abertura de 38 μm .

A granulometria foi determinado por meio de peneiramento. Trata-se da soma das porcentagens retidas acumuladas em massa nas peneiras de série normal, dividida por 100. A superfície específica dos materiais cimentícios suplementares foi determinada por adsorção gasosa do gás nitrogênio pelo método desenvolvido por Brunauer, Emmett e

Teller (BET multiponto) no aparelho Quantachrome, modelo NOVA Station A. Em cada amostra, foram obtidos, no mínimo, sete pontos para a análise da isoterma de adsorção.

A pozolanicidade dos materiais cimentícios suplementares foi determinada pelas análises térmicas e pelo ensaio Chapelle modificado. O ensaio de Chapelle Modificado seguiu a metodologia proposta na NBR 15.895:2010 e foi levado em conta as considerações de Raverdy *et al.* (1980). O ensaio consiste em dissolver 1g do material a ser analisado em 2g do CaO e 250 ml de água deionizada. Essa amostra é mantida em agitação no equipamento Banho Dubnoff NT 232 na temperatura de 90°C por 16 horas, logo em seguida é resfriada e passará por um processo de titulação química.

As análises térmicas foram a termogravimetria (TGA) e a análise térmica diferencial (DTA), essas ocorreram no equipamento DTG-60H Shimadzu a uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Para confecção das amostras da análise térmica foram produzidas pastas de cimento referência, ou seja, sem adições ou substituições, e as pastas com substituição de 5%, 10% e 20% para cada material cimentício empregado. O fator água cimento adotado foi de 0,5. As pastas foram moldadas em forma de cubos de 3cmx3cmx3cm, desmoldadas após 24 horas e colocadas em cura submersa em água potável por 28 dias. Após o período de cura, cada pasta foi fragmentada e cominuída em almofariz e pistilo de porcelana até ficar 100% passante na peneira nº 200, abertura de 75 µm. O material foi lavado com acetona com a finalidade de interromper as reações de hidratação e armazenado em embalagens lacradas para envio à análise.

4.2.2 Elaboração da dosagem

A dosagem do concreto de referência desenvolvida teve como base a comumente utilizada em obras de infraestrutura pelas concreteiras. Essa dosagem foi elaborada pelo método proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), publicado em 1984 em um Estudo Técnico (ET-67), com o título “Parâmetros de Dosagem de Concreto”. Essa publicação consiste em uma adaptação do método sugerido na ACI 211.1-81 para agregados brasileiros conforme NBR 7211:2009.

A elaboração da dosagem referência pelo método ABCP passou pelas seguintes etapas: fixar da relação água/cimento, determinar o consumo de materiais (água, cimento e agregados) e apresentar o traço com relação ao unitário do cimento. A partir dessa

dosagem referência confeccionou-se 9 tipos de concretos substituindo em massa 5%, 10% e 20% do cimento por Metacaulim, Depozo e Cerâmica Vermelha.

4.2.3 Confeção dos concretos

A confeção do concreto de acordo com as dosagens previamente determinadas ocorreu em uma betoneira intermitente de queda livre com eixo inclinado com capacidade volumétrica de 40 litros da marca CSM do laboratório do Centro Tecnológico da Supermix. O procedimento inicial consistiu em limpar a cuba da betoneira para realizar a confeção sem resíduos de concretagens anteriores. Após isso, colocou-se os agregados (miúdos e graúdos), o cimento, a Cerâmica Vermelha ou Metacaulim ou Depozo na betoneira, e a deixou funcionar por 1 minuto de forma a se obter uma mistura homogênea das matérias primas inseridas. A seguir metade da água foi acrescentada e depois os aditivos previamente diluídos em água. O restante da água foi sendo adicionada aos poucos de forma controlada. O funcionamento da betoneira foi intermitente: 10 minutos com uma parada após 5 minutos do início do processo para limpeza das paletas internas. Transcorrido esse tempo, realizou-se o ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (*slump test*), conforme determina a NBR NM 67:1998. O abatimento esperado para a dosagem referência era de 100 ± 120 mm, e o resultado encontrado foi de 110 mm. Destaque-se que a relação água/aglomerante de 0,5 será mantida na execução de cada concreto com sua respectiva substituição, desse modo a única variante será a proporção e substituição do cimento por um MCS, não sendo observado os abatimentos.

Após o fim de cada mistura foi feita moldagem dos corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura conforme NBR 5738:2015 utilizando vibração manual. Esses corpos de prova ficaram em cura por 28 dias em ambiente de laboratório. Ao todo foram confeccionados 10 concretos distintos com um total de 330 corpos de prova.

4.2.4 Propriedades Mecânicas e Avaliação da Durabilidade

Os corpos de prova confeccionados no item 4.2.3 foram submetidos a ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade em idades iniciais para determinar as propriedades mecânicas. Para avaliação da durabilidade realizou-se os ensaios de carbonatação, absorção por imersão e avaliação da resistividade elétrica volumétrica, e em idades avançadas ocorreu os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

4.2.4.1 Ensaio de resistência à compressão

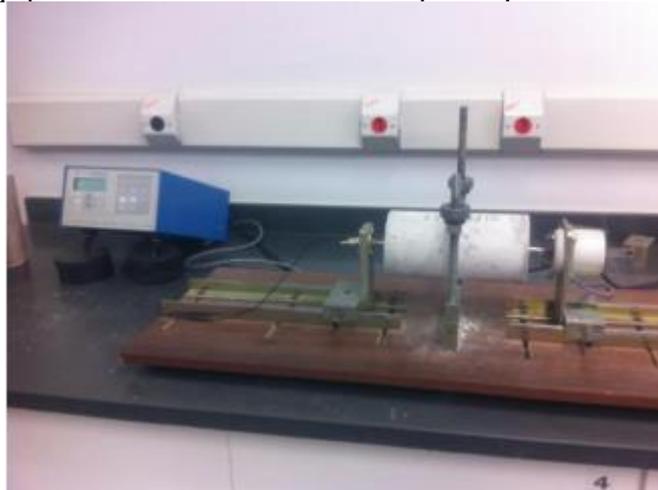
A determinação da resistência à compressão dos corpos de prova seguiu o estabelecido na NBR 5.739:2018. Nesse ensaio, utilizou-se uma prensa hidráulica de acionamento elétrico da marca EMIC modelo PCE100E com capacidade máxima de 100 ton. Foi aplicado nos corpos de prova um carregamento com aumento contínuo de 0,3 a 0,8 MPa/s até a ruptura. Esse ensaio ocorreu após a moldagem nas idades de iniciais 7, 28, 56 e 90 dias, e em idades avançadas 120, 150, 365 e 730 dias.

4.2.4.2 Módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade foi por meio do método da frequência ressonante no modo longitudinal executados baseados nas normas ASTM C 215, 2008 e BS 1881: Part 209:1990. Esse ensaio consiste em vibrar a amostra através de uma unidade motriz eletromecânica até atingir a sua amplitude máxima, quando a frequência de vibração se aproxima da frequência natural da amostra, sendo esse o valor da frequência ressonante.

Para a determinação da frequência natural de vibração das amostras de concreto, foi utilizado o aparelho Erudite MKII Resonancy Frequency Test System, da C.N.S. Electronics, Figura 5. A aferição da frequência ressonante ocorreu após a moldagem em idades de iniciais 7, 28, 56 e 90 dias, e em idades avançadas 120, 150, 180, 365 e 730 dias.

Figura 5: Equipamento de Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante



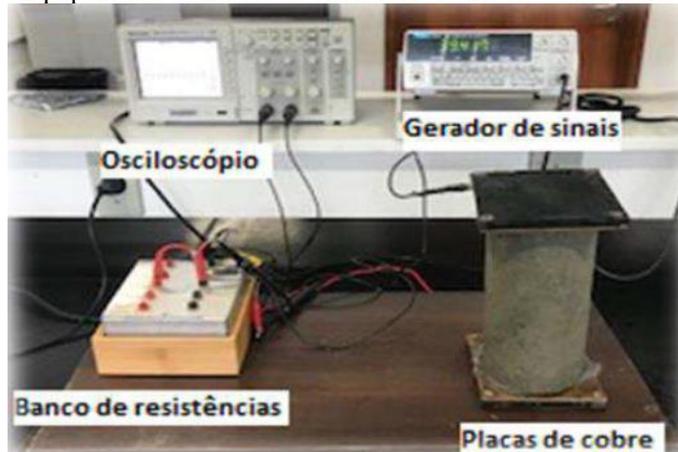
Fonte: O autor

4.2.4.3 Avaliação da resistividade elétrica volumétrica

Para avaliação da resistência ao ataque de cloretos realizou-se o ensaio resistividade elétrica volumétrica. Esse ensaio não destrutivo permite avaliar indiretamente a porosidade e a sua microestrutura do concreto.

No ensaio de resistividade elétrica volumétrica do concreto mensura-se a resistência à passagem de corrente elétrica. O aparelho é constituído por um gerador de sinais que aplica uma corrente alternada em um circuito instalado em série, esse circuito é constituído por um banco de resistência *shunt* e pelo corpo de prova. O contato no corpo de prova é feito por meio de dois eletrodos de cobre posicionados nas extremidades do corpo de prova. Para otimizar o fluxo da corrente elétrica, utiliza-se uma esponja de aço saturada em água potável nas interfaces da superfície de contato da placa de cobre com o corpo de prova. Como não existe uma variação na corrente elétrica, circuito montado série, o valor da diferença de potencial será aferido por um osciloscópio instalado ao longo do circuito. O equipamento de verificação da resistividade elétrica foi desenvolvido pelos alunos do Laboratório Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânicos da UFMG.

Figura 6: Equipamento de Ensaio da Resistividade Elétrica Volumétrica



Fonte: O autor

A avaliação da durabilidade por meio da resistividade elétrica volumétrica ocorrerá nos corpos de prova cilíndricos confeccionados no item 4.2.3 nas idades de 7, 14, 21, 28, 56, 90, 120, 150, 180, 365 e 730 dias após a moldagem.

4.2.4.4 Carbonatação

Para avaliar a taxa referente ao aumento da carbonatação nos corpos de prova utilizou-se o método da carbonatação acelerada. Esse método consiste em colocar os corpos de prova num ambiente fechado e enriquecido por uma concentração percentual fixa de CO₂ a uma temperatura e umidade predefinida. A câmara de carbonatação acelerada utilizada foi da marca Thermo Fisher Scientific e modelo RCO 3000 T-5-VBC.

Os corpos de prova, do concreto referência e das demais 9 dosagens, após a cura submersa de 28 dias em água potável foram embalados e armazenados em local fechado. Aos 56 dias após a produção, os corpos de prova foram submetidos à carbonatação acelerada em uma câmara, ficando expostos a condições estáveis e controladas de temperatura a (26 ± 2) °C e concentração de dióxido de carbono a $(5,0 \pm 0,5)$ %, por um período de 90 dias. A avaliação da profundidade ocorreu por método colorimétrico e medição da espessura carbonatada com paquímetro. A solução empregada foi de 1 g de fenolftaleína dissolvida em 70 ml de álcool etílico e 30 ml de água. Após aspergir a solução nas amostras de concreto rompidas longitudinalmente, foram colhidas informações de 5 pontos distintos na superfície do corpo de prova e realizado o cálculo da média de variação.

Figura 7: Câmara de Carbonatação



4.2.4.5 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão permite avaliar o qual permeável um corpo é. O processo consiste em coletar os dados de massa seca e massa submersa e assim determinar o quanto de água foi absorvida. A execução do ensaio de absorção de água por imersão seguiu o estabelecido na NBR 9778:2005. Para isso utilizou-se uma balança hidrostática com precisão de 0,01 grama da marca OHAUS Explorer e uma estufa da marca Linn Elektro Therm. O corpo de prova é colocado em uma estufa a 100°C por 24 h e assim verifica-se a massa seca. Em seguida ele é inserido em um recipiente com água potável e o peso foi verificado em 12h, 24h, 48h e 72h, o valor da 72h será a massa submersa.

A absorção do concreto foi obtida através da relação entre a massa da água nela contida e a massa do corpo seco, dado pela Equação 02:

$$A(\%) = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} * 100 \quad \text{Equação 02}$$

Em que:

m_{sat} = massa saturada do corpo de prova (g)

m_s = massa seca do corpo de prova (g)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos itens seguintes são apresentados os resultados dos ensaios e as análises realizadas, em três partes: a primeira descreve a caracterização química e física dos materiais cimentícios suplementares, na segunda parte descreve a caracterização mecânica das dosagens elaboradas, e por fim, na terceira parte se a faz análise dos parâmetros de durabilidade.

5.1 Caracterização dos Materiais Cimentícios Suplementares

5.1.1 Composição química

A Tabela 7 apresenta a composição química do Metacaulim, Depozo e Cerâmica Vermelha obtida por espectroscopia de fluorescência de raios-X. Observa-se que depozo e a cerâmica vermelha apresentam teores majoritários de sílica, em torno de 40% em peso, e o Metacaulim possui teor significativo de alumina, acima de 50% em peso. Considerando a presença de alta concentração de alumino-silicatos, segundo (XIE; VISINTIN, 2018), essas matérias colaboram para a formação de gel C-S-H nos compostos cimentícios, elemento diretamente responsável pela melhora na características mecânicas como, por exemplo, a resistência à compressão.

Tabela 7: Composição química

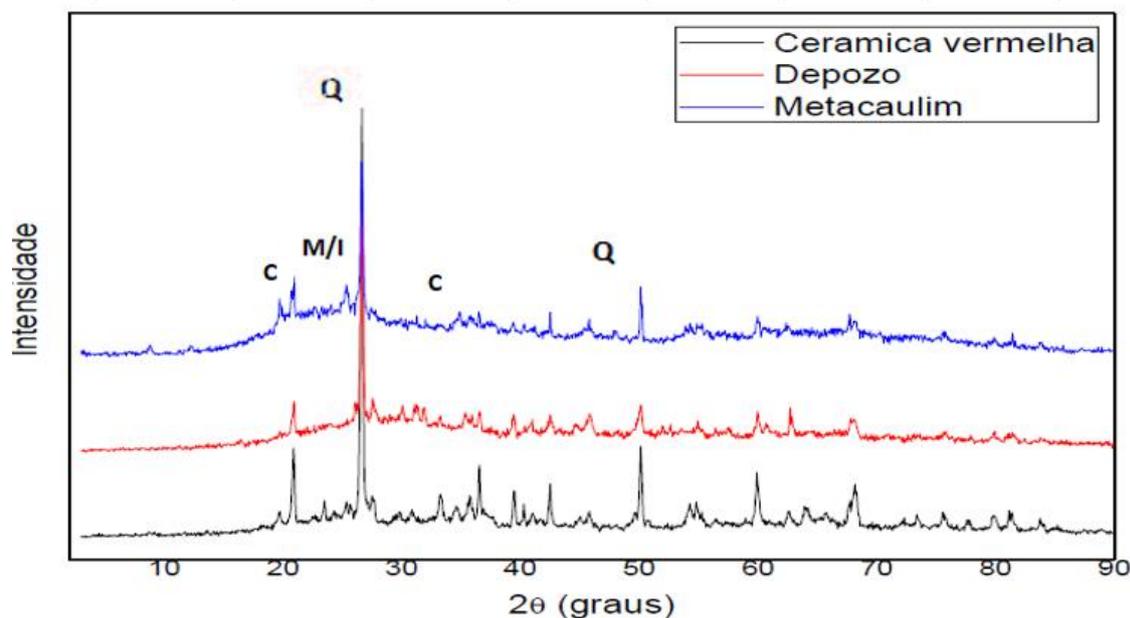
(% em Peso)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	SO ₃	Outros
Metacaulim	37,87	55,16	0,05	0,85	2,64	2,01	0,84	0,19	0,04	0,54
Depozo	44,08	28,58	12,94	0,94	3,56	0,59	5,37	2,53	0,15	1,26
Cerâmica Vermelha	46,13	31,11	0,31	3,51	8,28	3,43	5,63	0,48	0,08	0,32

De acordo a ASTM C618, os resultados apresentados na Tabela 7, composição química, mostram que os materiais cimentícios suplementares empregados nessa pesquisa são aceitos como materiais pozolânicos (ASTM;2015). O requisito imposto é que o

somatório da porcentagem de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ seja superior a 70%. O Metacaulim apresentou 95,67%, o Depozo 76,22% e a Cerâmica Vermelha 85,52%. Contudo, essa análise poder ser a menos eficiente para avaliar a pozolanicidade de um material, induzindo a um falso positivo. Esse abordagem foi apresentada no trabalho de KALINA *et al.*, (2019), e pode ser aplicada aos resultados da Cerâmica Vermelha, que embora tenha apresentando o maior percentual dos compostos citados, apresentou o menor teor de fixação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no ensaio do Chapelle Modificado, Tabela 10. A norma brasileira corresponde é a NBR 12653, (ABNT, 2014b) e estabelece o mesmo requisito químico de teor mínimo de 70% de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$. Além disso, é exigido como um dos requisitos físicos que o material retido na peneira 45 μm seja inferior a 20%, no caso desse trabalho todos os materiais são 95% passante na peneira 45 μm .

A Figura 8 mostra os espectros de DRX dos materiais estudados. Observa-se halos difusos característicos de estruturas amorfas pela nas amostras.

Figura 8: Espectros de DRX do Metacaulim, Depozo e Cerâmica Vermelha



A amplitude proeminente do halo amorfo no Metacaulim é observada no resultado apresentado, característica comumente citada em diversos trabalhos, (HOOTON *et al.*, 2018; HOLLANDERS *et al.*, 2016b) que serve de indicativo de caráter pozolânico. As propriedades pozolânicas de algumas argilas são atribuídas à presença de amorfos, como a caulinita, que se originam no decurso da queima das argilas (NAVRÁTILOVÁ; ROVNANÍKOVÁ, 2016). Essa fase amorfa pode ser identificada faixa de 18 – 30° 2θ,

observação semelhante foi realizada por (HOLLANDERS *et al.*, 2016b). Os resultados mostram que os materiais estudados apresentam compostos similares, sendo o predominante entre eles o Quartzo (Q), principalmente no Metacaulim e no Depozo, e a Caulinita (C), principalmente na Cerâmica Vermelha.

5.1.2 Superfície específica e massa específica

A Tabela 8 mostra valores de superfície específica BET. O Metacaulim apresenta o maior valor de superfície específica, 20 m²/g. O menor valor foi apresentado pelo Depozo, 3 m²/g. Por meio da superfície específica BET é possível avaliar tanto a superfície externa quanto à área interna dos poros das partículas. Valores maiores de superfície específica podem vir a influenciar na taxa de reação pozolânicas dos materiais, esse fenômeno está relacionado com a maior exposição da pozolana com o hidróxido de cálcio (Huang *et al.*, 2018;Hollanders *et al.*, 2016; Snellings *et al.*, 2016).

Tabela 8: Superfície específica

Material	Metacaulim	Depozo	Cerâmica Vermelha
Superfície Específica (m²/g)	20	3	8

A massa específica foi aferida no Autodensity, com nitrogênio gasoso, no qual determina o volume da amostra por meio da diferença de pressão entre as câmaras. Os três materiais empregados apresentaram valores semelhantes, conforme Tabela 9.

Tabela 9: Massa específica

Material	Metacaulim	Depozo	Cerâmica Vermelha
Massa Específica (g/cm³)	2,66	2,62	2,78

5.1.3 Granulometria

Em relação ao módulo de finura, o Metacaulim foi fornecido passante 95% na peneira 325. O demais materiais foram cominuídos até alcançarem essa finura, que foi aferida por meio do peneiramento úmido. Os materiais cimentícios suplementares

utilizados na pesquisa apresentam finura inferior a 44 μm . Esse módulo de finura foi adotado por SCHACKOW *et al.* (2015) para o resíduo de Cerâmica Vermelha, e, ainda, é o mesmo aplicado ao Depozo na fábrica de cimentos para confecção do cimento pozolânico, CP IV.

5.1.4 Pozolanicidade

A pozolanicidade dos materiais cimentícios suplementares foi avaliada por meio do ensaio de Chapelle Modificado, análise termogravimétrica.

5.1.4.1 Chapelle Modificado

O índice de pozolanicidade de Chapelle Modificado (teor de Ca(OH)_2 fixado) do Metacaulim, Cerâmica vermelha e Depozo são apresentados na Tabela 10. Os teores de Ca(OH)_2 fixados foram calculados de acordo com as equações da ABNT (2010) e a norma francesa NF P18-513 (2010).

Tabela 10: Índices de pozolanicidade IABNT e INF e a razão entre esses valores (IABNT/INF)

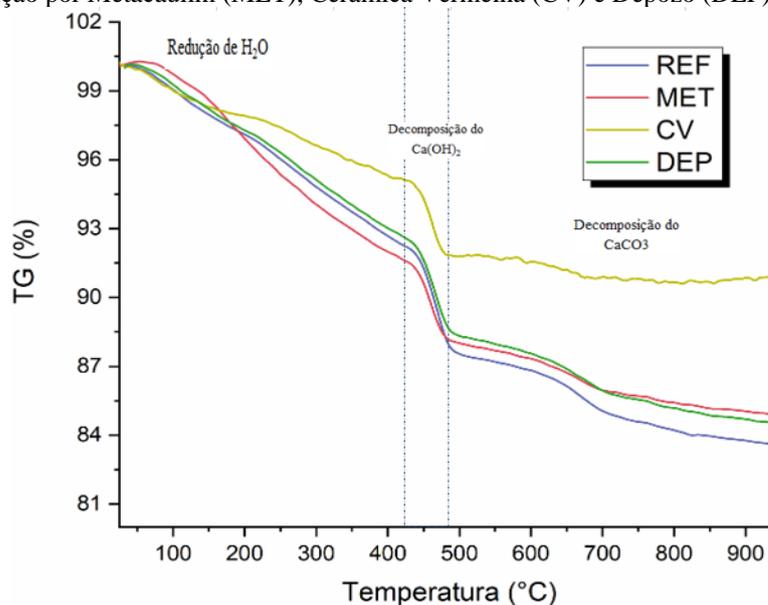
Material	Teor de Ca(OH)_2 fixado (mg/g)		
	I _{ABNT}	I _{NF}	I _{NF} / I _{ABNT}
Metacaulim	813	942	1,16
Cerâmica Vermelha	402	440	1,09
Depozo	443	480	1,08

A literatura aborda que o material é classificado como pozolânico quando apresenta o teor mínimo de CaO fixado de 330mg/g (RAVERDY *et al.*, 1980; Hollanders *et al.*, 2016b). O equivalente em Ca(OH)_2 fixado é o teor mínimo de 435,6 mg/g (CARNEIRO *et al.*, 2018; FITOS *et al.*, 2015). Desse modo, o Metacaulim e o Depozo podem ser considerados pozolanas, enquanto a Cerâmica Vermelha não se mostrou pozolânica. O valor encontrado para o resíduo de Cerâmica Vermelha corrobora com o resultado apresentado por BREKAILO *et al.*(2019). O Metacaulim é o material com maior reatividade. Esse dado pode ser atribuído ao elevado teor de fase amorfa apresentado pela DRX, Figura 8.

5.1.4.2 Termogravimetria

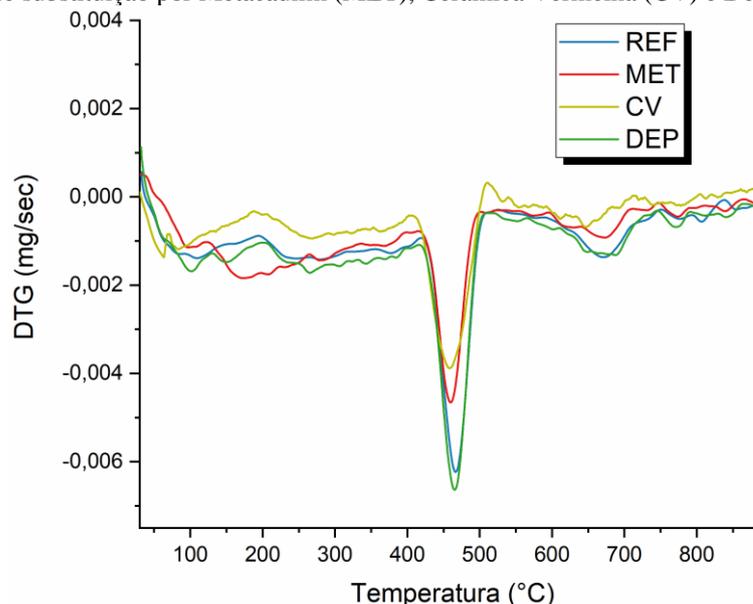
A análise por termogravimetria (TGA) foi realizada na amostra da pasta de cimento da dosagem de referência, e nas demais nove variações de dosagem com a devida substituição do cimento por material cimentício suplementar. As curvas de TGA e a DTG, derivada primeira em relação à temperatura, são apresentadas na Figura 9 e na Figura 10, respectivamente.

Figura 9: Curvas de Termogravimetria (TGA) das pastas de cimento da referência (REF) e com 10% de substituição por Metacaulim (MET), Cerâmica Vermelha (CV) e Depozo (DEP).



As curvas termogravimétricas (TG) mostram três faixas principais de perda de massa. Do início do processo até cerca de 400 °C, o fenômeno ocorre em função da perda de água quimicamente ligada nas estruturas de C-S-H. O pico apresentado por volta dos 400 a 500 °C indica a decomposição de Ca (OH)₂. Por fim, a decomposição do CaCO₃ pode ser observada a partir dos 500 °C. Avaliando qualitativamente as curvas apresentadas, pode-se dizer que os resultados indicam o Metacaulim e o Depozo como material pozolânico, e a Cerâmica Vermelha como material menos reativo entre eles.

Figura 10: Curvas de derivada Primeira da Termogravimetria (DTG) das pastas de cimento da referência (REF) e com 10% de substituição por Metacaulim (MET), Cerâmica Vermelha (CV) e Depozo (DEP).



Conforme a Figura 10, as curvas de derivada primeira da termogravimetria (DTG) apresentam faixas distintas de decomposição de elementos. A faixa inicial, em torno dos 0 a 140 °C, pode ser conferida à decomposição de C-S-H e etringita e a perda de água livre fisicamente adsorvida proveniente das próprias amostras em caso de ineficácia do processo de preparação (ZEYAD *et al.*, 2017). A faixa seguinte, dos 140 aos 250 °C, corresponde à decomposição de aluminatos de cálcio hidratados formando pelas reações pozolânicas. Observa-se uma acentuada formação, principalmente, para a amostra com Metacaulim, o que corrobora para o que indica os resultados encontrados na análise pozolânica realizada por meio do ensaio de Chapelle Modificado, Tabela 10.

5.2 Caracterização mecânica das dosagens

As dosagens confeccionadas foram caracterizadas mecanicamente por meio da resistência à compressão e pelo módulo de elasticidade por frequência ressoante. Com intuito de organizar e facilitar a leitura dos resultados nos gráficos e planilhas apresentados foi adotado a seguinte denominação das amostras: O concreto referência sem adições ou substituições: REF. Concretos com substituição parcial do cimento por metacaulim em 5%, 10% e 20%: MET5, MET10 e MET20, respectivamente, Concretos com substituição parcial do cimento por Depozo em 5%, 10% e 20%: DEP5, DEP10 e

DEP20, respectivamente. E por fim, concretos com substituição parcial do cimento por resíduo de cerâmica vermelha em 5%, 10% e 20%: CV5, CV10 e CV20, respectivamente.

5.2.1 Resistência à compressão

Os concretos foram caracterizados mecanicamente por meio dos ensaios de resistências à compressão nas primeiras idades aos 7, 28 e 56 dias, e em idades avançadas aos 90, 180 e 365 dias, sendo ensaiados 3 corpos de prova por dosagem. Os Gráficos 5, 6 e 7 mostram os resultados do concreto de referência em relação a cada MCS utilizado, Metacaulim (MET), Depozo (DEP) e Cerâmica Vermelha (CV) respectivamente. Ao longo das idades, pode-se observar a evolução dos valores da resistência à compressão dos concretos produzidos. Todas as dosagens apresentaram resistência à compressão superior a 40 MPa aos 7 dias.

Gráfico 5: Resultados médio da resistência à compressão da dosagem referência em função das dosagens com Metacaulim

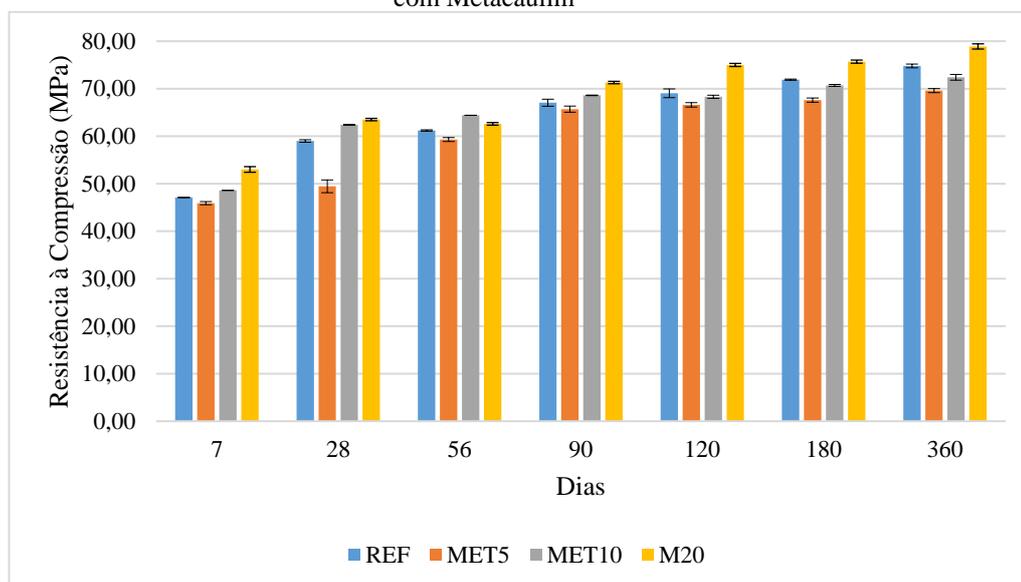


Gráfico 6: Resultados médio da resistência à compressão da dosagem referência em função das dosagens com Depozo

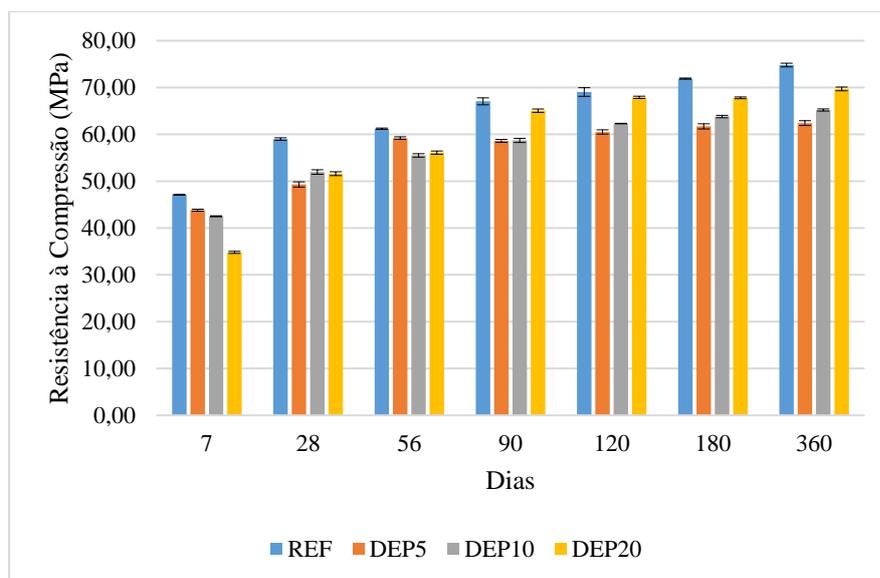
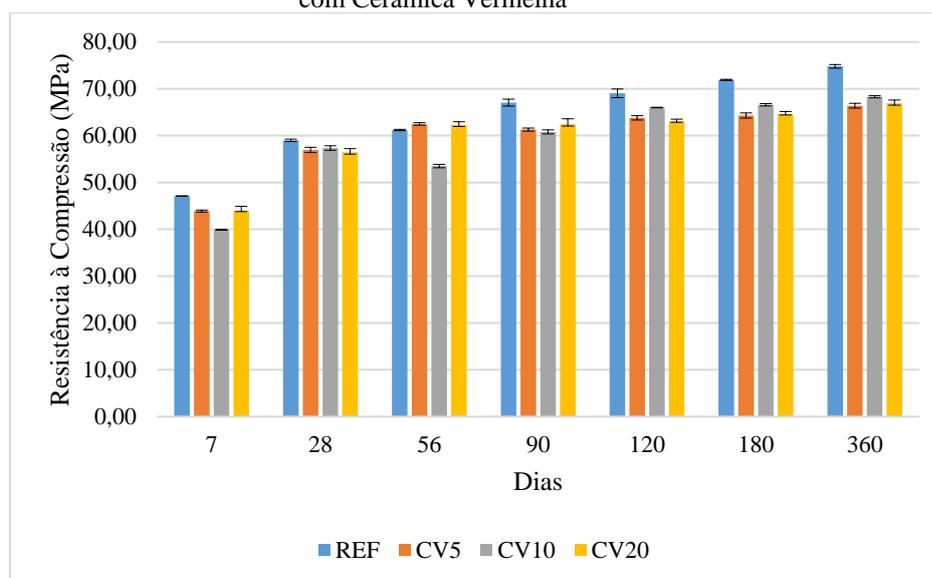


Gráfico 7: Resultados médio da resistência à compressão da dosagem referência em função das dosagens com Cerâmica Vermelha



Aos 7 dias, apenas as dosagens com adição de Metacaulim na proporção de 10% e 20% apresentaram valores de resistência à compressão maiores que o concreto referência. A dosagem com 20% de Metacaulim apresentou valor cerca de 12% maior em relação ao concreto referência. O menor valor de resistência à compressão apresentado aos 7 dias foi da dosagem com adição de 10% de cerâmica vermelha, que ficou cerca de 15% menor em relação ao valor apresentado.

Aos 28 dias, os resultados mostram que a resistência à compressão dos concretos com adição de cerâmica vermelha apresenta valores semelhantes, com variação máxima de 3% em relação à referência. Em relação as dosagens com o emprego do Depozo, os resultados mostram uma redução por volta de 15% quando comparados com a dosagem padrão para todos os percentuais de substituição. Apenas a dosagem com 20% do Metacaulim apresentou valores maiores de resistência à compressão, 8% maior que o concreto referência. A dosagem com 10% de Metacaulim apresentou valor semelhante ao concreto referência.

As dosagens com Cerâmica Vermelha a partir dos 90 dias apresentaram valores de resistência à compressão menores que o concreto referência. A mesma situação ocorreu com a dosagem com Depozo, porém, cabe destacar que a dosagem com 20% de depozo apresentou valores mais próximos ao concreto referência. A dosagem com 10% de Metacaulim apresentou valores próximos ao da referência a partir dos 90 dias, e a com 20% continuou com valores superiores ao concreto referência.

Os resultados mostram que a inserção de Metacaulim é eficaz em percentuais acima de 10%. Esse mesmo comportamento foi observado por GILL e SIDDIQUE (2018).

Os Gráficos 8, 9 e 10 mostram os resultados da dosagem referência em relação aos determinados percentuais de substituição do cimento, 5%, 10% e 20%, por cada MCS utilizado, Metacaulim, Depozo e Cerâmica Vermelha, respectivamente. De um modo geral, assim como o concreto de referências todos os percentuais de substituição apresentaram evolução dos valores de resistência à compressão.

Gráfico 8: Resistência à compressão da dosagem referência em função das dosagens com substituição do cimento por 5% por Metacaulim (MET5), Depozo (DEP5) e Cerâmica Vermelha (CV5).

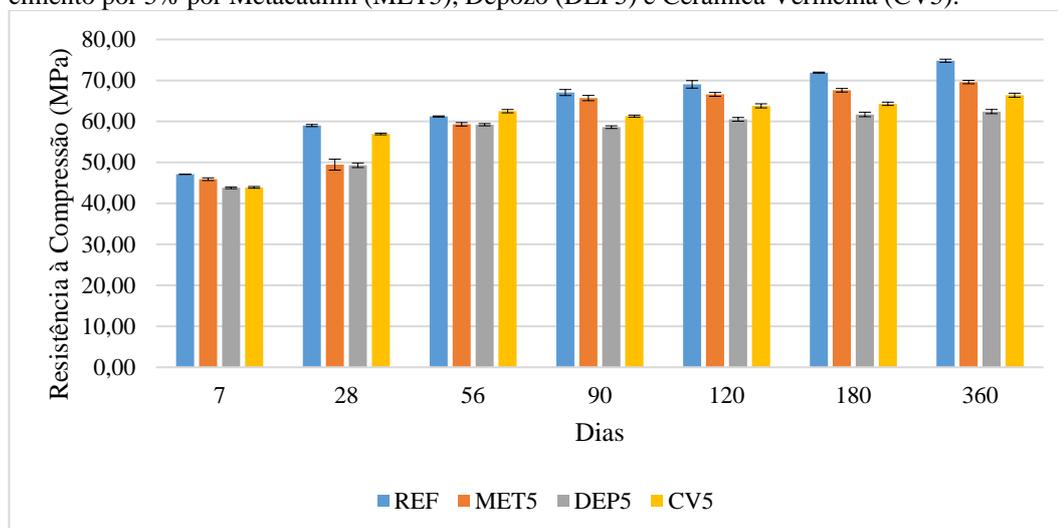


Gráfico 9: Resistência à compressão da dosagem referência em função das dosagens com substituição do cimento por 10% por Metacaulim (MET10), Depozo (DEP10) e Cerâmica Vermelha (CV10).

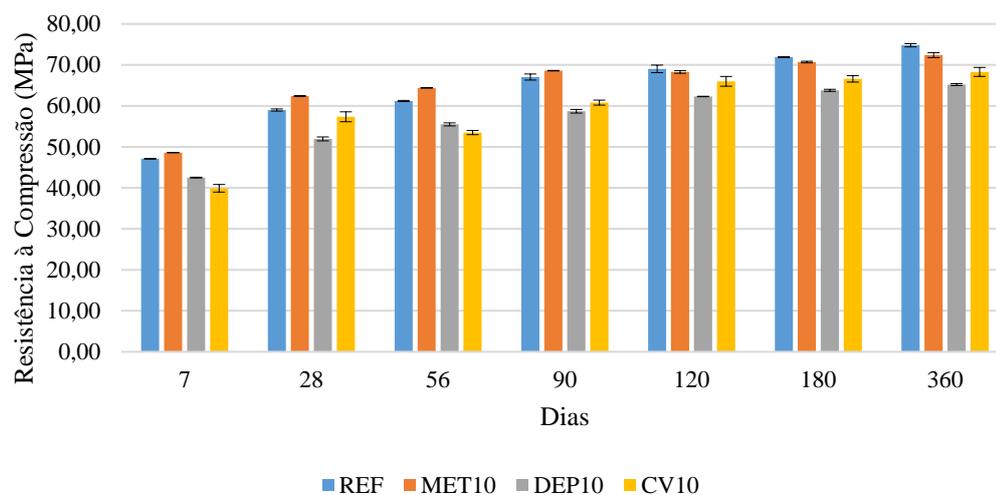
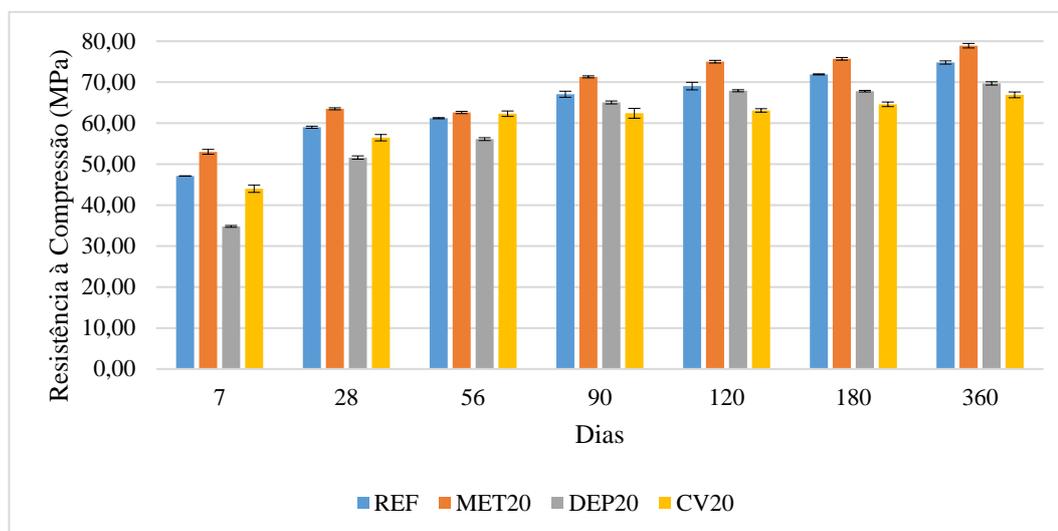


Gráfico 10: Resistência à compressão da dosagem referência em função das dosagens com substituição do cimento por 20% por Metacaulim (MET20), Depozo (DEP20) e Cerâmica Vermelha (CV20)



Nas dosagens com substituição de 5% do cimento por MCS o concreto CV5 se aproximou mais dos valores do concreto referência aos 28 dias. As dosagens MET5 e DEP5 apresentaram uma resistência à compressão 17% menor do que o concreto referência. Em idades mais avançadas, 90, 120, 180 e 360 dias, observa-se que o MET5 se aproximou mais do concreto referência.

Ao substituir 10% do cimento por MCS os resultados mostram que aos 28 dias a dosagem MET10 apresentou valor de resistência à compressão 6% maior que o concreto referência, 62,4MPa e 59MPa, respectivamente. Sendo que, a partir dos 120 dias o concreto referência passou a apresentar valores maiores. A dosagem com menor desempenho frente ao concreto de referência foi a dosagem com DEP10%, 10% de substituição do cimento por Depozo.

As dosagens com substituição de 20% do cimento por MCS, de um modo geral, apresentaram os melhores resultados em relação aos demais percentuais de substituição, exceto o DEP20 aos 7 dias que foi inferior ao DEP10 e ao DEP5. O MET20 apresentou o melhor desempenho em todas as idades em relação ao concreto referência. Os resultados mostram que a CV20 apresenta pouca variação nos valores de resistência à compressão a partir de 56 dias.

5.2.2 Módulo de elasticidade por frequência ressonante

O ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante foi realizado em 6 corpos de prova para cada tipo de concreto confeccionado. Os Gráficos 11, 12 e 13 mostram os resultados da dosagem referência em relação a cada MCS utilizado, Metacaulim (MET), Depozo (DEP) e Cerâmica Vermelha (CV), respectivamente.

Gráfico 11: Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante da dosagem referência em função das dosagens com Metacaulim

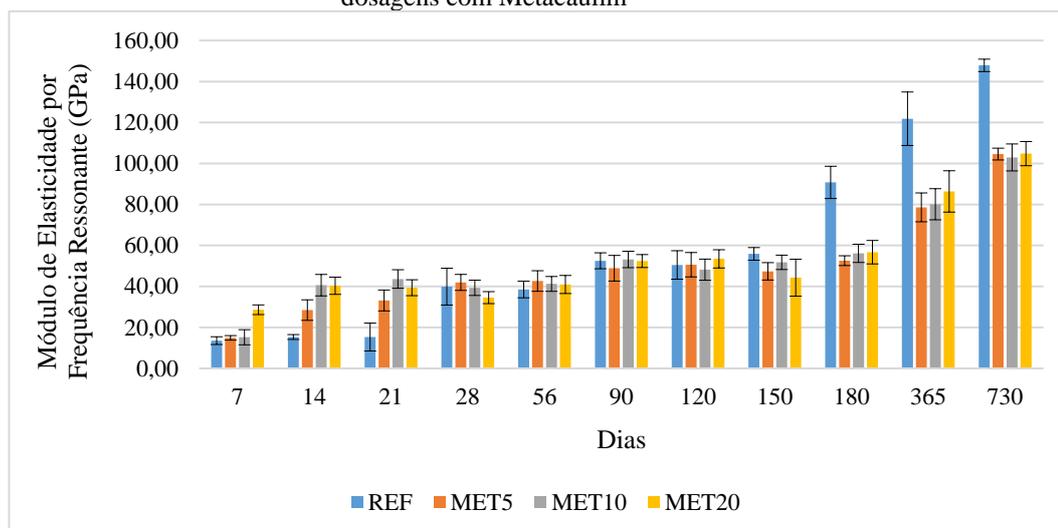


Gráfico 12: Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante da dosagem referência em função das dosagens com Depozo

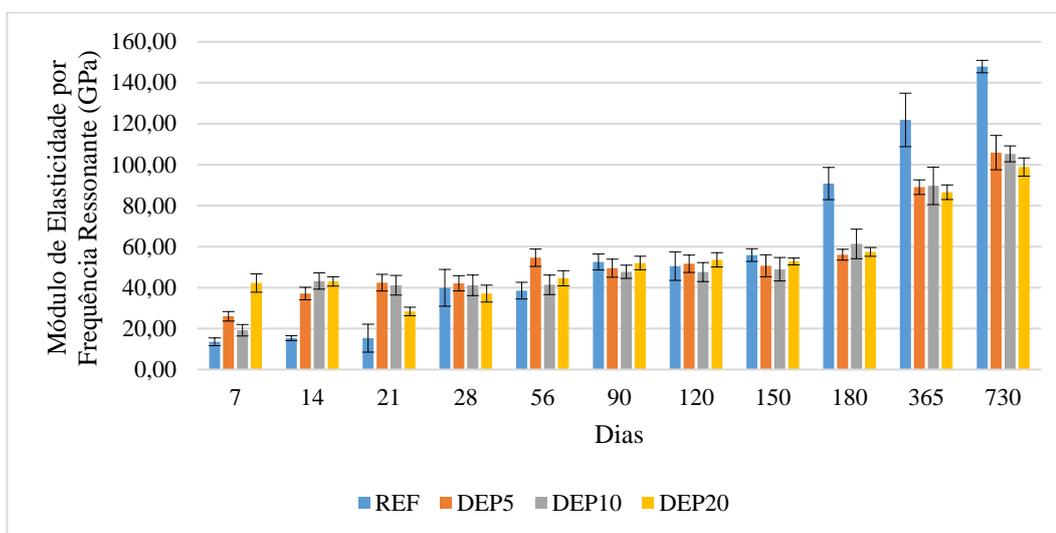
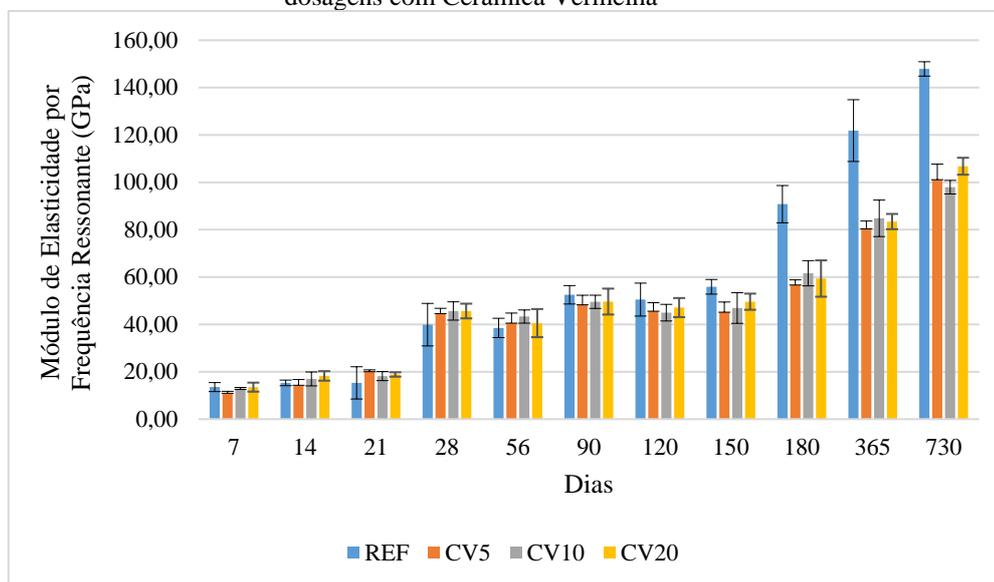


Gráfico 13: Módulo de Elasticidade por Frequência Ressonante da dosagem referência em função das dosagens com Cerâmica Vermelha



Os resultados mostram que, de um modo geral, a substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares colaboraram para o aumento da rigidez dos concretos nas idades iniciais, em relação ao concreto referência. Ao longo das idades, pode-se observar a evolução dos valores do módulo de elasticidade do concreto referência e das demais 9 dosagens elaboradas.

O aumento dos percentuais de substituição de cimento por MCS não impactou de forma relevante nos resultados dos 28 aos 150 dias. Mas, no longo prazo, observa-se valores maiores para o MET20, 20% de Metacaulim, e CV20, 20% de Cerâmica Vermelha. Diferente dos resultados de resistência à compressão que aos 28 dias as dosagens com Metacaulim apresentaram os maiores resultados, nesse caso, a aplicação da Cerâmica Vermelha exibiu maiores resultados em relação ao concreto referência. Nota-se que dos 150 aos 730 dias, os valores do concreto referência apresentaram um crescimento expressivo quando comparadas as demais dosagens.

Os Gráficos 14, 15 e 16 mostram os resultados da dosagem referência em relação aos determinados percentuais de substituição do cimento, 5%, 10% e 20%, respectivamente, por cada MCS utilizado o Metacaulim, o Depozo e a Cerâmica Vermelha

Gráfico 14: Módulo de elasticidade por frequência Ressonante do concreto referência em função das dosagens com substituição do cimento por 5% por Metacaulim (MET5), Depozo (DEP5) e Cerâmica Vermelha (CV5)

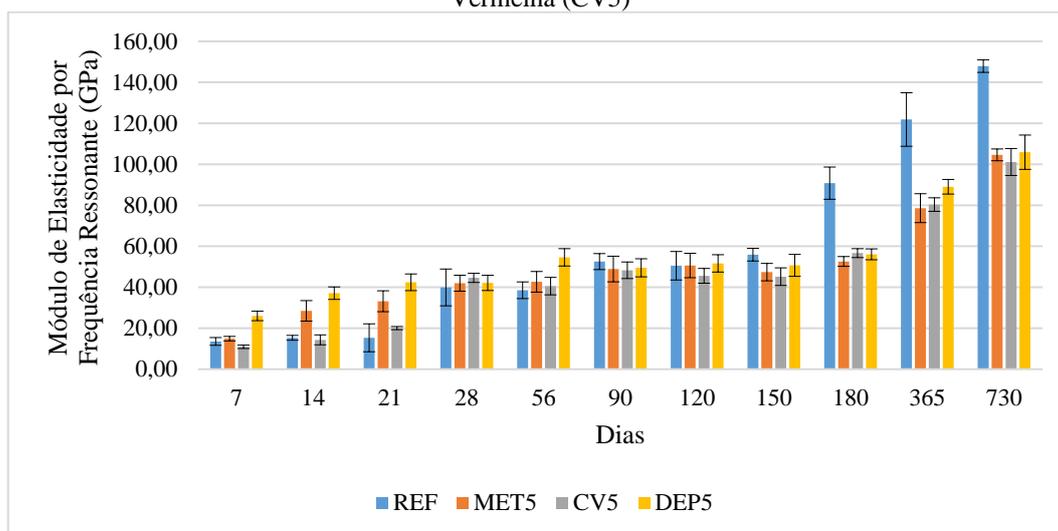


Gráfico 15: Módulo de elasticidade por frequência Ressonante do concreto referência em função das dosagens com substituição do cimento por 10% por Metacaulim (MET10), Depozo (DEP10) e Cerâmica Vermelha (CV10)

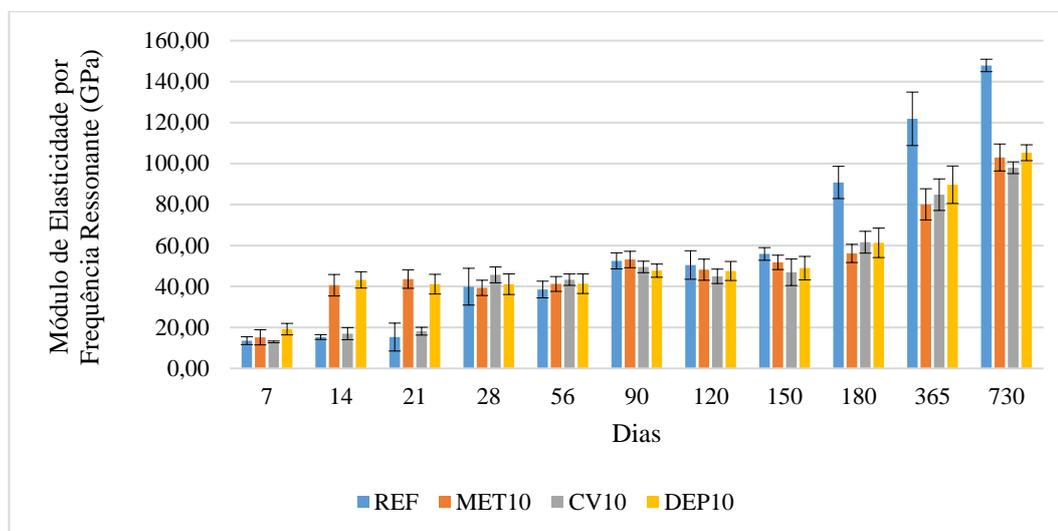
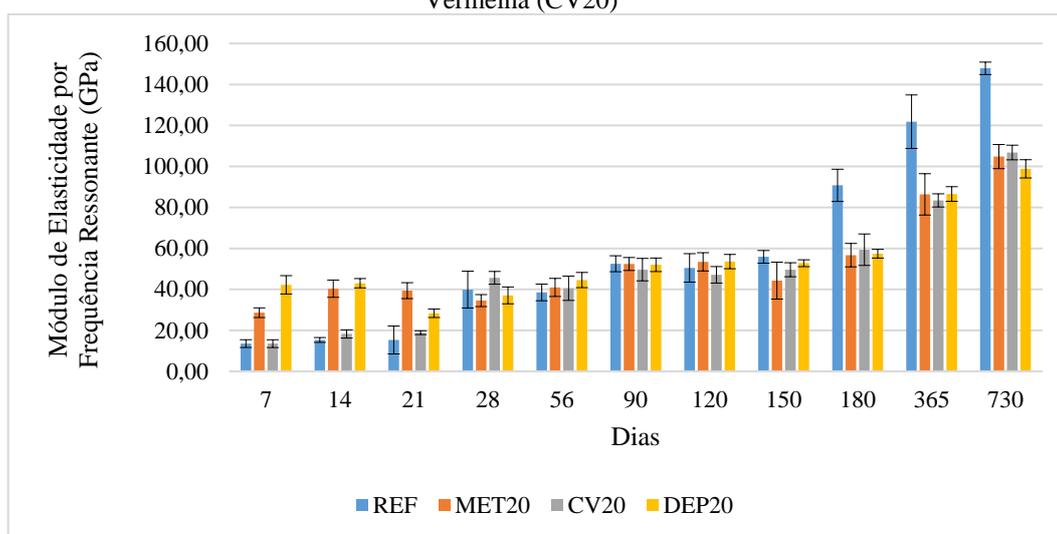


Gráfico 16: Módulo de elasticidade por frequência Ressonante do concreto referência em função das dosagens com substituição do cimento por 20% por Metacaulim (MET20), Depozo (DEP20) e Cerâmica Vermelha (CV20)



O percentual de 5% de substituição do cimento pelos MCS foi eficiente para aumentar o valor de módulo de elasticidade em relação ao concreto referência, alcançando um aumento de quase 11% no CV5. A dosagem DEP5, de acordo com os resultados, logo nas primeiras idades, 7, 14, 21 e 28 dias, apresentou valores superiores aos referência. Os resultados da dosagem MET10 e DEP10 apresentaram resultados similares dos 14 aos 120 dias, sendo esses valores superiores ao concreto referência. A progressão do aumento dos valores para CV20 é similar ao do concreto referência, apresentando um salto 40%

aos 28 dias. O MET20 foi a dosagem que apresentou os maiores valores de módulo de elasticidade nas primeiras idades entre as dosagens com 20% de substituição.

5.2.3 Resistividade Elétrica Volumétrica

A resistividade elétrica volumétrica foi avaliada como um parâmetro de durabilidade dos concretos com inserção de MCS e do concreto referência. As medições foram em 8 corpos de prova cilíndricos, nas dimensões 100x200 mm, para cada tipo de concreto confeccionado. Os Gráficos 18, 19 e 20 mostram os resultados apurados da resistividade elétrica da dosagem referência em relação a cada MCS utilizado, Metacaulim (MET), Depozo (DEP) e Cerâmica Vermelha (CV), respectivamente.

Gráfico 17: Resistividade Elétrica Volumétrica da dosagem referência em função das dosagens com Metacaulim

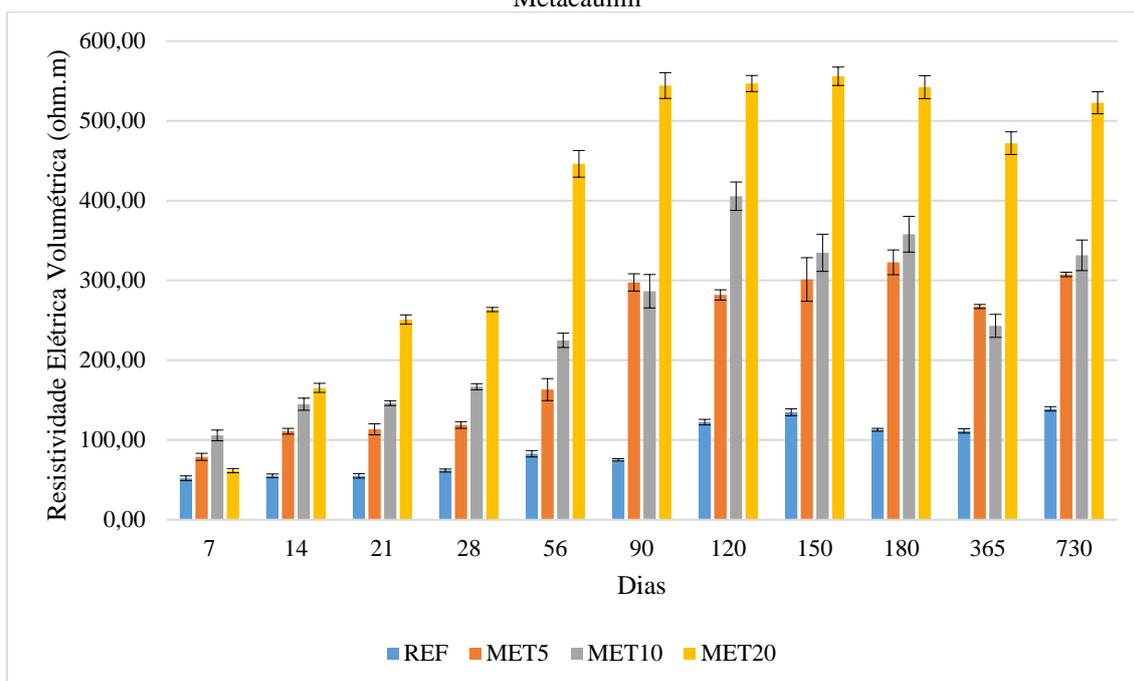


Gráfico 18: Resistividade Elétrica Volumétrica da dosagem referência em função das dosagens com Cerâmica Vermelha

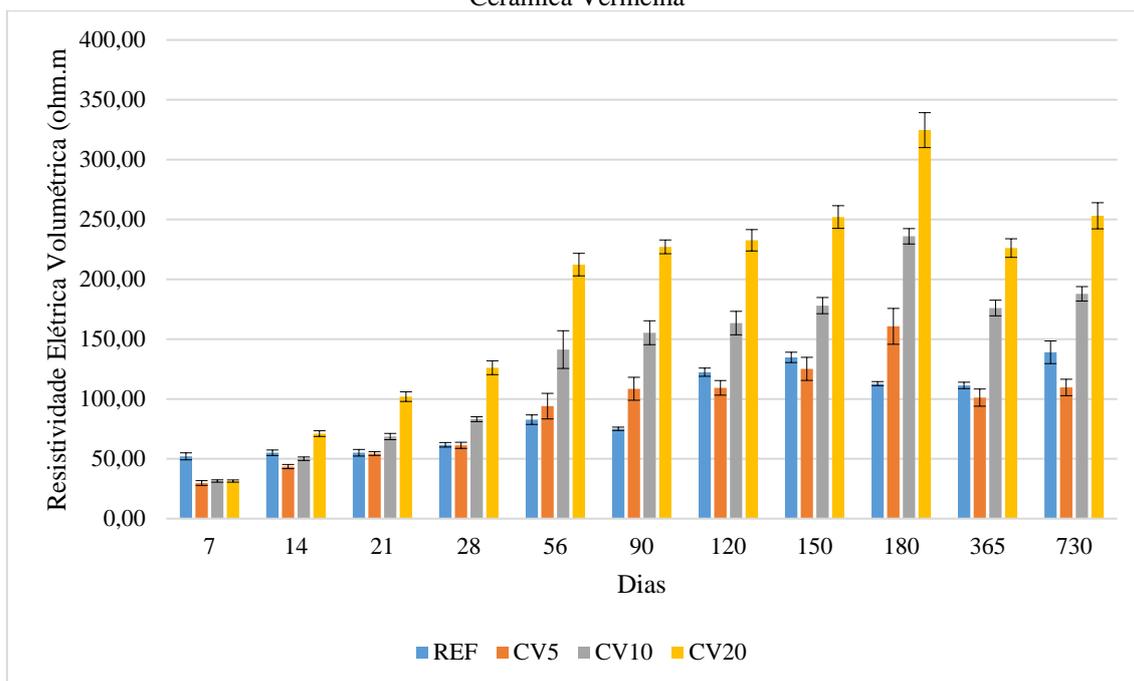
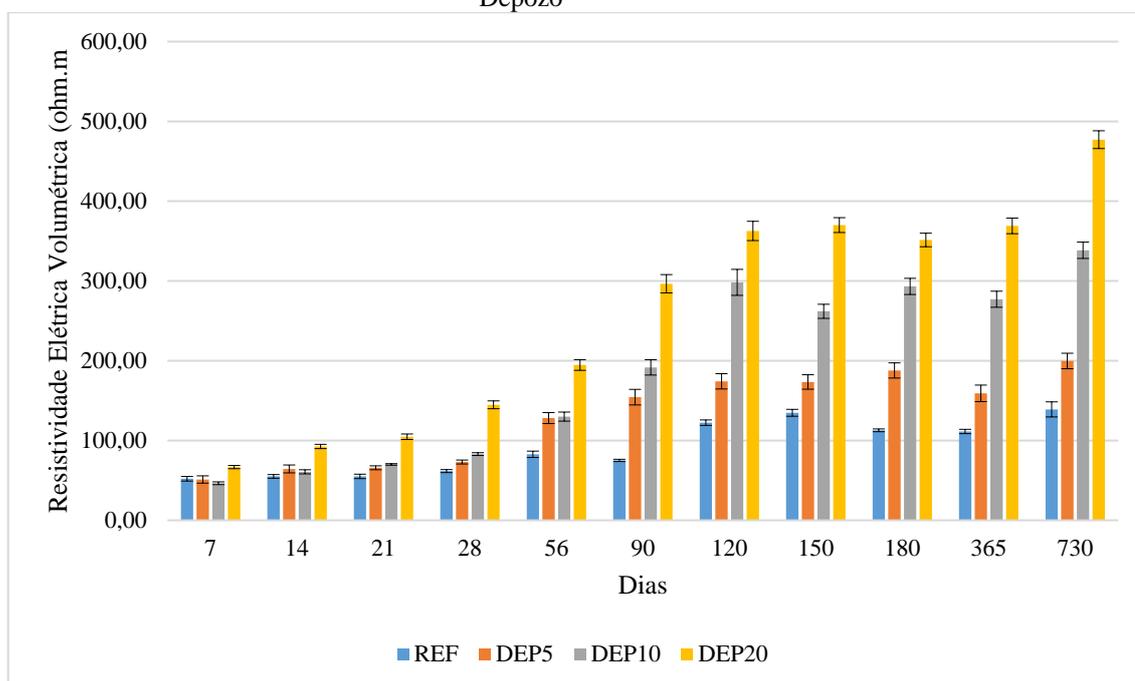


Gráfico 19: Resistividade Elétrica Volumétrica da dosagem referência em função das dosagens com Depozo



De forma geral, a substituição do cimento por MCS, em todos os percentuais, colaboraram para a melhora do parâmetro de durabilidade dos concretos e evoluíram no decorrer das idades, exceto a dosagem CV5, substituição do cimento por 5% de Cerâmica Vermelha. Os concretos com substituição parcial do cimento por 20% de Metacaulim,

MET20, e por 20% de Depozo, DEP20, apresentaram os maiores resultados de resistividade elétrica volumétrica quando comparado ao concreto referência e as demais dosagens, em todas as idades. Esses resultados colaboram com resultados encontrados nas literaturas, no qual afirmam que a inserção de MCS proporcionam o refinamento dos poros melhorando a microestrutura (ZHANG *et al.*, 2020; DHANYA *et al.*, 2018; GHODDOUSI; SAADABADI, 2017; TOMLINSON *et al.*, 2017).

As dosagens MET20 e MET5, 20% e 5% de Metacaulim, apresentaram resistividade elétrica volumétrica cerca de 300% e 96% maior que o concreto referência aos 28 dias, respectivamente. A dosagem com Cerâmica Vermelha, embora apresente resistividade elétrica volumétrica superior ao concreto referência desde os 28 dias, CV10 e CV20, observa-se resultados mais relevantes a partir dos 90 dias. As dosagens com Depozo se destacaram a partir dos 56 dias. As dosagens com uso de Depozo apresentaram valores de resistividade elétrica volumétrica crescente e superiores ao concreto referência a partir dos 7 dias. Aos 28 dias, a dosagem com 20% de Depozo, DEP20, apresentou valores 100% maiores do que o concreto referência.

Os Gráficos 21, 22 e 23 mostram os resultados da dosagem referência em relação aos determinados percentuais de substituição do cimento, 5%, 10% e 20%, respectivamente, por cada MCS utilizado o Metacaulim, o Depozo e a Cerâmica Vermelha. Todos os percentuais apresentaram valores crescentes no decorrer das idades.

Gráfico 20: Resistividade Elétrica Volumétrica do concreto referência em função das dosagens com substituição do cimento por 5% por Metacaulim (MET5), Depozo (DEP5) e Cerâmica Vermelha (CV5)

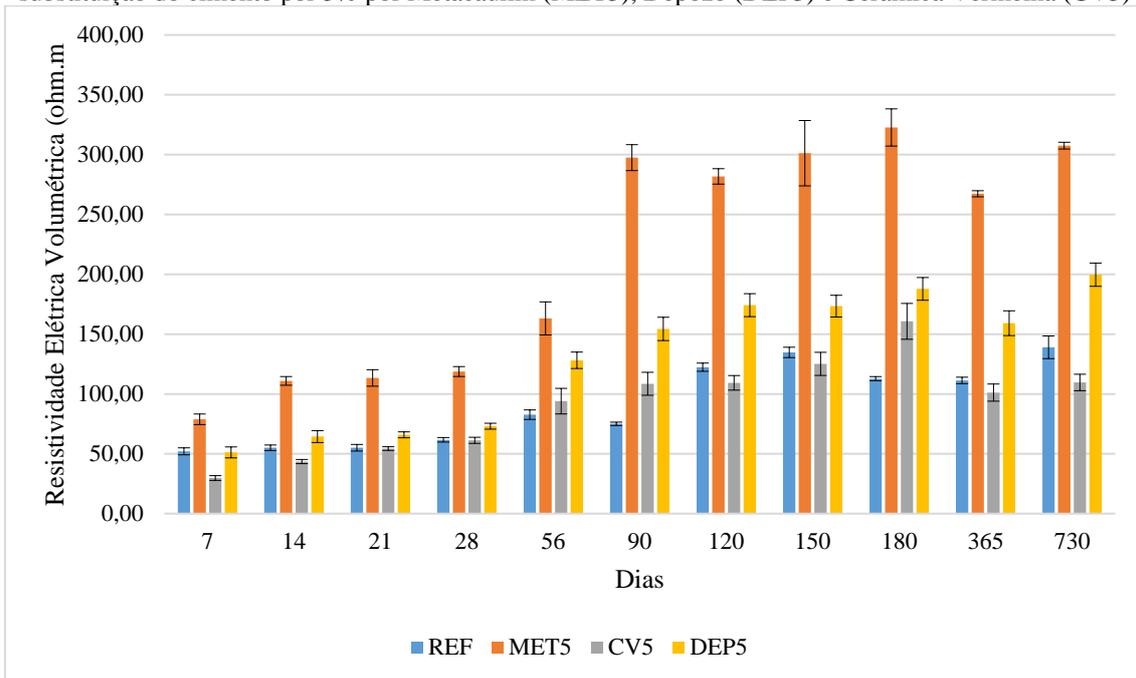


Gráfico 21: Resistividade Elétrica Volumétrica do concreto referência em função das dosagens com substituição do cimento por 10% por Metacaulim (MET10), Depozo (DEP10) e Cerâmica Vermelha (CV10)

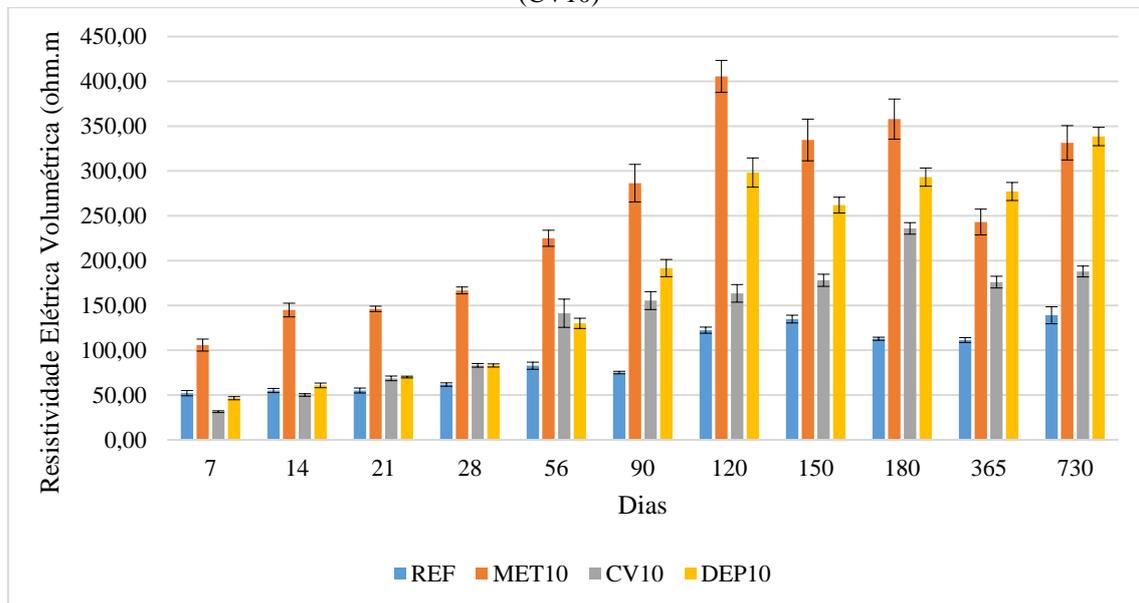
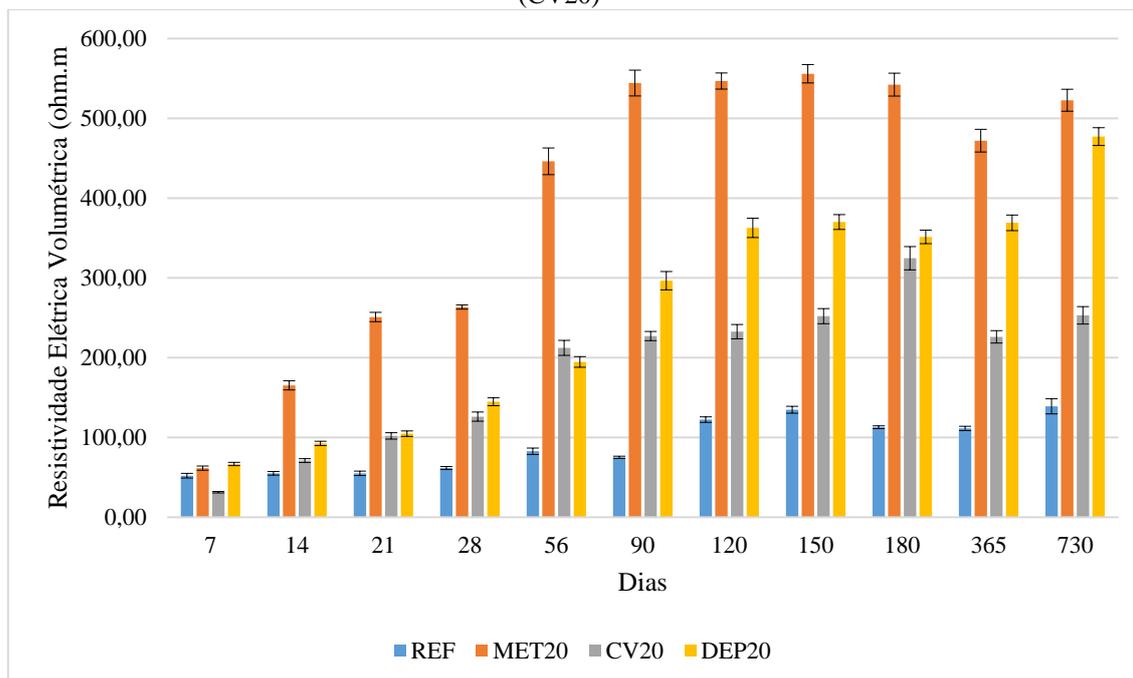


Gráfico 22: Resistividade Elétrica Volumétrica do concreto referência em função das dosagens com substituição do cimento por 20% por Metacaulim (MET20), Depozo (DEP20) e Cerâmica Vermelha (CV20)



Nas dosagens com 5% de substituição do cimento por MCS, o resultado mais relevante foi apresentado por MET5, 100% maior que o concreto referência, aos 28 dias. A dosagem menos eficaz nesse parâmetro foi a CV5, a qual apresentou valores similar ao concreto referência aos 28 dias. As dosagens MET10 e DEP10 apresentaram os maiores valores de resistividade elétrica volumétrica entre as dosagens com 10% de substituição. Os resultados mostram que o MET10 apresentou resultados superiores ao concreto de referência desde as primeiras idades, chegando a 171% maior aos 28 dias. O DEP10, aos 28 dias, alcançou resistividade elétrica volumétrica 36% maior que o concreto referência, e a partir dos 90 dias esses valores aumentaram expressivamente, atingindo valores 150% maiores. Os resultados indicam que a porcentagem de 20% de substituição do cimento foi a que mais colaborou para o aumento da resistividade elétrica volumétrica. Aos 28 dias, os concretos denominados MET20, CV20 e DEP20, apresentaram valores superiores quando comparado à dosagem referência, 336%, 106% e 136%, respectivamente.

5.2.4 Absorção por imersão e índice de vazios.

A absorção de água por imersão e o índice de vazios foram avaliados aos 56 dias. Os resultados são apresentados na Tabela 11. O intuito foi observar a influência dos distintos teores de substituição do cimento pelo MCS na porosidade aberta da matriz cimentícia. Uma vez que, quanto menor o fator de água absorvida por um concreto maior resistência à penetração de substâncias nocivas à estrutura, conferido maior durabilidade e qualidade à estrutura.

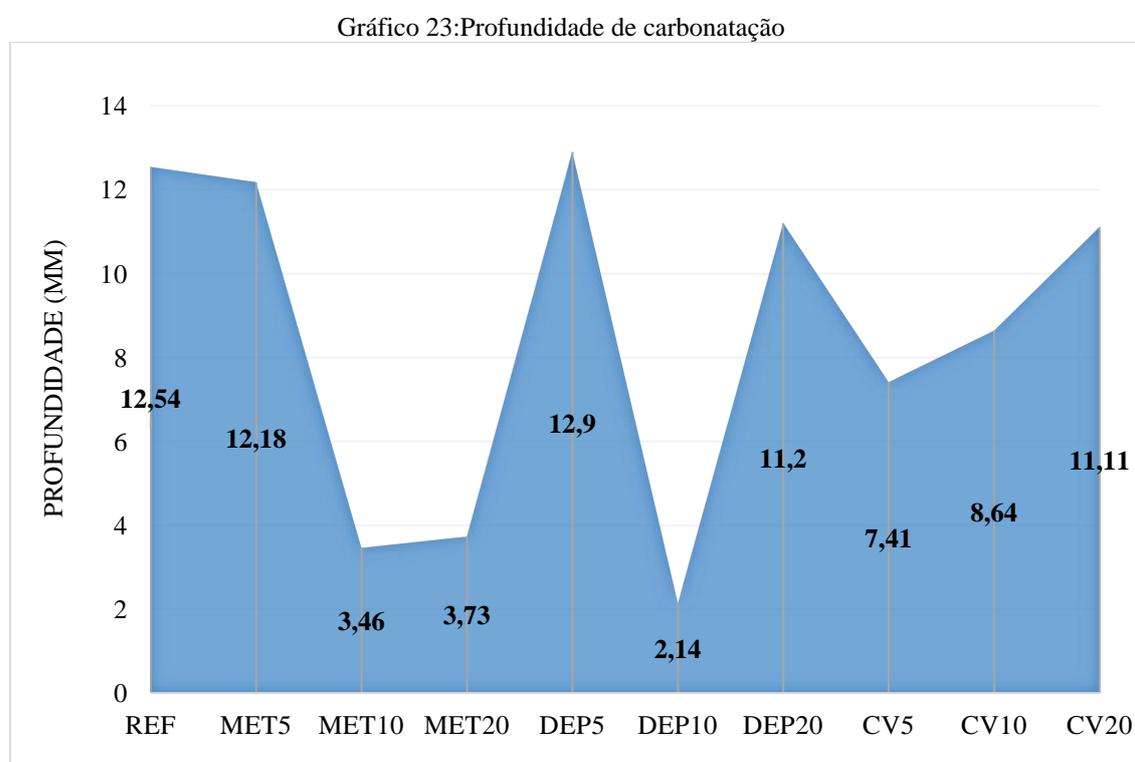
Tabela 11 Absorção por imersão e Índice de vazios

Dosagem	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)	Massa Específica Saturada (g/cm ³)	Massa Específica Real (g/cm ³)
REF	5,13	11,77	3670,80	3859,00	2,30
MET5	2,54	6,09	3739,60	3834,40	2,40
MET10	5,01	11,57	3634,10	3816,30	2,31
MET20	4,87	11,22	3669,10	3847,70	2,31
DEP5	5,61	13,19	3649,70	3854,30	2,35
DEP10	4,70	11,07	3628,60	3799,10	2,36
DEP20	5,27	12,06	3630,50	3821,70	2,29
CV5	5,76	13,31	3560,00	3765,10	2,31
CV10	2,29	5,45	3701,80	3786,60	2,38
CV20	4,80	14,18	3679,20	3782,30	2,37

Os resultados indicam que a inserção dos MCS pode modificar a estrutura porosa, colaborando, na maioria dos casos, para um concreto com menor teor de absorção. Nas dosagens com inserção de Metacaulim, os resultados mostram que a absorção de água e o índice de vazios foram reduzidos quando comparado ao concreto referência. A MET5 apresentou 2,54% e o concreto REF 5,13% de absorção de água. Assim como nos resultados apresentados por GILL e SIDDIQUE (2018), a absorção de água aumentou com o acréscimo do percentual de substituição do cimento por Metacaulim. Entre as dosagens com Depozo, a DEP10, substituição de 10% do cimento por Depozo, apresentou menor percentual de absorção, 4,7%, em relação a DEP5, 5,61%, e a DEP20, 5,27%. A Cerâmica Vermelha apresentou menor absorção de água para a dosagem com 10% de substituição, 2,29%. As dosagens MET10, MET20 e DEP10 apresentaram índice de vazios similares ao concreto referência.

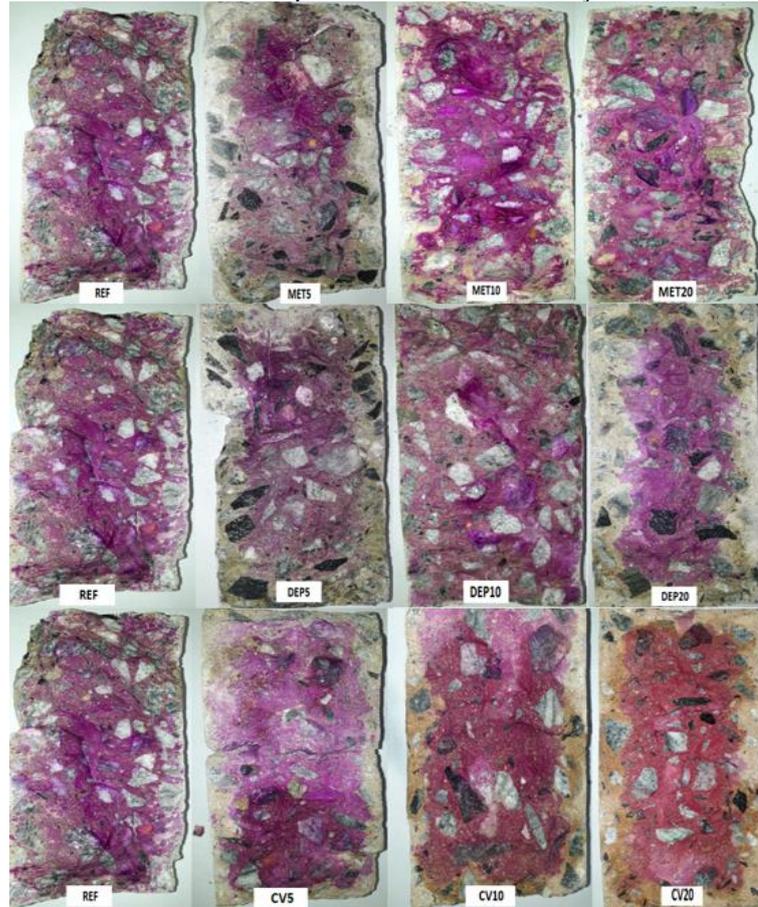
5.2.5 Carbonatação

As profundidades de carbonatação nos concretos são apresentadas no Gráfico 23 e na Figura 11. O concreto referência e as demais 9 dosagens, aos 56 dias, foram submetidas à carbonatação acelerada em uma câmara, ficando expostos a condições estáveis e controladas de temperatura a $(26 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e concentração de dióxido de carbono a $(5,0 \pm 0,5) \%$, por um período de 90 dias. A avaliação da profundidade ocorreu por método colorimétrico e medição da espessura carbonatada com paquímetro. A solução empregada foi de 1 g de fenolftaleína dissolvida em 70 ml de álcool etílico e 30 ml de água.



Os resultados mostram que a maior profundidade de carbonatação, 12,90 mm, foi atribuída a dosagem DEP5, com substituição do cimento por 5% de Depozo. Observa-se que essa mesma dosagem foi a que apresentou maior índice de absorção de água. Valor próximo ao apresentado pelo concreto referência 12,54 mm. As dosagens DEP10, MET10 e MET20 apresentaram a menor profundidade de carbonatação, 2,14 mm, 3,46 mm e 3,73 mm, respectivamente.

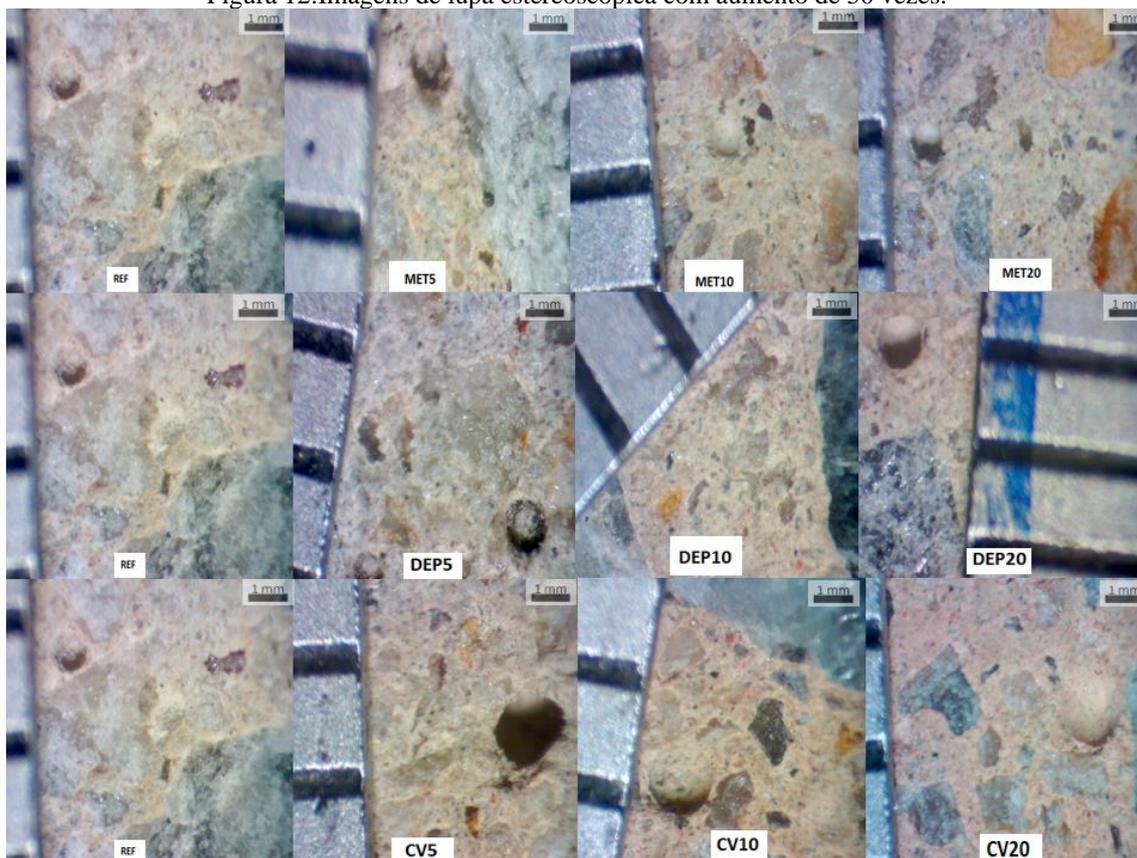
Figura 11: Análise colorimétrica da profundidade de carbonatação dos concretos



5.2.6 Microscopia Óptica

A Figura 12 mostra as imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para as 10 amostras de concretos confeccionadas. O alcance aplicado foi de 50 vezes para todas as amostras.

Figura 12: Imagens de lupa estereoscópica com aumento de 50 vezes.



O objetivo dessa análise foi visualizar a macroestrutura dos concretos. Os poros formados nos concretos com substituição dos cimentos por Metacaulim são similares aos poros formados no concreto referência. As imagens indicam que os concretos com substituição parcial do cimento por Cerâmica Vermelha formaram poros maiores que o concreto referência e que os concretos com Metacaulim e Depozo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no estudo da influência de diferentes teores de materiais cimentícios suplementares nos parâmetros de durabilidade e nas propriedades mecânicas do concreto essa pesquisa mostrou a viabilidade da substituição do cimento por outros materiais. Essa prática pode vir a colaborar para a redução do uso cimento na indústria da construção civil, e, ainda, colaborar para o descarte proveitoso de resíduos como cerâmica vermelha, escória de alto forno, resíduo de fábrica de porcelanatos, entre outros.

Os materiais cimentícios suplementares empregados, Metacaulim, Depozo e resíduo de Cerâmica Vermelha, com base nas características químicas apresentam somatório de teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ superior a 70%. Embora esse parâmetro seja associado a materiais caracteristicamente pozolânicos, as análises realizadas por meio do Chappelle Modificado e pela termogravimetria indicam que apenas o Metacaulim e o Depozo são pozolânicos.

Em relação ao desempenho mecânico, a inserção de Metacaulim colaborou para o aumento da resistência à compressão em todas as idades, sendo a dosagem com 20% a mais eficiente. O Depozo e o resíduo de Cerâmica Vermelha mostraram resultados mais próximos do concreto referência aos 56 dias, devido as reações tardias dos compostos. O módulo de elasticidade ressonante foi aprimorado em todas as dosagens. Os resultados mostram que, de um modo geral, a substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares colaboraram para o aumento da rigidez.

Quanto aos parâmetros de durabilidade, a substituição do cimento por MCS, em todos os percentuais, colaboraram para o aumento da durabilidade dos concretos e evoluíram no decorrer das idades, exceto a dosagem CV5, substituição do cimento por 5% de Cerâmica Vermelha. Os concretos com substituição parcial do cimento por 20% de Metacaulim, MET20, e por 20% de Depozo, DEP20, apresentaram os maiores resultados de resistividade elétrica volumétrica quando comparado ao concreto referência e as demais dosagens, em todas as idades.

Destaque-se que a elevada resistividade elétrica nos concretos é um indicativo de que o material possui características de alta durabilidade, uma vez que são menos propícias as ações de agentes agressivos do meio externo. Ao conseguir manter a resistividade elétrica com valores similares ou até mesmo maiores em concreto com substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares, cria-se um material sustentável no âmbito econômico e ambiental. Ponto relevante dessa pesquisa,

haja vista, a necessidade de reduzir o uso do cimento, responsável por grande parte da emissão de CO₂, e a necessidade de obras com maior durabilidade, o que diminui os custos com manutenção e o consumo de mais materiais em novas obras.

Ainda, os resultados indicam que a inserção dos MCS pode modificar a estrutura porosa, colaborando, na maioria dos casos, para um concreto com menor teor de absorção. A profundidade de carbonatação foi reduzida nas dosagens estudadas, exceto para o DEP5, a que também apresentou maior teor de absorção de água. Qualitativamente, considerando os resultados alcançados com as imagens da microscopia óptica, pode-se dizer que o Metacaulim foi o MCS que colaborou mais para o refinamento dos poros.

Destaque-se que os parâmetros mecânicos e durabilidade foram avaliados em idades iniciais e avançadas, contudo a continuidade das análises por longo prazo permitirá melhores análises em relação a vida útil das estruturas de concreto com inserção de materiais cimentícios suplementares. Outra abordagem relevante é ampliar a proporção de substituição do cimento nas dosagens.

Analisando economicamente o uso de matérias cimentícios suplementares, pode-se considerar proeminente a substituição do cimento por esses resíduos. Para produzir um metro cúbico de concreto, como o utilizado nessa pesquisa, é necessário 350 kg de cimento, o que representa 60% do custo total. Assim, cabe uma análise quantitativa considerando a redução do custo uma vez que os resíduos agroindustriais são repassados a custos mínimos, pois algumas indústrias como as de porcelanato e usinas siderúrgicas não beneficiam os seus próprios resíduos.

Desse modo, os resultados encontrados comprovam que a inserção de materiais cimentícios suplementares modificam a microestrutura do concreto colaborando, usualmente, para melhorias no desempenho mecânico e nos parâmetros de durabilidade do concreto. Portanto, mesmo que ocorra redução de alguma propriedade específica, elas podem ser consideradas irrelevantes haja vista as melhorias do contexto geral de aplicação do concreto na durabilidade e qualidade das estruturas, tornando-os menos susceptíveis à degradação do meio.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento Design of structural concrete -Procedure. p. 238, 2014a.

ABNT. NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. p. 10, 2014b.

ABNT. ABNT NBR 5738:2015 Versão Corrigida:2016. **ABNT NBR 5738:2015 Versão Corrigida:2016**, p. 9, 2015.

ABRAHAM, S. M.; RANSINCHUNG, G. D. R. N. Influence of RAP aggregates on strength , durability and porosity of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 1105–1112, 2018.

ADAMSON, M.; RAZMJOO, A.; POURSAEE, A. Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 426–432, 2015.

AHARI, R. S.; ERDEM, T. K.; RAMYAR, K. Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 26–37, 2015.

AL-AYISH, N. et al. The influence of supplementary cementitious materials on climate impact of concrete bridges exposed to chlorides. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 391–398, 2018.

ANDREOLA, F. et al. Comparison of three manufacturing techniques for sustainable porous clay ceramics. **Materials**, v. 14, n. 1, p. 1–18, 2021.

ANDREW, R. M. Global CO₂emissions from cement production. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 1, p. 195–217, 2018.

APRIANTI, E. et al. Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes - A review. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 176–187, 2015.

APRIANTI S, E. A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production – a review part II. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 4178–4194, 2017.

ASTM Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use in concrete C 618. 2015.

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

BAHURUDEEN, A. et al. Assesment of Pozzolanic Performance of Sugarcane Bagasse Ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 2001, p. 04015095-1–11, 2015.

BERROCAL, C. G. et al. Electrical resistivity measurements in steel fibre reinforced cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 216–229, 2018.

BEYCIOLLU, A.; YILMAZ ARUNTAŞ, H. Workability and mechanical properties of self-compacting concretes containing LLFA, GBFS and MC. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 626–635, 2014.

BIERNACKI, J. J. et al. Cements in the 21stcentury: Challenges, perspectives, and opportunities. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 100, n. 7, p. 2746–2773, 2017.

BREKAILO, F. et al. Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia. **Cerâmica**, v. 65, n. 375, p. 351–358, 2019.

CAI, J.; DONG, F.; LUO, Z. Durability of Concrete Bridge Structure under Marine Environment. n. 1, p. 429–436, 2018.

CARNEIRO, L. R. S. et al. Evaluation of the pozzolanicity of nanostructured sol-gel silica and silica fume by electrical conductivity measurement. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 252–257, 2018.

CASTRO, S. DE; BRITO, J. DE. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 41, p. 7–14, 2013.

CHEN, C. T.; CHANG, J. J.; YEIH, W. C. The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 35–43, 2014.

CHEN, J.; LI, Z.; JIN, X. Critical features of microstructure development of early-age cement paste revealed by non-contact electrical resistivity measurement. **Construction and Building Materials**, v. 154, n. April 2018, p. 1121–1129, 2017a.

CHEN, J.; LI, Z.; JIN, X. Critical features of microstructure development of early-age cement paste revealed by non-contact electrical resistivity measurement. **Construction and Building Materials**, v. 154, n. November, p. 1121–1129, 2017b.

CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p. 41–49, 2017.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 10, p. 3301–3303, 2009.

CRUZ, J. M. et al. The use of electrical impedance spectroscopy for monitoring the hydration products of Portland cement mortars with high percentage of pozzolans. **Cement and Concrete Research**, v. 50, p. 51–61, 2013.

DHANYA, B. S. et al. Performance evaluation of concretes having different supplementary cementitious material dosages belonging to different strength ranges. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 984–995, 2018.

DONG, B. et al. Evolutionary trace for early hydration of cement paste using electrical resistivity method. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 16–20, 2016.

ELAKNESWARAN, Y. et al. Hydration study of slag-blended cement based on thermodynamic considerations. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 615–625, 2016.

EMBONG, R. et al. Effectiveness of low-concentration acid and solar drying as pre-treatment features for producing pozzolanic sugarcane bagasse ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 953–962, 2016.

FABBRI, B.; GUALTIERI, S.; LEONARDI, C. Modifications induced by the thermal treatment of kaolin and determination of reactivity of metakaolin. **Applied Clay Science**, v. 73, n. 1, p. 2–10, 2013.

FANCA, G. et al. Development of conductive cementitious materials using recycled carbon fibres. **Cement and Concrete Composites**, v. 92, n. November 2017, p. 135–144, 2018.

FITOS, M. et al. Pozzolanic activity of thermally and mechanically treated kaolins of hydrothermal origin. **Applied Clay Science**, v. 116–117, p. 182–192, 2015.

GE, Z. et al. Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 128–136, 2015.

GHASEMZADEH MOSAVINEJAD, S. H. et al. Crack detection of a HPCFRCC thin plate using electrical resistivity method. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 255–267, 2018.

GHODDOUSI, P.; SAADABADI, L. A. Study on hydration products by electrical resistivity for self-compacting concrete with silica fume and metakaolin. 2017.

GHOSH, P.; TRAN, Q. Correlation Between Bulk and Surface Resistivity of Concrete. [s.d.].

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.

GUI, Q.; QIN, M.; LI, K. Gas permeability and electrical conductivity of structural concretes: Impact of pore structure and pore saturation. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 109–119, 2016.

GURSEL, A. P.; MARYMAN, H.; OSTERTAG, C. A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 823–836, 20 jan. 2016.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 3**. [s.l.: s.n.].

HAN, C. et al. Behavior of high performance concrete pastes with different mineral admixtures in simulated seawater environment. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 426–438, 2018.

HAO, L. et al. Effect of salty freeze-thaw cycles on durability of thermal insulation concrete with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 478–486, 2018.

HOLLANDERS, S. et al. Pozzolanic reactivity of pure calcined clays. **Applied Clay Science**, v. 132–133, p. 552–560, 2016a.

HOLLANDERS, S. et al. Pozzolanic reactivity of pure calcined clays. **Applied Clay Science**, v. 132–133, p. 552–560, 2016b.

HOOTON, R. D. et al. Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. **Construction and Building Materials**, v. 187, n. PART C, p. 237–251, dez. 2018.

HOOTON, R. D.; BICKLEY, J. A. Design for durability: The key to improving concrete sustainability. **Construction and Building Materials**, v. 67, n. PART C, p. 422–430, 2014.

HORNBOSTEL, K. et al. On the limitations of predicting the ohmic resistance in a macro-cell in mortar from bulk resistivity measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 76, p. 147–158, 2015.

HU, J. Comparison between the effects of superfine steel slag and superfine phosphorus slag on the long-term performances and durability of concrete. p. 1251–1263, 2017.

HUANG, X. et al. The effect of supplementary cementitious materials on the permeability of chloride in steam cured high-ferrite Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 99–106, 2019.

HUANG, Y. et al. Preliminary investigation of pozzolanic properties of calcined waste kaolin. **Medziagotyra**, v. 24, n. 2, p. 177–184, 2018.

HUDA, S. B.; SHAHRIA ALAM, M. Mechanical and freeze-thaw durability properties of recycled aggregate concrete made with recycled coarse aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 10, p. 1–9, 2015.

IKUMI, T.; SEGURA, I.; CAVALARO, S. H. P. Influence of early sulfate exposure on the pore network development of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 33–47, 2017.

JAFARI, K. et al. Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 185–196, 2018.

JIAO, D. et al. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 146–159, 2017.

JOSHAGHANI, A.; BALAPOUR, M.; AKBAR, A. Effect of controlled

environmental conditions on mechanical , microstructural and durability properties of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 134–149, 2018.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 71–80, 2015.

KALINA, R. D. et al. False positives in ASTM C618 specifications for natural pozzolans. **ACI Materials Journal**, v. 116, n. 1, p. 165–172, 2019.

KANG, S.-H.; HONG, S.-G.; MOON, J. The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 389–400, 1 jan. 2019.

KAZMI, S. M. S. et al. Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 231–240, 2017.

KAZMI, S. M. S. et al. Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: A comparative evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 120284, 2020.

KOTHANDARAMAN, S.; KANDASAMY, S. The effect of controlled permeable formwork (CPF) liner on the surface quality of concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 76, p. 48–56, 2017.

KURDA, R.; DE BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, n. October 2018, p. 169–182, 2018a.

KURDA, R.; DE BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, n. August 2018, p. 169–182, 2018b.

LIU, Y.; PRESUEL-MORENO, F. J.; PAREDES, M. A. Determination of chloride diffusion coefficients in concrete by electrical resistivity method. **ACI Materials Journal**, v. 112, n. 5, p. 631–640, 2015.

LIU, Z. et al. An analytical model for determining the relative electrical resistivity of cement paste and C-S-H gel. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 647–655, 2013.

LIU, Z.; ZHANG, Y.; JIANG, Q. Continuous tracking of the relationship between resistivity and pore structure of cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 26–31, 2014.

LUDWIG, H. M.; ZHANG, W. Research review of cement clinker chemistry. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 24–37, 2015.

M.P. LUXAN, F.MADRUGA, J. S. RAPID EVALUATION OF POZZOLANIC ACTIVITY OF NATURAL PRODUCTS BY CONDUCTIVITY MEASUREMENT. **Cement and Concrete Research**, v. 19, n. 0008-8846/89, p. 63–68, 1988.

MEDEIROS, R. A.; LIMA, M. G. Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 11–16, 2016.

MEDINA, C.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; FRÍAS, M. Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 40, p. 151–160, 2013.

MEHRA, P.; GUPTA, R. C.; THOMAS, B. S. Assessment of durability characteristics of cement concrete containing jarosite. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 59–65, 2016.

MILLER, S. A. et al. Concrete mixture proportioning for desired strength and

reduced global warming potential. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 410–421, 2016.

MILLER, S. A. Supplementary cementitious materials to mitigate greenhouse gas emissions from concrete : can there be too much of a good thing ? **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 587–598, 2018.

MOTAHARI KAREIN, S. M. et al. Pretreatment of natural perlite powder by further milling to use as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 782–789, 2018.

NAVRÁTILOVÁ, E.; ROVNANÍKOVÁ, P. Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 530–539, 2016.

NGUYEN, A. Q. et al. Assessment of the electrochemical state of steel reinforcement in water saturated concrete by resistivity measurement. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 455–466, 20 maio 2018.

P. KUMAR MEHTA ; PAULO J. MONTEIRO. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. [s.l: s.n.].

PARIS, J. M. et al. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1–18, 2016.

PARK, H. M. et al. Electrical resistivity reduction with pitch-based carbon fiber into multi-walled carbon nanotube (MWCNT)-embedded cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 484–493, 2018.

PARK, K.-B.; KWON, S.-J.; WANG, X.-Y. Analysis of the effects of rice husk ash on the hydration of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 196–205, 15 fev. 2016.

RAVERDY, M. et al. **STRUCTURE OF POZZOLANA AND FLY-ASH AND THE HYDRATION OF POZZOLANIC AND FLY-ASH CEMENTS - APPRECIATION OF POZZOLANIC REACTIVITY OF MINOR COMPONENTS**. 1980

ROSENQVIST, M. et al. Effects of interactions between leaching, frost action and abrasion on the surface deterioration of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 849–860, 2017.

SCHACKOW, A. et al. Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 62, p. 82–89, 2015.

SCHNEIDER, M. Process technology for efficient and sustainable cement production. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 14–23, 2015.

SCHULZE, S. E.; RICKERT, J. Suitability of natural calcined clays as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, n. July 2018, p. 92–97, 2018.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 38–56, 1 dez. 2015.

SHARMA, R.; KHAN, R. A. Influence of copper slag and metakaolin on the durability of self compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1171–1186, 2018.

SHEN, L. et al. A comparison study of the performance of three electro-migrating corrosion inhibitors in improving the concrete durability and rehabilitating decayed reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 238, p. 117673, 2020.

SNELLINGS, R. et al. Properties and pozzolanic reactivity of flash calcined dredging sediments. **Applied Clay Science**, v. 129, p. 35–39, 2016.

SUN, I.; YEONG, S.; IK, E. Evaluation of durability of concrete substituted

heavyweight waste glass as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 269–277, 2018.

TIRONI, A. et al. Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 276–281, 2012.

TOMLINSON, D. et al. Early age electrical resistivity behaviour of various concrete mixtures subject to low temperature cycling. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, 2017.

VALENTINI, L. et al. Use of nanocomposites as permeability reducing admixtures. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 101, n. 9, p. 4275–4284, 2018.

WENNER, F. A method of measuring earth resistivity. **Bulletin of the Bureau of Standards**, v. 12, n. 4, p. 469, 1916.

WU, M. et al. Reducing environmental impacts and carbon emissions : Study of effects of super fine cement particles on blended cement containing high volume mineral admixtures. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 358–369, 2018.

XIE, T.; VISINTIN, P. A unified approach for mix design of concrete containing supplementary cementitious materials based on reactivity moduli. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 68–82, 2018.

XU, D. et al. On the future of Chinese cement industry. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 2–13, 2015.

YIM, H. J.; LEE, H.; KIM, J. H. Evaluation of mortar setting time by using electrical resistivity measurements. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 679–686, 2017.

YUAN, G.; LI, Q. The use of surface coating in enhancing the mechanical properties and durability of concrete exposed to elevated temperature. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 375–383, 2015.

ZEYAD, A. M. et al. Pozzolanic reactivity of ultrafine palm oil fuel ash waste on strength and durability performances of high strength concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 511–522, 2017.

ZHANG, X. et al. An environmental sustainability assessment of China's cement industry based on emergy. **Ecological Indicators**, v. 72, p. 452–458, 2017.

ZHANG, Z. Y. et al. Change on shear strength of concrete fully immersed in sulfate solutions. **Construction and Building Materials**, v. 235, 2020.

ZHAO, K. et al. Effect of activator types and concentration of CO₂ on the steel corrosion in the carbonated alkali-activated slag concrete. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120044, 2020.