



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



**INFLUÊNCIA DA POZOLANICIDADE E DO EFEITO FÍLER NA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA VOLUMÉTRICA E SUPERFICIAL DO CONCRETO**

Sarah Silva Azzi

Belo Horizonte
Agosto/2020

Sarah Silva Azzi

**INFLUÊNCIA DA POZOLANICIDADE E DO EFEITO FÍLER NA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA VOLUMÉTRICA E SUPERFICIAL DO 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. Enio Pazini Figueiredo

Coorientadores:

Prof^a. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguilár

Prof. Dr. Eduardo Chahud

Belo Horizonte

Agosto/2020

A999i	<p>Azzi, Sarah Silva. Influência da pozolanicidade e do efeito filer na resistividade volumétrica e superficial do concreto [recurso eletrônico] / Sarah Silva Azzi. - 2020. 1 recurso online (xiii, 107f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Enio Pazini Figueiredo. Coorientadora: Maria Teresa Paulino Aguilar. Coorientador: Eduardo Chahud.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 96-107.</p> <p>1. Construção civil - Teses. 2. Pozolanas - Teses. 3. Resistividade elétrica – Teses. 4. Concreto – Teses. I. Figueiredo, Enio Pazini. II. Aguilar, Maria Teresa Paulino. III. Chahud, Eduardo. IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. V. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 691 (043)</p>
-------	---

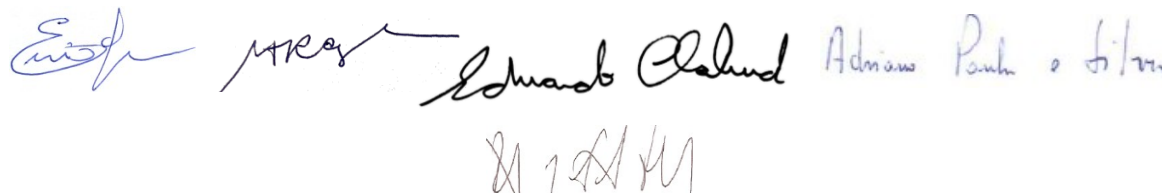
ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL Nº: 208,
da aluna **SARAH SILVA AZZI**.

Às quatorze horas do dia vinte e sete de agosto de dois mil e vinte, reuniu-se, por meio de sistema de interação de áudio e vídeo em tempo real (Google Meet) a Comissão Examinadora de Dissertação de Mestrado, aprovada *ad referendum* pela Coordenação do Colegiado do Curso de Mestrado em Construção Civil - EE.UFMG, para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **“INFLUÊNCIA DA POZOLANICIDADE E DO EFEITO FÍLER NAS RESISTIVIDADES ELÉTRICAS VOLUMÉTRICA E SUPERFICIAL DO 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, Prof. Dr. **Enio José Pazini Figueiredo**, 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, em sala virtual reservada, sem a participação da candidata na transmissão, houve o julgamento e expedição do resultado final pela Comissão. Foram atribuídas as seguintes indicações (aprovado ou reprovado):

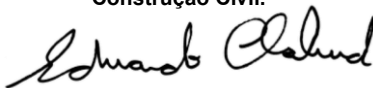
PROF. ENIO JOSÉ PAZINI FIGUEIREDO	(X) APROVADA () REPROVADA
PROFA. MARIA TERESA PAULINO AGUILAR	(X) APROVADA () REPROVADA
PROF. EDUARDO CHAHUD	(X) APROVADA () REPROVADA
PROF. ADRIANO DE PAULA E SILVA	(X) APROVADA () REPROVADA
PROF. ROMILDO DIAS TOLEDO FILHO	(X) APROVADA () REPROVADA

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 efetuar-las e entregar a versão final da dissertação à Secretaria do Curso de Mestrado em Construção Civil. O resultado final 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 por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, vinte e sete de agosto de dois mil e vinte.

Assinaturas da comissão:



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

AGRADECIMENTOS

A dissertação foi concluída com a ajuda de pessoas que acreditaram em mim e contribuíram para que esse trabalho torna-se realidade. Agradeço à Deus por ter me ajudado a realizar esse grande sonho, conquistar o título de Mestre e por cuidar diariamente da minha saúde possibilitando superar os desafios da vida. Aos meus pais e padrasto, agradeço por sempre acreditaram em minha capacidade, pelo apoio contínuo e por contribuírem para a realização da pesquisa. Aos meus tios, primos, avós, minhas maiores motivações, principalmente a Bárbara e a Tia Suely, que me deram apoio e ajuda durante todo processo, me incentivaram e contribuíram para que a realização dessa dissertação fosse possível. Obrigado. Aos meus professores e mentores Enio Pazini Figueiredo, Maria Teresa Paulino Aguilár e Eduardo Chahud sempre dispostos a ajudar dando toda assistência necessária, sempre pacientes me incentivaram e compartilharam seus ensinamentos, que contribuíram para a qualidade e concretização desta importante etapa. Agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais, a todo o corpo docente e a todos que colaboraram e contribuíram para a realização deste trabalho: a equipe técnica dos laboratórios de Minas, de Argamassa e Concreto, de Mecânica, de Materiais Metálicos e de Química da UFMG, aos meus amigos do laboratório e do mestrado, pela disponibilidade, pelo grande incentivo, pelos momentos e conversas divididas e por todo o apoio e colaboração na realização da pesquisa. A todos os funcionários do Departamento de Materiais de Construção, limpeza e laboratório que ajudaram ativa ou passivamente. Aos membros da banca, por cederem o tempo e pela colaboração com a conclusão do projeto. À empresa Wanmix que me ajudou durante as pesquisas, com paciência para ensinar todo o processo da dosagem do concreto, disponibilizando a carta traço utilizada e todos os materiais necessários para a realização do traço do concreto. À Pilleco Nobre, à Metacaulim do Brasil, à UFOP e a Britadora Borges que forneceram as adições minerais incorporadas ao concreto, possibilitando que a análise da dissertação fosse possível. Aos profissionais da empresa Flat Engenharia que me apoiaram durante esse processo, agradeço o incentivo e entendimento em relação as horas cedidas para minhas idas à UFMG durante o Mestrado, obrigada por me apoiarem durante esse período que exigiu minha total dedicação de tempo. Por fim, minha eterna gratidão a todos vocês que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma no desenvolvimento e construção desta pesquisa. Muito obrigado a todos.

“Querem que vos ensine o modo de chegar à ciência verdadeira?

Aquilo que se sabe, saber que se sabe; aquilo que não se sabe, saber que não se sabe; na verdade é este o saber.”

- Confúcio

RESUMO

A corrosão das armaduras é uma das manifestações patológicas mais frequentes nas estruturas de concreto. A velocidade de corrosão está diretamente relacionada à umidade no interior do concreto, à interligação dos poros e à movimentação e concentração de íons dentro do compósito cimentício. Essa mobilidade dos íons em solução aquosa pode modificar a resistência ôhmica do material e promover a aceleração do processo de corrosão da armadura. Neste contexto, a resistividade elétrica pode ser considerada um parâmetro importante para avaliar o risco da ocorrência de um processo corrosivo na armadura, além de avaliar a qualidade do concreto. Existem dois tipos de métodos utilizados para a medição da resistividade elétrica do concreto: o volumétrico e o superficial. A resistividade elétrica do compósito cimentício, seja volumétrica ou superficial, depende da composição química, da massa específica, da porosidade, da presença de umidade, da temperatura do concreto, dentre outros aspectos. A resistividade elétrica superficial, empregada como um indicador do risco de corrosão da armadura, é assunto de diversos trabalhos científicos atuais, enquanto são poucos os estudos sobre o uso da resistividade elétrica volumétrica para avaliação da qualidade do concreto. Dessa forma, este trabalho se propõe a avaliar a influência da natureza das adições minerais e da dimensão dos corpos de prova nos dois tipos de resistividade elétrica. Foram utilizadas adições minerais com características de fíler (fíler calcário e lama vermelha) e pozolana (cinza de casca de arroz e metacaulim). As adições minerais foram avaliadas quanto a sua composição química e seu nível de atividade pozolânica, para posteriormente serem adicionadas ao concreto em substituição a 10% da massa do cimento. Os concretos formados foram caracterizados quanto à resistividade elétrica volumétrica e superficial, à absorção por imersão e índices de vazios, ao módulo de elasticidade (estático e dinâmico) e à resistência à compressão. Os resultados obtidos indicaram que as dimensões dos corpos de prova não influenciam na resistividade elétrica volumétrica e confirmaram que interferem na resistividade elétrica superficial, devido à relação entre a altura dos corpos de prova e o distanciamento dos quatro eletrodos usados no equipamento de medição. Além disso, pode-se concluir que os compósitos cimentícios com adições minerais pozolânicas e fíleres apresentaram valores superiores de resistividade elétrica, tanto volumétrica quanto superficial. A resistência à compressão dos concretos com a adição das pozolanas apresentou um aumento significativo quando comparado com o concreto de referência. Por outro lado, o mesmo comportamento não foi observado nos concretos com a adição dos fíleres, uma vez que esses concretos apresentaram uma pequena redução nos resultados de resistência à compressão em relação ao concreto de referência. No módulo de elasticidade por frequência ressonante, dinâmico, e no módulo estático as adições minerais proporcionaram alterações significativas nos resultados obtidos quando comparados com o concreto de referência. Em função dos valores de resistividade obtidos, o risco de corrosão da armadura, empregando-se o concreto de referência, foi classificado como “de alto risco”. As substituições de 10% do cimento Portland pelas adições minerais pozolânicas e fíleres estudadas promoveram uma diminuição do risco de corrosão dos concretos devido a melhora na qualidade dos materiais.

Palavras chaves: Adições minerais. Atividade Pozolânica. Pozolanicidade. Efeito fíler. Resistividade elétrica volumétrica. Resistividade elétrica superficial.

ABSTRACT

Reinforcement corrosion is one of the most frequent pathological manifestations in concrete structures. The corrosion rate is directly related to the moisture inside the concrete, the interconnection of the pores and the movement and concentration of ions within the cementitious composite. This mobility of ions in aqueous solution can modify the ohmic resistance of the material and promote the acceleration of the corrosion process of the reinforcement. In this context, electrical resistivity can be considered an important parameter to assess the risk of the occurrence of a corrosive process in the reinforcement, in addition to assessing the quality of the concrete. There are two types of methods used to measure the electrical resistivity of concrete: bulk and superficial. The electrical resistivity of the cementitious composite, whether bulk or superficial, it depends on the chemical composition, the specific mass, the porosity, the presence of moisture, the temperature of the concrete, among other aspects. The surface electrical resistivity, used as an indicator of the risk of reinforcement corrosion, is the subject of several current scientific studies, while there are few studies on the use of bulk electrical resistivity to evaluate the quality of concrete. Thus, this work proposes to evaluate the influence of the nature of mineral additions and the dimension of the specimens in the two types of electrical resistivity. Mineral additions with characteristics of filler (limestone filler and red mud) and pozzolan (rice husk ash and metakaolin) were used. Mineral additions were evaluated for their chemical composition and their level of pozzolanic activity, to later be added to the concrete to replace 10% of the cement mass. The concretes formed were characterized in terms of bulk and surface electrical resistivity, immersion absorption and void indices, elasticity module (static and dynamic) and compressive strength. The results obtained indicated that the dimensions of the specimens do not influence the bulk electrical resistivity, but confirmed that they interfere with the surface electrical resistivity, due to the relationship between the height of the specimens and the distance between the four electrodes used in the measurement equipment. In addition, it can be concluded that cementitious composites with pozzolanic mineral additions and fillers showed higher values of electrical resistivity, both bulk and superficial. The compressive strength of concretes with the addition of pozzolans showed a significant increase when compared to reference concrete. On the other hand, the same behavior wasn't observed in concretes with the addition of fillers, since these concretes showed a small reduction in the results of compressive strength in relation to the reference concrete. In the elastic modulus by resonant frequency, dynamic, and in the static modulus, mineral additions provided significant changes in the results obtained when compared with the reference concrete. Due to the resistivity values obtained, the risk of reinforcement corrosion, using the reference concrete, was classified as "high risk". The substitution of 10% of Portland cement by the studied pozzolanic and filler mineral additions promoted a reduction in the risk of corrosion of the concretes due to the improvement in the quality of the materials.

Keywords: Mineral additions. Pozzolanic activity. Pozzolanicity. Filer effect. Bulk electrical resistivity. Superficial electrical resistivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Adições minerais incorporadas ao concreto.	4
Figura 2 - Classificação das adições minerais.	5
Figura 3 - Adições e substituições realizadas por Raisdorfer.	6
Figura 4 – Dosagens de concreto e adições utilizadas por Fonseca.	6
Figura 5 - Fíler Calcário.	7
Figura 6 - Lama Vermelha.	8
Figura 7 - Cinza de Casca de Arroz.	9
Figura 8 - Metacaulim.	10
Figura 9 - a) Amostras sendo colocadas em banho maria; b) Titulação de amostras.	15
Figura 10 - Consumo de cálcio pelas adições minerais.	16
Figura 11 - Curvas de termogravimetria e de sua derivada de pastas de cimento com 10% de fíler calcário aos 28 dias.	18
Figura 12 - Mecanismo eletroquímico de corrosão.	21
Figura 13 - Passagem da corrente elétrica pelo material.	22
Figura 14 - Modelo de material para cálculo de resistividade elétrica.	22
Figura 15 - Corpo de prova de concreto drenante poroso.	24
Figura 16 - Resistividade Elétrica Volumétrica.	26
Figura 17 - Resistividade Elétrica Superficial.	27
Figura 18 - Fluxograma da pesquisa.	28
Figura 19 - Distribuição granulométrica do cimento CPV-ARI.	30
Figura 20 - Distribuição granulométrica do Fíler Calcário.	36
Figura 21 - Distribuição granulométrica da Lama Vermelha.	36
Figura 22 - Equipamento para ensaio de área superficial específica.	37
Figura 23 - Equipamento para ensaio de Espectroscopia de Raios X por dispersão em energia.	38
Figura 24 - Ensaio de massa específica - Lê Chatelier.	38
Figura 25 - Equipamento para ensaio de Difração de Raios X.	39
Figura 26 - Ensaio de Chapelle Modificado.	39
Figura 27 - Equipamento para ensaio de análises termogravimétricas.	41
Figura 28 - Prensa Hidráulica da EMIC.	45
Figura 29 - Extensômetros elétricos para medição de deformação.	45

Figura 30 - Compressômetro para medição de deformação.	46
Figura 31 - Equipamento de módulo de elasticidade por frequência ressonante.	46
Figura 32 - Equipamento de Resistividade Elétrica Volumétrica.	47
Figura 33 - Aparelho de Resistividade Elétrica Superficial.	48
Figura 34 – a) DRX do fíler calcário; b) DRX da lama vermelha; c) DRX da cinza de casca de arroz; d) DRX do metacaulim.	53
Figura 35 - Curvas de TGA das pastas de referência e com 10% de substituição por fíler calcário, lama vermelha, cinza de casca de arroz e metacaulim.	57
Figura 36 - Curvas da primeira derivada da termogravimetria (DTG) das pastas de referência e com 10% de substituição do cimento por fíler calcário, lama vermelha, cinza de casca de arroz e metacaulim.	59
Figura 37 - Teor de cal fixada pelas pastas de cimento por Termogravimetria.	61
Figura 38 - Teor de cal fixada (%) nas pastas de cimento no ensaio de Chapelle Modificado e na análise termogravimétrica.	63
Figura 39 – Resistividade elétrica volumétrica em corpos de prova 100x200mm e 150x300mm.	66
Figura 40 – Resistividade elétrica superficial em corpos de prova 100x200mm e 150x300mm.	67
Figura 41 – Absorção por imersão em água.	68
Figura 42 – Índices de vazios do concreto.	69
Figura 43 – Resistência à compressão.	71
Figura 44 – Módulo de elasticidade por frequência ressonante.	72
Figura 45 – Módulo de elasticidade estático.	74
Figura 46 – Correlação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico.	75
Figura 47 - Resistividade elétrica volumétrica.	77
Figura 48 – Resistividade elétrica superficial.	77
Figura 49 – Comparação das resistividades elétricas.	79
Figura 50 – Resistividade elétrica volumétrica e a absorção por imersão.	82
Figura 51 - Resistividade elétrica volumétrica e índices de vazios.	82
Figura 52 - Resistividade elétrica superficial e a absorção por imersão.	83
Figura 53 - Resistividade elétrica superficial e índices de vazios.	83
Figura 54 - Resistividade elétrica volumétrica e resistência à compressão.	85
Figura 55 – Resistividade elétrica superficial e resistência à compressão.	85
Figura 56 - Resistividade elétrica volumétrica e módulo de elasticidade estático.	86

Figura 57 - Resistividade elétrica superficial e módulo de elasticidade estático.	87
Figura 58 - Resistividade elétrica volumétrica e módulo de elasticidade dinâmico. ...	87
Figura 59 - Resistividade elétrica superficial e módulo de elasticidade dinâmico.	88
Figura 60 – Correlação entre as resistividades elétricas volumétrica e superficial referente ao concreto de referência nas idades de 3, 7, 14, 21, 28, 56, 70, 100, 120, 150 e 180.	89
Figura 61 - Correlação entre as resistividades elétricas volumétrica e superficial referente aos concretos com fíleres nas idades de 3, 7, 14, 21, 28, 56, 70, 100, 120, 150 e 180.	90
Figura 62 - Correlação entre as resistividades elétricas volumétrica e superficial referente aos concretos com pozolanas nas idades de 3, 7, 14, 21, 28, 56, 70, 100, 120, 150 e 180.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exigência química para materiais pozolânicos.....	13
Tabela 2 - Risco de ocorrência de corrosão em função da resistividade elétrica.....	23
Tabela 3 - Caracterização do Cimento CPV da Cimento LIZ.	29
Tabela 4 – Caracterização da Areia Média.	31
Tabela 5 - Caracterização do Pó de Pedra.	32
Tabela 6 – Caracterização da Brita 1.	33
Tabela 7 - Classes de consistência.....	34
Tabela 8 - Dosagens e características dos concretos confeccionados.	42
Tabela 9 - Interpretação dos coeficientes de variação.	43
Tabela 10 - Interpretação dos valores do coeficiente de correlação R.....	43
Tabela 11 – Risco de corrosão em função da resistividade elétrica superficial	49
Tabela 12 - Diâmetro médio do cimento e das adições minerais de efeito filler.	50
Tabela 13 - Área superficial específica das adições minerais estudadas.	51
Tabela 14 - Composições químicas das adições minerais.....	52
Tabela 15 – Índice de pozolanicidade em teor de consumo de Ca(OH)_2 ($I_{\text{Ca(OH)}_2}$), expresso em mg/g.....	55
Tabela 16 - Índice de pozolanicidade em teor de cal fixada (I_{CaO}), expresso em %..	57
Tabela 17 - Teor de Ca(OH)_2 medido por Termogravimetria.	60
Tabela 18 - Teor de cal fixada (%) medido por Termogravimetria.	61
Tabela 19 - Teor de cal fixada (%) nas pastas de cimento no ensaio de Chapelle Modificado e na análise termogravimétrica.	63
Tabela 20 – Resultado de massa específica das adições minerais estudadas.....	64
Tabela 21 – Consistência dos concretos com e sem adições minerais.	65

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
ASTM	American Society for Testing and Materials
a/agl	Água/ aglomerante
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
BET	Brunauer, Emmett e Teller
CP V	Cimento Portland tipo V
CHpa	Teor de Ca(OH)_2 em pastas de cimento com adições minerais
CHr	Teor de Ca(OH)_2 em pastas de cimento referência
C	Teor de substituição do cimento pelas adições minerais
C-S-H	Silicato de Cálcio hidratado
DRX	Difração de Raio X
Ca(OH)_2	Hidróxido de Cálcio
CO_2	Dióxido de Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
SiO_2	Sílica ou quartzo
CaCO_3	Carbonado de cálcio ou calcita
$I_{\text{Ca(OH)}_2}$	Teor de hidróxido de cálcio fixada
I_{CaO}	Teor de cal fixada
TGA	Termogravimetria
LOI	Perda por ignição, <i>Loss on Ignition</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Adições Minerais	4
2.1.1 Fíler Calcário	6
2.1.2 Lama Vermelha	7
2.1.3 Cinza de Casca de Arroz.....	8
2.1.4 Metacaulim	10
2.2 Efeito Fíler	11
2.3 Atividade pozolânica	12
2.3.1 Método do Chapelle Modificado	14
2.3.2 Termogravimetria	16
2.4 Corrosão do aço	20
2.5 Resistividade Elétrica	21
2.6 Métodos de medição da resistividade elétrica	24
2.6.1 Resistividade elétrica volumétrica	25
2.6.2 Resistividade elétrica superficial	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Materiais	29
3.2 Métodos	35
3.2.1 Caracterização das adições.	35
3.2.2 Confeção dos corpos.....	41
3.2.3 Critérios para a avaliação estatística e para as correlações das propriedades dos concretos estudados	42
3.2.4 Dimensões dos corpos de prova de concreto	44
3.2.5 Caracterização do concreto.....	44
3.2.6 Resistividade elétrica do concreto	47
3.2.7 Resistividade elétrica e o risco de corrosão	48
3.2.8 Correlação entre as resistividades e as propriedades físicas e mecânicas dos concretos.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 Caracterização das adições minerais	50

4.1.1 Distribuição granulométrica e superfície específica	50
4.1.2 Composição química	51
4.1.3 Difração de Raio X	53
4.1.4 Chapelle Modificado	55
4.1.5 Termogravimetria	57
4.1.6 Comparação entre resultados do Chapelle Modificado e Termogravimetria (TGA) em pasta de cimento	62
4.1.7 Massa específica.....	64
4.2 Caracterização dos concretos	64
4.2.1 Conformidade do traço	64
4.2.2 Influência das dimensões dos corpos de prova.....	65
4.2.3 Influência do material nas propriedades do concreto	68
a) Absorção por imersão e índices de vazios.....	68
b) Resistência à compressão	70
c) Módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada e módulo de elasticidade estático	72
d) Resistividade elétrica volumétrica e superficial	76
4.2.4 Correlações entre as resistividades e as demais propriedades do concreto....	81
a) Resistividades elétricas e índices de vazios / absorção por imersão	81
b) Resistividades elétricas e resistência à compressão	84
c) Resistividades elétricas e módulos de elasticidades.....	86
d) Resistividade elétrica volumétrica e superficial	89
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material de construção sujeito a ações do tempo, da temperatura, do ambiente e de agentes agressivos, que promovem a sua degradação e, conseqüentemente, a diminuição da sua vida útil. Por outro lado, a durabilidade dos compósitos cimentícios também está relacionada com a agressividade do meio, as características dos materiais empregados na sua composição, as condições de execução do concreto e a sua microestrutura e porosidade. Segundo Shi (2019), um dos fatores mais prejudiciais à vida útil do concreto, decorrente de sua interação com o meio externo, é a corrosão da armadura, considerada como a principal causa da deterioração das construções, especialmente em relação à capacidade de sustentação da estrutura e à expansão de fissuração do concreto.

As despesas e os custos com reparo e manutenção das estruturas de concreto armado, em relação à corrosão, nos últimos anos, são cada vez maiores, segundo Salomão (2019). O concreto, em processo corrosivo é responsável por valores elevados de reabilitação e gastos consideráveis de recursos, sendo que muitas das obras não apresentam soluções simples, eficazes e acessíveis de serem executadas (ZHU *et al*, 2017).

A corrosão das armaduras está associada ao fato de que os materiais cimentícios, de modo geral, armazenam carga elétrica, que induzem efeitos de polarização no concreto na presença de um meio aquoso (LAYSSI, 2015). A polarização dos compósitos cimentícios acontecem quando há uma diferença de potencial (corrente elétrica) no material metálico, transferência de elétrons entre os eletrodos (ânodo e cátodo) e movimentação de íons ferro na solução eletrolítica (água) (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).

Dessa forma, a corrosão das armaduras no concreto é um fenômeno de natureza eletroquímica, implicando na formação e movimentação de partículas com carga elétrica e na presença de um eletrólito condutor (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013; SOARES, 2015 e BABAEI, 2015). Neste caso, a corrosão está associada a reações de oxidação (ânodo), redução (cátodo) e circulação de íons no eletrólito (ROCHA, 2014 e ELIA, 2014). A característica que representa a dificuldade dos elétrons de se movimentarem no material é conhecida como resistividade elétrica ou resistência específica. Essa propriedade é definida como a resistência da corrente elétrica de passar através de um material, sendo o inversamente proporcional a condutividade

elétrica (BRAUN, 2015).

De acordo com Silva (2016) a importância da resistividade elétrica, no caso do concreto, reside no fato de que determinado esse parâmetro e conhecido o acesso ao oxigênio se pode avaliar o processo eletroquímico responsável pelo fenômeno da corrosão da armadura imersa no concreto. Dessa forma, considera-se existir uma relação entre a resistividade do concreto e a velocidade de corrosão do aço após a sua despassivação (LENCIONI & LIMA, 2010).

A resistividade elétrica do concreto pode ser avaliada por duas diferentes técnicas de medição, consideradas não destrutivas. A resistividade elétrica superficial consiste na medição pelo método dos quatro eletrodos ou método Wenner, no qual os eletrodos são colocados em contato com a parte mais externa do material. Comumente é feita *in loco* na estrutura, na parte do concreto pertencente ao revestimento informando as propriedades da superfície (MOTA, 2016). Também pode ser realizada em corpos de prova desde que se mantenha a distância adequada entre os eletrodos.

A resistividade elétrica volumétrica consiste na medição pelo método dos dois eletrodos, que são colocados em contato com duas extremidades opostas do material. É empregada para a medição em corpos de prova tanto para avaliar a qualidade do concreto, no que se refere ao ambiente propício para a corrosão das armaduras, quanto para avaliar porções internas da estrutura, na qual a umidade tende a permanecer mais estável (SILVA, 2016). Os métodos apresentam resultados referentes às propriedades do concreto, porém cada um deles fornece informações sobre pontos diferentes do elemento estrutural, basta identificar qual análise será mais relevante na pesquisa (GHOSH, 2015; HORNBOSTEL, 2016).

A resistividade elétrica pode promover o mapeamento dos pontos mais porosos e permeáveis da estrutura e com isso, mais propícios a ocorrência de corrosões e danos futuros, ou seja, esse parâmetro é afetado diretamente pela microestrutura e pela porosidade dos compósitos cimentícios. Os finos provindos de resíduos ou subprodutos industriais podem vir a ser usados em prol da sustentabilidade, minimizando consideravelmente o consumo de cimento associado à possibilidade de manter, ou melhorar, as propriedades mecânicas ou de durabilidade (GHOSH, 2015).

Segundo Raisdorfer (2015), as adições sejam pozolânicas ou de efeito fíler, interferem nessa microestrutura dos compósitos cimentícios. No caso da pozolânica, em função da reação com o hidróxido de cálcio, (principal responsável pela alta

alcalinidade dos poros dos compósitos cimentícios), os concretos tendem a apresentar menor reserva alcalina (SIDDIQUE & KHAN, 2011). O efeito fíler, pela compactidade e conectividade entre os poros, gera concretos com porosidade reduzida e menor quantidade de vazios (RAISDORFER, 2015).

São poucos os trabalhos que analisam comparativamente a resistividade elétrica volumétrica e superficial em corpos de prova com adições minerais pozolânicas e de efeito fíler (HOOTON & BICKLEY, 2014; HU, 2017). Tal análise se torna interessante na medida que o equipamento para medição superficial, muito utilizado nas estruturas, poderia ser utilizado para qualificar o concreto. Neste contexto, este trabalho se propõe a analisar a influência das dimensões dos corpos de prova e das adições minerais de diferentes naturezas na resistividade elétrica volumétrica e superficial do concreto.

1.1. Objetivos

O objetivo geral do trabalho é avaliar a influência das adições minerais na resistividade elétrica volumétrica e superficial do concreto.

Com base no objetivo geral, os seguintes objetivos específicos deverão ser atingidos:

- Avaliar a influência das dimensões dos corpos de prova cilíndricos nas medidas de resistividade elétrica volumétrica do concreto;
- Comprovar a relação entre a altura do corpo de prova e o espaçamento dos quatro eletrodos na medida de resistividade elétrica superficial, empregando equipamento disponível no mercado;
- Avaliar a influência dos efeitos pozolânico e fíler nas resistividades elétricas volumétrica e superficial de concretos com diferentes adições minerais;
- Correlacionar propriedades mecânicas e físicas de concretos confeccionados com adições pozolânicas e fíleres com suas respectivas resistividades elétricas volumétrica e superficial.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

São abordados os seguintes temas relativos ao concreto com adições minerais: considerações gerais, adições minerais, corrosão do aço, atividade pozolânicas, efeito fíler e resistividade elétrica volumétrica e superficial.

2.1 Adições Minerais

As adições minerais são materiais acrescentados às matrizes cimentícias do concreto, com o objetivo de melhorar o desempenho do compósito cimentício, aprimorar algumas das suas propriedades específicas e beneficiar o concreto para que seja aplicado para determinada finalidade. De acordo com Neville (2015), as adições pozolânicas têm as características de promover o refinamento e o empacotamento dos poros e melhorar a resistência mecânica do concreto.

As adições minerais estão presentes nos cimentos comercializados, uma vez que são acrescentadas durante a fabricação do cimento. Por outro lado, as adições minerais podem ser incorporadas durante execução do concreto e causar alterações nas propriedades químicas e físicas dos compósitos cimentícios (Figura 1).

Os tipos de adições minerais, seja inertes ou pozolânicas, podem ser utilizadas nos compósitos cimentícios. Mas, cada tipo de adição tem efeitos diferentes nas propriedades do concreto fresco e endurecido e na durabilidade, com suas vantagens e desvantagens. Suas vantagens podem ser exploradas através da combinação de várias adições minerais, incrementando assim o nível de substituição de cimento (LE & LUDWIG, 2016).

Figura 1 - Adições minerais incorporadas ao concreto.

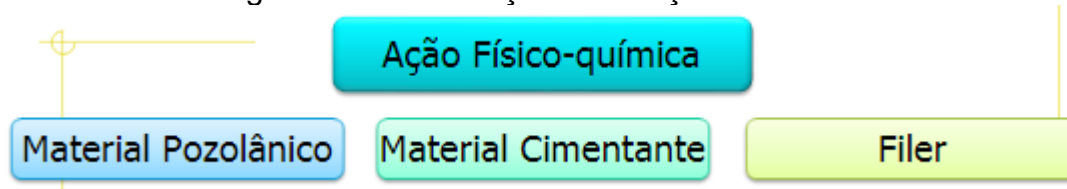


Fonte: Reis, 2016

Alguns autores classificam as adições minerais com base na sua origem (NEPOMUCENO, 2012) como pozolanas, cimentantes e inertes (fíler), sendo que as adições pozolanas podem ser naturais, provenientes de rochas ou minerais, ou artificiais, representada por resíduos de produção industrial (Figura 2). Já Mehta e Monteiro (2014) classificam esses materiais de acordo com a sua capacidade de ser

utilizado como adições minerais, sendo estes materiais naturais ou materiais secundários, obtidos em processos indústrias (subprodutos).

Figura 2 - Classificação das adições minerais.



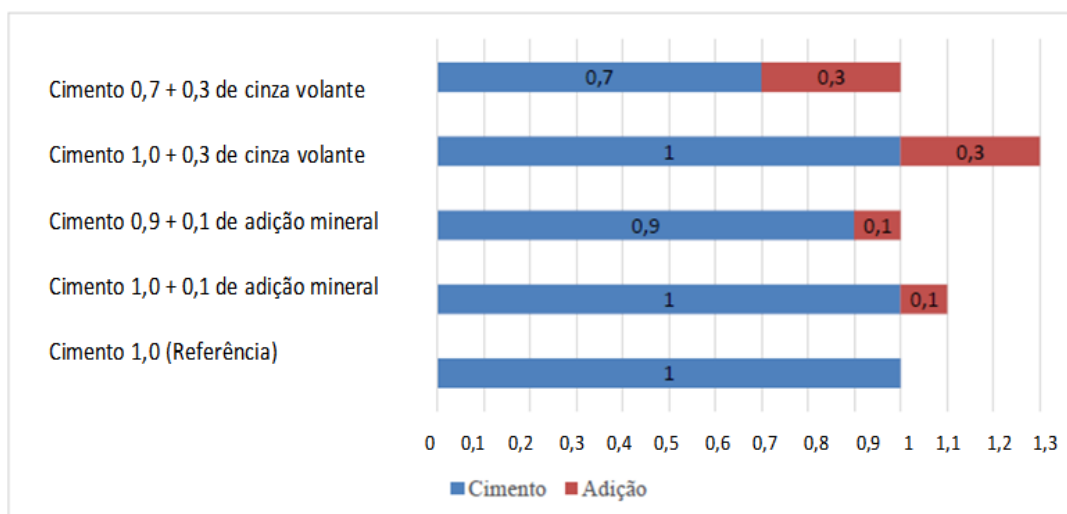
Fonte: Barco, 2014

As adições minerais que serão analisadas durante a pesquisa de dissertação são as pozolanas, que caracterizam-se por serem materiais silicosos ou silicosos-aluminosos. Segundo Mehta e Monteiro (2014) as pozolanas representam uma solução para melhorar a distribuição do tamanho dos poros e com isso reduzir a porosidade dos compósitos cimentícios.

Quando adicionadas ao concreto as adições minerais atuam, principalmente na interface pasta e agregado, na interligação dos poros e na zona de transição, reduzindo a ação de agentes químicos e físicos e influenciando de maneira relevante na microestrutura da matriz cimentícia. De acordo com Raisdorfer (2015), as adições minerais do tipo fíler são finas partículas, que utilizadas em quantidade ideais, colmatam as estruturas porosas. Essa propriedade das adições proporciona uma redução na quantidade e tamanho dos poros e diminui os vazios dos compósitos cimentícios.

Fonseca (2016) realizou ensaios de durabilidade do concreto em corpos de prova com adições minerais de fíler calcário, de cinza de casca de arroz e de metacaulim. Os corpos de prova tinham dimensões e relações a/c diferentes entre si. Raisdorfer (2015) avaliou compósitos cimentícios com a adição de metacaulim, sílica ativa, sílica da casca de arroz, cinza volante e fíler quartzoso. Nas duas pesquisas os autores chegaram à conclusão de que as adições minerais provocam alterações significativas nos resultados de durabilidade do concreto, sendo que cada uma delas age de forma diferente na microestrutura do compósito cimentício (Figura 3 e 4).

Figura 3 - Adições e substituições realizadas por Raisdorfer.



Fonte: Raisdorfer, 2015

Figura 4 – Dosagens de concreto e adições utilizadas por Fonseca.

Traços	Consumos (Kg/m³)							Parâmetros				
	CIM	MK	PCA	F	CalH	AM	AG	Agua/finos (Kg/m)	Aditivo (%)	Pasta (litros/m³)	Finos (Kg/m³)	Agua/finos (lit/m³)
REFCAA	451,10	0,00	0,00	0,00	0,00	739,80	974,40	0,44	0,52%	346,40	451,10	1,30
PCA30MK20F10	171,10	85,50	128,30	42,80	0,00	701,40	923,80	0,50	1,70%	380,40	427,70	1,30
PCA30MK20F10 + CalH	167,70	83,90	125,80	41,90	21,00	687,60	905,70	0,50	1,70%	392,50	440,20	1,30
PCA30F30	171,40	0,00	128,50	128,50	0,00	702,70	925,50	0,50	1,20%	379,20	428,50	1,30
PCA30F30 + CalH	168,00	0,00	126,00	126,00	21,00	688,90	907,30	0,50	1,20%	391,40	441,10	1,30
MK30F30	173,30	129,90	0,00	129,90	0,00	710,40	935,60	0,50	2,16%	372,50	433,10	1,40
MK30F30 + CalH	169,80	127,40	0,00	127,40	21,20	696,30	917,00	0,50	2,16%	384,90	445,80	1,40

** CIM - Cimento; MK - Metacaulim; PCA - Pozolana da casca de arroz; F - Fíler Calcário; CalH - Cal hidratada; AM - Agregado miúdo; AG - Agregado graúdo

Fonte: Adaptado de Fonseca (2016)

2.1.1 Fíler Calcário

A utilização do fíler calcário em compósitos cimentícios vem sendo estudado devido ao melhoramento da matriz cimentícia, em função de preenchimento dos poros da microestrutura, proporcionando melhorias das propriedades e redução do consumo de cimento. Esse material consiste em calcário pulverizado cujo principal componente é o carbonato de cálcio (CaCO_3) ou calcita, é obtido em pedreiras de rocha calcária e produzido como subproduto dos trituradores de pedra (MOHAMMED *et al.*, 2014a; SILVA & BRITO, 2015) (Figura 5).

Figura 5 - Fíler Calcário.



A utilização como substituto do cimento em percentuais de até 30% proporciona maior capacidade de preenchimento dos concretos, observada por meio do aumento do diâmetro de espalhamento no ensaio de *slump flow*. Isso pode ser atribuído a menor área superficial específica das partículas de fíler em comparação com as de cimento, o que reduz a demanda de água da mistura (SILVA & BRITO, 2015). Entretanto, isso não ocorre sempre, pois em alguns casos as partículas de fíler podem apresentar área superficial específica maior que o cimento

O fíler calcário atua como uma carga inerte, ou seja, apenas efeito de enchimento e ao substituir o cimento ele ocasiona diminuição da resistência à compressão, portanto não tem atividade pozolânica (SUA-IAM *et al.*, 2016). Em substituições de 10 a 30% do cimento em composições de compósitos cimentícios pode-se ter redução de resistência de 8 a 20%, aproximadamente (SUA-IAM *et al.*, 2016).

O aumento do percentual de substituição de fíler calcário por cimento, entre 10 e 30%, causa, aos 28 dias, uma pequena redução na velocidade do pulso ultrassônico (entre 3 e 9%, aproximadamente) e uma significativa redução nos módulos de elasticidade estático (entre 7 e 16%, aproximadamente) e dinâmico (entre 4 e 12%, aproximadamente) (SUA-IAM *et al.*, 2016).

A melhoria na resistência à compressão essencialmente surge a partir de um "efeito de enchimento ou efeito fíler", pelo qual, o material proporciona um aumento da compactidade, melhoria mecânica da microestrutura da matriz e da zona de transição, que conduzem a um aumento da resistência à compressão (SUA-IAM *et al.*, 2016).

2.1.2 Lama Vermelha

A lama vermelha é a denominação genérica para o resíduo insolúvel gerado durante a etapa de clarificação do processo Bayer presente na bauxita, sendo

normalmente disposta em lagoas projetadas especialmente para este fim (Figura 6) (HYDRO, 2016). A composição química da lama vermelha varia extensamente e depende da natureza da bauxita e da técnica empregada no processo Bayer. Normalmente, a lama vermelha retém todo o ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, além do alumínio que não foi extraído durante o refino (HYDRO, 2016).

Figura 6 - Lama Vermelha.



Segundo World Aluminum ORG (2013), cada tonelada de alumina é responsável por gerar em torno de 0,2 a 2,5 toneladas de lama vermelha, dependendo da qualidade do minério. Devido ao grande volume de lama vermelha gerada na produção de alumínio, torne-se necessário buscar alternativas para o reaproveitamento desse material. Na agricultura, a lama vermelha está em processo de testes como uma alternativa para a correção de pH em solos ácidos ou ainda como um aditivo para enriquecê-los com ferro (SHINZATO, 2015)

2.1.3 Cinza de Casca de Arroz

Na operação de beneficiamento do arroz, são produzidas as carapaças (cascas de arroz ou palha de arroz). Cada tonelada produz cerca de 200Kg de cascas que, na combustão, produz aproximadamente 40Kg de cinza (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Normalmente, esse resíduo é descartado diretamente no meio ambiente, despejado ou queimado em pilhas sobre os campos abertos, resultando em grave poluição ambiental (LE & LUDWIG, 2016) (Figura 7).

Figura 7 - Cinza de Casca de Arroz.



Se produzida por combustão controlada em temperaturas de 600 a 800°C, a cinza da casca do arroz pode ser altamente pozolânica, nesse caso a sílica se mantém na forma não-cristalina em uma microestrutura celular com área superficial elevada (LE & LUDWIG, 2016). Além disso, é utilizada em compostos cimentícios para reduzir a porosidade e a largura da zona de transição interfacial pasta-agregado, por ser composta de aproximadamente 90% de sílica e quando finamente moída possui alta reatividade (KANNAN & GANESAN, 2014; CHOPRA *et al.*, 2015).

A utilização da cinza da casca do arroz aumenta a capacidade de retenção de água e a viscosidade da mistura do concreto, que são necessárias para evitar a segregação, devido à elevada área superficial específica. Em contrapartida, isso pode causar problemas de perda da capacidade de enchimento e habilidade passante do concreto, mas isso pode ser superado utilizando um aditivo superplastificante eficiente (LE & LUDWIG, 2016).

Segundo Le e Ludwig (2016), a cinza da casca do arroz é um material com uma elevada área superficial específica e com uma demanda de água mais elevada que o cimento. Esse comportamento, ocasionado pela utilização da cinza da casca do arroz, indica a sua capacidade de tornar o concreto mais viscoso.

Isso se justifica pelo fato do efeito microfíler e atividade pozolânica melhorarem a microestrutura porosa da matriz cimentícia e da zona de transição. A cinza da casca do arroz possibilita isso devido a sua elevada finura, maior que a do cimento, verificada pela área superficial BLAINE ou BET (CHOPRA *et al.*, 2015). Essa elevada finura possibilita preencher os vazios entre as partículas de cimento, melhorando o efeito fíler, além de tornar a cinza mais reativa e capaz de produzir com mais eficiência o C-S-H adicional (LE & LUDWIG, 2016). As reações pozolânicas produzem esse C-S-H adicional que reduzem a porosidade do concreto, refinam os poros da matriz e aumentam sua resistência mecânica (CHOPRA *et al.*, 2015).

2.1.4 Metacaulim

O metacaulim é uma adição mineral produzida a partir da argila caulínica calcinada entre as temperaturas de 650-800°C. Essa calcinação proporciona um aumento de sua atividade pozolânica, e sua principal característica é a elevada reatividade com hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , e a sua capacidade de acelerar a hidratação do cimento (MEHTA & MONTEIRO, 2014; BADOGIANNIS *et al.*, 2015; KAVITHA *et al.*, 2015).

O metacaulim, obtido da calcinação do caulim, mineral rico em caulinita (BADOGIANNIS *et al.*, 2015), é um dos precursores mais utilizados no mundo (Figura 8). No Brasil encontramos grandes reservas de caulim na região amazônica e sua composição química é diversificada em função da origem. A sua produção tem início com a localização de depósitos de argilas caulínicas e lavagem do material retirado nas minas. O caulim resultante desse processo é coletado e bombeado para a usina de beneficiamento (BADOGIANNIS *et al.*, 2015).

Figura 8 - Metacaulim.



Devido à elevada concentração de sílica e alumina, se espera que a ação pozolânica do metacaulim seja mais significativa em comparação com outras adições minerais, como a sílica ativa e a cinza volante (KAVITHA *et al.*, 2015). Essa pozolana natural é um material alumino-silicato, composta basicamente por SiO_2 e Al_2O_3 , ativado termicamente e sem produção de CO_2 (KAVITHA *et al.*, 2015).

Comparado ao processamento do cimento Portland, ele envolve temperaturas mais baixas, em vantagem o consumo de energia e a emissão de gases tóxicos são menores, o que proporciona menor custo de produção. Mas, devido a sua baixa demanda, e a questões de mercado, o seu preço é elevado. Desta forma, a principal motivação da utilização do metacaulim em compósitos cimentícios está mais relacionada aos benefícios ambientais e tecnológicos, do que econômicos (SFIKAS *et*

al., 2014). Isso ocorre devido a dois fatores, às maiores temperaturas exigidas no forno de calcinação do clínquer e as emissões de CO₂ liberadas no processo de produção do cimento, enquanto no metacaulim o vapor liberado é H₂O. (SFIKAS *et al.*, 2014; BADOGIANNIS *et al.*, 2015)

A utilização de metacaulim como substituto parcial do cimento em concretos causa diminuição da capacidade de preenchimento. Esse fato pode ser observado com a diminuição do diâmetro de espalhamento no ensaio de *slump flow test* na medida em que o teor de substituição de cimento por metacaulim é aumentado e a relação água/finos e o teor de aditivo superplastificante são mantidos constantes (SFIKAS *et al.*, 2014). Isso pode ser percebido, também, com aumento da demanda de aditivo superplastificante em misturas com maior percentual de metacaulim para manter um mesmo padrão de espalhamento (KAVITHA *et al.*, 2015; SFIKAS *et al.*, 2014).

Segundo Sfikas (2014), essa substituição pode proporcionar, em teores de até 30%, resistências à compressão maiores que as composições de referência (apenas com cimento). Entretanto, foi observado que as resistências evoluem com o aumento do teor de substituição até o limite de 20%, e, decrescem com o aumento do teor de substituição de cimento por metacaulim entre 20% e 30%.

Outros resultados experimentais mostram que o uso de metacaulim aumenta drasticamente a resistividade elétrica do concreto convencional (BADOGIANNIS *et al.*, 2015). Em concretos com substituição de 15% de cimento por metacaulim a resistividade elétrica é aproximadamente 2 a 4 vezes superior a um traço de referência sem adição mineral (BADOGIANNIS *et al.*, 2015).

2.2 Efeito Fíler

As adições minerais utilizadas na execução do concreto podem propiciar vários efeitos físicos para a composição, possibilitando uma melhor qualidade para o material e beneficiando a sua durabilidade (SANTOS, 2019). A seguir alguns dos efeitos físicos:

- Efeito Microfíler: Aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições, cujo diâmetro médio deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento;

- Refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento: causado pelas pequenas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação. Dessa forma, o crescimento dos cristais ocorrerá não somente a partir da superfície dos grãos de cimento, mas também nos poros ocupados pela adição e pela água. Esses cristais influenciam a cinética da hidratação (acelera as reações) e os tipos de produtos de hidratação formados (a adição mineral restringe os espaços nos quais os produtos de hidratação podem crescer, gerando um grande número de pequenos cristais ao invés de poucos cristais de grande tamanho);
- Alteração da microestrutura da zona de transição: a colocação de adições finamente divididas no concreto interfere na movimentação das partículas de água em relação aos sólidos da mistura, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que fica retido sob os agregados. Além de contribuir para diminuir a espessura da zona de transição pela redução da exsudação, a adição pode preencher os vazios deixados pelas partículas de cimento próximas à superfície do agregado (efeito microfíler), interferir no crescimento dos cristais, restringindo seus tamanhos e reduzindo o grau de orientação do hidróxido de cálcio junto ao agregado (partículas de adição agindo como pontos de nucleação), e reduzir a concentração de Ca(OH)_2 (devido às reações químicas pozolânicas). O somatório desses efeitos repercute numa melhora significativa da zona de transição, refletindo num aumento de desempenho do concreto sob o ponto de vista tanto mecânico quanto de durabilidade.

2.3 Atividade pozolânica

A principal característica presente nas adições minerais é a sua atividade pozolânica e como ela interfere nas reações de hidratação e na microestrutura da pasta de cimento. As adições pozolânicas, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014; versão corrigida de 2015) e NBR 16697 (ABNT, 2018), são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que sozinhos não apresentam características ligantes, mas quando divididos ou associados ao hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e na presença de água, originam compostos cimentantes.

As pozolanas podem ser classificadas em três tipos, conforme a origem dos materiais: classe N enquadra as pozolanas oriundas de materiais vulcânicos e argilas

calcinadas, podem ser naturais ou artificiais; classe C são as cinzas volantes que são provenientes da queima do carvão e a classe E são qualquer outra pozolana que se difere das anteriores, como cinza de resíduos vegetais (NBR 12653 (ABNT, 2014; versão corrigida de 2015)). Segundo a norma ASTM C-618:2015, que estabelece os parâmetros mínimos para utilização das cinzas como pozolana no concreto (Tabela 1), as cinzas de resíduos vegetais podem ser também enquadradas na classe C.

Tabela 1 - Exigência química para materiais pozolânicos.

Propriedades		Classes de material		
		N	C	E
Dióxido de silício (SiO ₂) + óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) + óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	mín, %	70	70	50
Trióxido de enxofre (SO ₃)	máx, %	4	5	5
Teor de umidade	máx, %	3	3	3
Perda de fogo	máx, %	10	6	6
Álcalis disponível em Na ₂ O	máx, %	1,5	1,5	1,5

Fonte: Adaptado da NBR 12653 (ABNT, 2014; versão corrigida de 2015)

De acordo com Sata (2012), o uso de materiais pozolânicos na matriz cimentícia proporciona um desenvolvimento e melhorias da resistência mecânica do compósito. Isso pode ser atribuído tanto aos fatores químicos como a hidratação do cimento e a atividade pozolânica do material, quanto aos fatores físicos como o empacotamento e o tamanho das partículas.

Os materiais pozolânicos têm a propriedade de reagirem com o hidróxido de cálcio em solução aquosa e com isso contribuir para a durabilidade do compósito cimentício, uma vez que o hidróxido de cálcio pouco colabora para a resistência mecânica e é mais solúvel que o C-S-H (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

As reações pozolânicas influenciam na distribuição do tamanho dos poros, no maior preenchimento dos espaços capilares, na menor permeabilidade e na formação de compósitos com maior resistência mecânica. Porém, de acordo com Isaías (2010), algumas adições de cinzas, como 20 a 25%, podem tornar a matriz cimentícia mais porosa, e por consequência, facilitar a difusão do CO₂ na estrutura.

As atividades pozolânicas no concreto começam a acontecer em qualquer momento entre sete e quinze dias da execução da mistura, conforme a reatividade do material com o Ca(OH)₂. Segundo Quarcioni *et al.* (2015), o material pozolânico não consegue reagir imediatamente com o cimento Portland sob temperatura e pressão

ambiente. Porém, antes das reações pozolânicas acontecerem o material já é responsável por proporcionar benefícios ao concreto, como a diminuição da liberação de água livre pela hidratação e redução da susceptibilidade do concreto à lixiviação (QUARCIONI *et al.*, 2015).

Diversos são os fatores que podem interferir nas reações pozolânicas do cimento e na velocidade em que elas ocorrem, como fenômenos relacionados à superfície do material, área superficial específica e a reatividade da própria pozolana. Compreender como cada material pozolânico reage é de extrema importância para determinar a idade em que o consumo de hidróxido de cálcio será maior, a duração da reação e a contribuição para as propriedades mecânicas dos materiais cimentícios (KEULEN, 2018).

As atividades pozolânicas em compósitos cimentícios podem ser determinadas por meio de diferentes métodos. De acordo com Sales (2014) entre os ensaios, pode-se citar o teste de Fratini, o método do Chapelle Modificado, a termogravimetria e a condutividade elétrica pelo método Luxan, que monitoram a quantidade de hidróxido de cálcio presente na solução, e os testes de resistência mecânica, IAP (Índice de Atividade Pozolânica) e Difração de Raio X, que determinam a pozolanidade por meio de uma propriedade física da amostra. Nessa pesquisa serão feitos os ensaios de Chapelle Modificado e da termogravimetria, que serão mais bem descritos nos parágrafos seguintes.

2.3.1 Método do Chapelle Modificado

O ensaio do Método do Chapelle Modificado é um ensaio que apresenta os resultados de forma rápida e segura. O método consiste em aquecer em banho maria com agitação mecânica, uma solução de 2g de CaO com 1g da pozolana e 250ml de água, por 16 horas (Figura 9a). Após o resfriamento é adicionado na mistura uma solução de sacarose e o teor de CaO livre é medido por meio de titulação com HCl 0,1mol/l e fenolftaleína (FLEURY, 2016). A titulação também é feita em uma solução referência sem a utilização de uma pozolana (Figura 9b). No método de Chapelle o índice de pozolanidade é medido pelo teor de óxido de cálcio fixado na amostra.

Figura 9 - a) Amostras sendo colocadas em banho maria; b) Titulação de amostras.



(a)

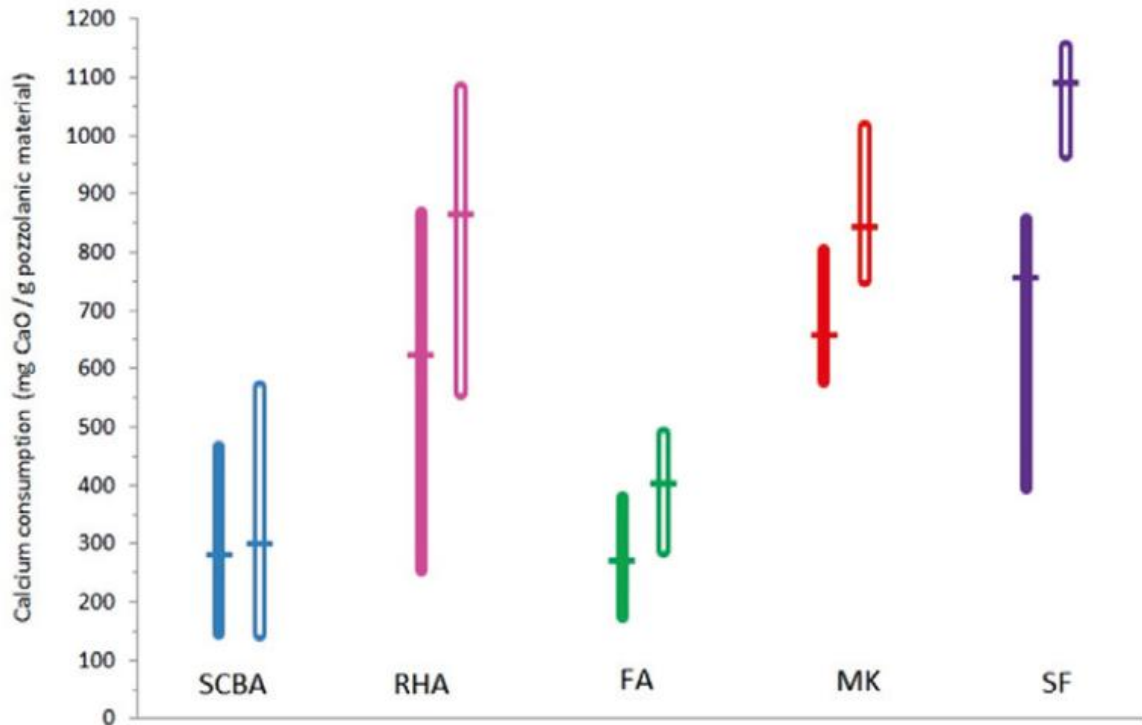
(b)

Fonte: Fleury, 2016

O ensaio de Chapelle é regido pela NBR 15895 (ABNT, 2010a), que estabelece e identifica os principais passos para a medição do teor de hidróxido de cálcio fixado em solução, no material. O resultado do ensaio é expresso em miligrama de óxido de cálcio por grama de material. De acordo com Christófoli (2010) e Raverdy *et al.* (1980) o material é considerado pozolânico quando apresenta um consumo de óxido de cálcio superior ao limite mínimo de 330 mg CaO/g da amostra. Quanto maior o consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, maior a pozolanicidade do material.

Deste modo, o ensaio de Chapelle Modificado é fundamentado na capacidade da solução em fixar o óxido de cálcio em condições pré-determinadas em um tempo estabelecido. Conforme estudos realizados por Quarcioni *et al.* (2015) e os resultados apresentado por ele na Figura 10, é possível observar que a sílica ativa (SF), a cinza de casca de arroz (RHA) e o metacaulim (MK) são os materiais mais pozolânicos analisados, enquanto que a cinza volante (FA) e a cinza do bagaço de cana (SCBA) apresentam baixas pozolanicidades, quase inferior ao mínimo estipulado (330 mg CaO/g da amostra).

Figura 10 - Consumo de cálcio pelas adições minerais.



Fonte: Quarcioni *et al.*, 2015

O ensaio de Chapelle Modificado permite identificar o consumo de óxido de cálcio e a sua relação com as propriedades mecânicas dos concretos, ao substituir cimento por materiais pozzolânicos (QUARCIONI *et al.*, 2015).

2.3.2 Termogravimetria

O ensaio de termogravimetria tem sido utilizado cada vez mais para a determinação da atividade pozzolânica dos materiais. A avaliação das regiões de variação de massa e energia em função da temperatura possibilita identificar as reações de desidratação do material (TIRONI, 2014). Segundo Weerd (2011) a perda de massa na temperatura em que a portlandita se decompõe permite analisar a ocorrência da reação pozzolânica.

Conforme observado por Tironi (2014), o ensaio da termogravimetria visa medir a variação da massa em função da temperatura, enquanto a amostra é submetida a uma temperatura controlada. Essa técnica é considerada viável para a medição da atividade pozzolânica das adições minerais, por ser um método menos demorado em relação ao processo químico e por ser um importante mecanismo para determinação do tipo e da quantidade de fases hidratadas, da pasta de cimento, em diferentes idades (IONASHIRO, 2015).

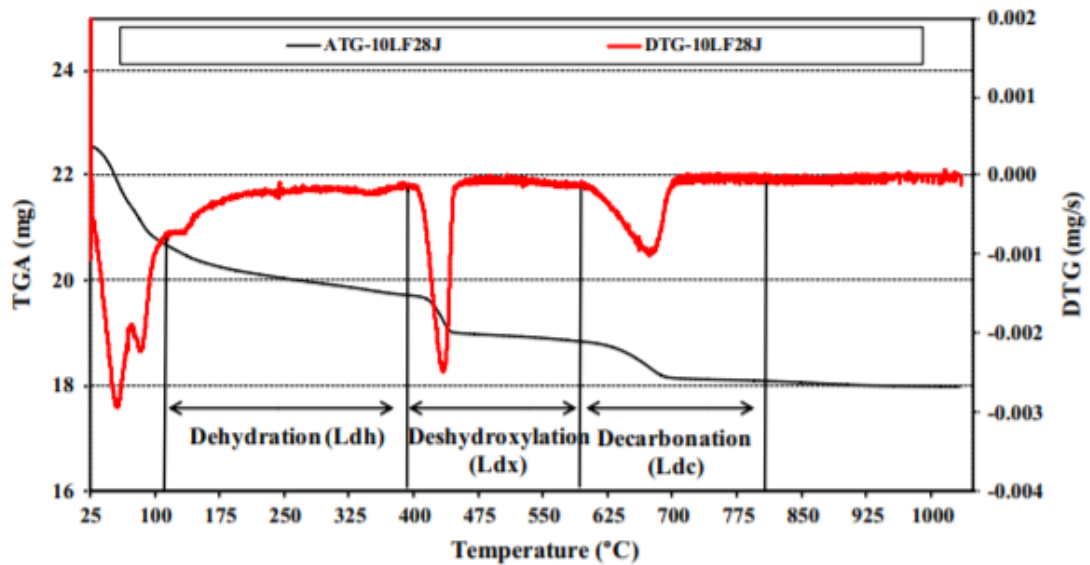
Segundo Ramachandran (2001) e Rêgo (2004) na hidratação do cimento alguns produtos podem ser detectados pelo método das curvas de TGA e DTG. Gesso não reagido na faixa de temperatura entre 140-170 °C, o gel do C-S-H a temperaturas abaixo de 150°C, etringita em temperaturas de 120-130°C, hidróxido de cálcio na faixa de 450-550°C, e carbonato de cálcio a 750-850 °C.

A extensão da reação pozolânica pode ser medida por meio da análise das curvas obtidas na termogravimetria, localizando as zonas de desidratação da portlandita de amostras com e sem adição de pozolana. A avaliação comparativa da perda de massa na zona de temperatura de decomposição da portlandita possibilita identificar a ocorrência das reações pozolânicas (IONASHIRO, 2015).

Com base nas curvas de TGA, pode-se determinar a quantidade de Ca(OH)_2 formado na pasta de cimento. Se um material pozolânico é adicionado na pasta, ocorre consumo de parte do Ca(OH)_2 pelas reações pozolânicas durante a cura. Então, o teor de Ca(OH)_2 detectado no TGA da pasta com pozolana é menor do que em uma pasta de cimento sem adições (PAYA *et al.*, 2003; RUPASINGHE *et al.*, 2017). Ou seja, quanto maior a pozolanicidade do material, menor o teor de Ca(OH)_2 detectado no TGA (COSTA, 2020).

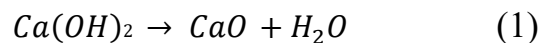
A Figura 11 indica curvas de TGA e DTG típicas de pastas de cimento com fíler calcário. Nessas curvas são indicadas três etapas relativas à perda de massa. A primeira etapa é relativa à desidratação da etringita e de outros compostos hidratados, sendo associada a perdas de água livre e fisicamente combinada. Essa perda de massa pode ocorrer em diferentes intervalos de temperatura, tais como 100-180°C (PAYÁ *et al.*, 2003) e 60-260°C (SHUI *et al.*, 2010). Porém, os compostos hidratados tendem a apresentar composições químicas variadas, o que dificulta a sua quantificação por meio da termogravimetria (BADANOIU *et al.*, 2003).

Figura 11 - Curvas de termogravimetria e de sua derivada de pastas de cimento com 10% de filler calcário aos 28 dias.



Fonte: DEBOUCHA *et al.*, 2017.

A segunda etapa é referente à hidrólise do hidróxido de cálcio e tendem a ocorrer aproximadamente na temperatura de 450 °C (RUPASINGHE *et al.*, 2017); 350-500°C (SHUI *et al.*, 2010)) Ao contrário dos outros compostos hidratados, a estequiometria da desidroxilação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é bem conhecida, conforme indica a Equação 1 (COSTA, 2020; RÊGO, 2004).



A quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ existente na pasta de cimento pode ser calculado usando a Equação 2 (RODRIGUES *et al.*, 2010; SALES, 2014; RUPASINGHE *et al.*, 2017). Nesta equação, H_2O é a perda de água medida na faixa de temperatura relacionada à decomposição do $\text{Ca}(\text{OH})_2$. As constantes 74,09 e 18,01 são a massa molar (em g/mol) do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e H_2O , respectivamente (COSTA, 2020; RÊGO, 2004).

$$\text{Teor de } \text{Ca}(\text{OH})_2 \text{ (\%)} = \text{H}_2\text{O} \times \frac{74,09}{18,01} \quad (2)$$

A pozolanicidade do material estudado é determinada com base na diferença entre o teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da pasta de cimento sem adições (CHr) e da pasta contendo esse material (CHpa). A adequação da diferença do teor de cal fixada pelo material e a pasta de referência é calculada pela Equação 3 (COSTA, 2020). Sendo que o C

corresponde ao teor de substituição parcial do cimento pelo material estudado (RODRIGUES *et al.* 2010; SALES, 2014).

$$I_{TGA} (\%) = \frac{(1-C) \times CHr - CHpa}{(1-C) \times CHr} \times 100 \quad (3)$$

O fator $(1 - C)$ considera que a substituição parcial do cimento por qualquer material deveria implicar em menor quantidade de Ca(OH)_2 (BADANOIU, GEORGESCU & PURI, 2003; RUPASINGHE *et al.*, 2017). Assim, deve-se comparar o valor de CHpa da pasta contendo o material estudado com o valor de CHr multiplicado pelo teor real de cimento $(1 - C)$ (COSTA, 2020).

A terceira etapa de perda de massa entre 600 e 800 °C pode ser atribuída à presença de carbonato de cálcio (calcita) formado pela carbonatação dos componentes do cimento hidratado (RUPASINGHE *et al.*, 2017). Assim, essa presença de calcita pode sugerir que parte do Ca(OH)_2 formado pela hidratação do cimento foi consumido pela carbonatação (COSTA, 2020). O teor de carbonato de cálcio, presente no material, é obtido por meio de um cálculo estequiométrico, realizado por Rupasinghe *et al.* (2017), no qual esse teor de carbonato de cálcio é convertido em hidróxido de cálcio equivalente, de forma a desprezar o efeito da carbonatação na porcentagem total de hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento.

Além disto, as análises de TGA em pasta de cimento também podem contribuir para o estudo do efeito fíler. O caráter fíler das adições minerais podem proporcionar uma variação diferenciada do teor de Ca(OH)_2 nas pastas de cimento (COSTA, 2020). No trabalho realizado Shui *et al.* (2010) foi possível avaliar a hidratação de pastas de cimento com 10% de metacaulim e caulim, sem pozolanicidade, e verificaram que, até 3 dias de cura, as duas pastas apresentaram teor de Ca(OH)_2 superior ao da pasta referência. Isto foi atribuído ao efeito fíler exercido pelas partículas de caulim ou metacaulim, que estimularam a hidratação do cimento e a formação de compostos hidratados e de Ca(OH)_2 . Por outro lado, após os 7 dias de cura, as reações pozolânicas do metacaulim começaram a ser mais predominante, diminuindo com isso a taxa de Ca(OH)_2 da pasta contendo metacaulim (COSTA, 2020).

Porém, segundo Scrivener e Nonat (2011) indicam em seus trabalhos, a compreensão das características e dos mecanismos da velocidade das reações dos materiais suplementares com os constituintes do clínquer ainda está no início. Ao

analisar os ensaios de termogravimetria é comum e amplamente aceito que as fases amorfas tendem a ser mais pozolânicas que as cristalinas, porém ainda existem exceções.

Portanto, as adições minerais pozolânicas e fíleres associadas ao cimento Portland podem oferecer benefícios vantajosos para a aplicação e a utilização dos compósitos cimentícios na construção civil. Mas para que esses materiais sejam empregados da maneira correta é necessário que as adições sejam investigadas em função das condições de serviço e aplicação, principalmente em relação as suas propriedades pozolânicas. Os materiais suplementares devem ser avaliados sobre todos os ângulos possíveis para que sejam consideradas todas as contribuições e limitações do seu uso nos compósitos cimentícios.

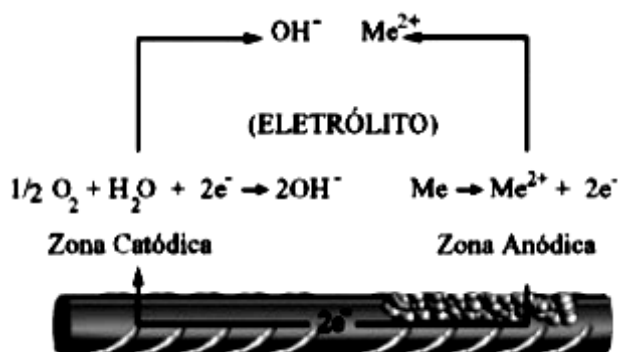
2.4 Corrosão do aço

As armaduras das estruturas de concreto são essenciais para garantir a resistência das estruturas aos esforços provenientes das sobrecargas da edificação e de fatores externos. O concreto exerce no aço uma ação protetora (SINGH & SINGH, 2016). As maiores taxas de corrosão acontecem quando o concreto se encontra com alto teor de umidade, mas não saturados (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).

O aço quando despassivado se torna vulnerável ao fenômeno da corrosão, que pode ser controlado por meio da resistividade elétrica e pela disponibilidade de oxigênio na estrutura. Conforme Hornbostel (2013), quando a armadura está despassivada, a resistividade e a difusão de oxigênio são fatores determinantes para a velocidade de corrosão.

A corrosão eletroquímica pressupõe a formação de uma pilha eletroquímica, na qual ocorrem as diferenças de potenciais e a movimentação de partículas eletricamente carregadas. O processo corrosivo, em meios alcalinos como o concreto, acontece na presença de um ânodo, onde ocorre a perda de elétrons (oxidação), de um cátodo, no qual são consumidos esses elétrons (redução), uma ligação metálica, uma diferença de potencial e uma ligação externa com conduções iônicas pelo eletrólito (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013) (Figura 12).

Figura 12 - Mecanismo eletroquímico de corrosão.



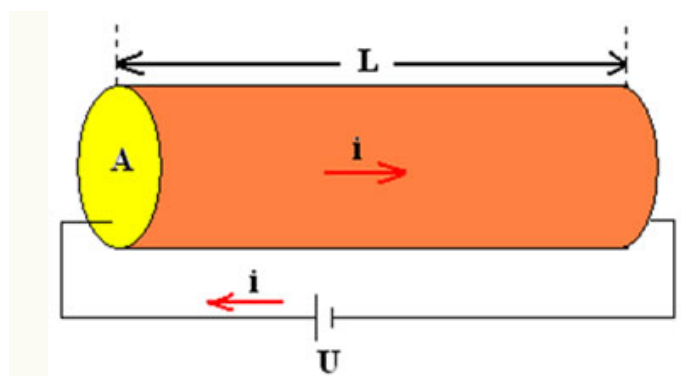
Fonte: Figueiredo & Meira, 2013

A presença de umidade (eletrólito) e de oxigênio no processo são fatores determinantes para a ocorrência do processo corrosivo. O eletrólito é o setor responsável pela passagem de uma maior corrente iônica, acelerando o processo de corrosão, enquanto a ausência de oxigênio proporciona uma diminuição das reações de redução e do consumo de elétrons pela região catódica, conforme Figueiredo e Meira (2013).

2.5 Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica do concreto é caracterizada pela movimentação dos íons na rede de poros e está diretamente ligada a umidade contida na estrutura (DINIZ, 2016). Segundo Raisdorfer (2015), a resistividade elétrica é o parâmetro responsável por indicar o grau de dificuldade da passagem da corrente elétrica pelo material, sendo o inverso da condutibilidade. Isto é, a resistividade elétrica representa a capacidade do concreto de resistir à condução de íons em sua estrutura, quando nela é aplicado uma diferença de potencial elétrico (Figura 13).

Figura 13 - Passagem da corrente elétrica pelo material.



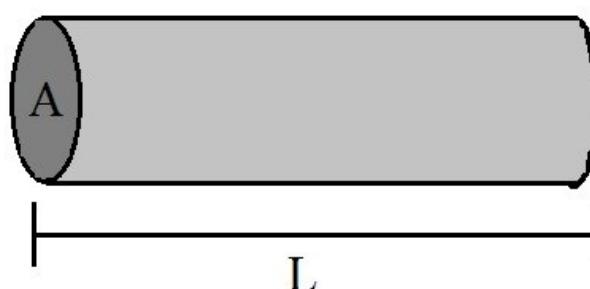
Fonte: Silva, 2015

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade extremamente sensível as suas características químicas ou físicas. Segundo Mota (2016), a resistividade do compósito dependerá das resistividades das partículas e da matriz e do volume dos dois materiais. O cálculo da resistividade elétrica de um elemento estrutural está diretamente relacionado com as características específicas que ele apresenta, como pode ser observado na Equação 4 abaixo.

$$\rho = \frac{A \times R}{L} \quad (4)$$

Portanto, esse parâmetro do concreto é calculado de acordo com as dimensões da peça analisada, como a altura (L) e a área da seção transversal (A), além da resistência elétrica do material (R) (Figura 14).

Figura 14 - Modelo de material para cálculo de resistividade elétrica.



Fonte: Silva, 2015

Outros fatores que podem interferir na medição da resistividade elétrica, além das composições do concreto, são os fatores de condições do entorno, como a temperatura, a umidade e a agressividades do meio. Nesse contexto, vale ressaltar que a resistividade elétrica ainda é uma propriedade em processo de estudo, com

uma ampla gama de informações e que precisa de dados adicionais para que possa ser devidamente interpretada, principalmente em relação às análises de corrosão das armaduras (GHOSH, 2015).

O risco de corrosão da armadura é considerado inversamente proporcional a resistividade elétrica, exceto em situações de saturação ou de valores de resistividade muito elevado (HORNBOSTEL, 2013). Em uma pesquisa realizada por Polder (2001) é possível observar que os corpos de prova expostos ao ambiente de laboratório e a ambientes marinhos apresentam uma relação entre os valores de resistividade elétrica e a taxa de risco de corrosão, de acordo com a agressividade do meio à que estão sujeitos. Hornbostel (2013) em um estudo sobre a resistividade elétrica superficial e o risco de corrosão da armadura, realizou uma busca entre várias literaturas disponíveis sobre o assunto e coletou informações de comparação entre esses dois parâmetros, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Risco de ocorrência de corrosão em função da resistividade elétrica.

Intensidade de corrosão em termos de resistividade elétrica (Ω m)			
Pesquisadores	Alto Risco	Médio Risco	Baixo Risco
Broomfield (2002)	<50	100-200	>200
Bertolini (2004)	<50	50-120	>120
Cavaliere (1981)	<65	65-85	>85
López (1993)	<70	70-300	>300-400
Morris (2002)	<100	100-300	>300
Gonzalez (2004)	<200	200-1000	>1000
Elkey (1995)	<50	Em discussão	100-730
Andrade (1996)	<100	100-1000	>1000-2000
Polder (2001)	<100	100-1000	
Smith (2004)	<80	80-120	>120

Fonte: Adaptado Hornbostel, 2013

A resistividade elétrica é aplicada para indicar o risco de ocorrência de um processo corrosivo na armadura e para avaliar a qualidade do concreto. Quando a corrosão acontece no compósito cimentício, o ensaio de resistividade identificará a umidade presente na estrutura (GHODDOUSI & SAADABADI, 2017).

O processo de corrosão da armadura pode ser alterado devido a propriedades dos compósitos cimentícios, como a permeabilidade a água e a agentes agressivos e a porosidade da matriz cimentícia. A permeabilidade da estrutura depende da

comunicação entre os poros capilares e não apenas do volume totais de vazios no concreto (HORNBOSTEL, 2013).

A porosidade é inerente ao concreto, sendo oriunda de fatores como tipo de cimento, condições de cura e moldagens, adições minerais, dentre outros (Figura 15). Quando esta propriedade do concreto for alta, a resistividade do material tende a ser baixa, ou seja, a penetração de gases e agentes agressivos ocorre em regiões mais porosas e permeáveis, tornando a resistividade do concreto baixa (FONSECA, 2016). Isso acontece também quando o concreto se encontra saturado, uma vez que concretos porosos na presença de água e íons, da dissolução dos minerais na matriz, tornam-se mais condutivos (FIGUEIREDO & MEIRA, 2013).

Figura 15 - Corpo de prova de concreto drenante poroso.



Fonte: Cimento Itambé, 2015

Nesse contexto, a resistividade tende a proteger as armaduras que estão imersas no concreto. Quando menor o valor da resistividade do concreto, mais propícias as barras de aço estão aos ataques do meio quando despassivadas e expostas às condições que a levam à oxidação do aço (RIBEIRO, 2012). Desta forma, é possível verificar que a intensidade da corrosão do aço e a durabilidade das estruturas estão inteiramente ligadas à resistividade elétrica do material (RIBEIRO, 2012).

2.6 Métodos de medição da resistividade elétrica

Na determinação da resistividade elétrica de um elemento, pode-se considerar que o mesmo possui duas regiões distintas; uma superficial, correspondente à região

de molhagem e secagem do material e do cobrimento nominal e outra mais interna, na qual a umidade permanece mais estável, conhecida como volumétrica.

O ensaio superficial é amplamente utilizado para estudo de estruturas *in loco*, enquanto o volumétrico se restringe a ensaios em corpos de prova para controle de qualidade do concreto (GHOSH, 2015). São poucos os dados sobre as variáveis que afetam estes ensaios, especialmente o método volumétrico. O método para a medição da resistividade elétrica deve ser escolhido de acordo com finalidade do estudo, ou seja, é preciso identificar o objetivo da aplicação da resistividade elétrica para definir qual método será utilizado (SILVA, 2016).

A resistividade elétrica volumétrica é regida pela norma brasileira da ABNT NBR 9204 (ABNT, 2012) - Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio. A resistividade elétrica superficial tem sua utilização padronizada por normas internacionais e regulamentos técnicos como a ISO, AASTHO, RILEM, UNE e NM dentre outras.

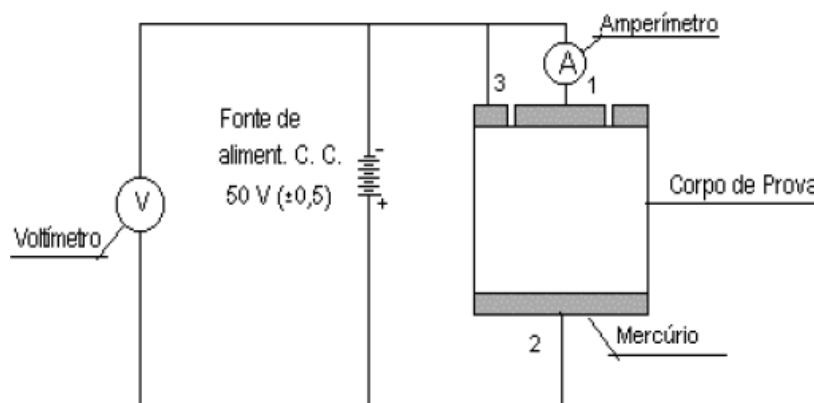
2.6.1 Resistividade elétrica volumétrica

A resistividade, nesse caso, é determinada como volumétrica por estabelecer a resistividade das camadas mais internas dos compósitos cimentícios analisados. O método da resistividade elétrica volumétrica é uma técnica utilizada para a medição da resistividade de concreto, empregando-se apenas corpos de prova moldados ou extraídos das estruturas (RAISDORFER, 2015). O método consiste na passagem de um fluxo de corrente contínua através do concreto e na determinação da diferença de cargas entre as duas placas de cobre. O ensaio de resistividade elétrica volumétrica do concreto é o único normatizado no Brasil, mas ainda é pouco aplicado e avaliado em pesquisas.

O processo de determinação da resistividade elétrica volumétrica, de acordo com a NBR 9204 (ABNT, 2012), é desenvolvido com o emprego de 3 elétrodos (sendo 2 blindados e um não blindado), um multímetro com tensão contínua de impedância 1 Kohm/V que permita ler uma tensão de 50 V com precisão de + 1 %, uma fonte de alimentação contínua estabilizada de 50 V + 0,5 V, um miliamperímetro que permita leitura de 0,15 mA a 200 mA com precisão de + 1% e pelo mercúrio que aumenta a aderência e a área de contato entre as placas e o concreto (LAGE, 2017). A aplicação desse material como contato, no ensaio de resistividade elétrica volumétrica, é indicada na NBR 9204 (ABNT, 2012). No entanto o mercúrio é considerado tóxico, de

difícil manuseio e utilização. Com isso nos ensaios propostos serão utilizadas lâs de aço para o contato necessário entre o concreto e as placas de cobre (Figura 16).

Figura 16 - Resistividade Elétrica Volumétrica.



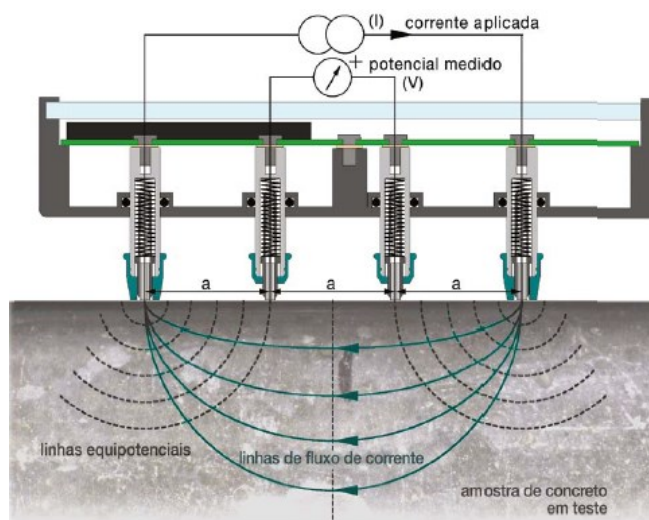
Fonte: Silva (2016)

2.6.2 Resistividade elétrica superficial

O ensaio superficial ou aparente consiste na aplicação dos métodos dos quatro eletrodos proposto por Wenner, no qual a resistividade é medida pela diferença de potencial entre os eletrodos internos, por meio da passagem de uma corrente elétrica alternada, de frequência de até 40hz. Segundo a Proceq (2014), a medição é realizada pela aplicação de uma corrente elétrica pelos eletrodos externos, enquanto os eletrodos internos indicam uma diferença de potencial para determinar a resistividade elétrica do material.

O aparelho de resistividade elétrica superficial da Proceq, de espaçamento padrão 50mm, foi desenvolvido para a leitura de corpos de prova de 150x300mm ou peças de dimensões maiores, enquanto o equipamento de 38mm realiza medições em concretos de tamanhos menores como o 100x200mm (PROCEQ, 2014). Isso acontece porque os corpos de prova devem possuir o espaçamento adequado, entre os eletrodos externos, para possibilitar a ocorrência e a medição da resistividade por bulbos de corrente elétrica (Figura 17).

Figura 17 - Resistividade Elétrica Superficial.



Fonte: Proceq (2014)

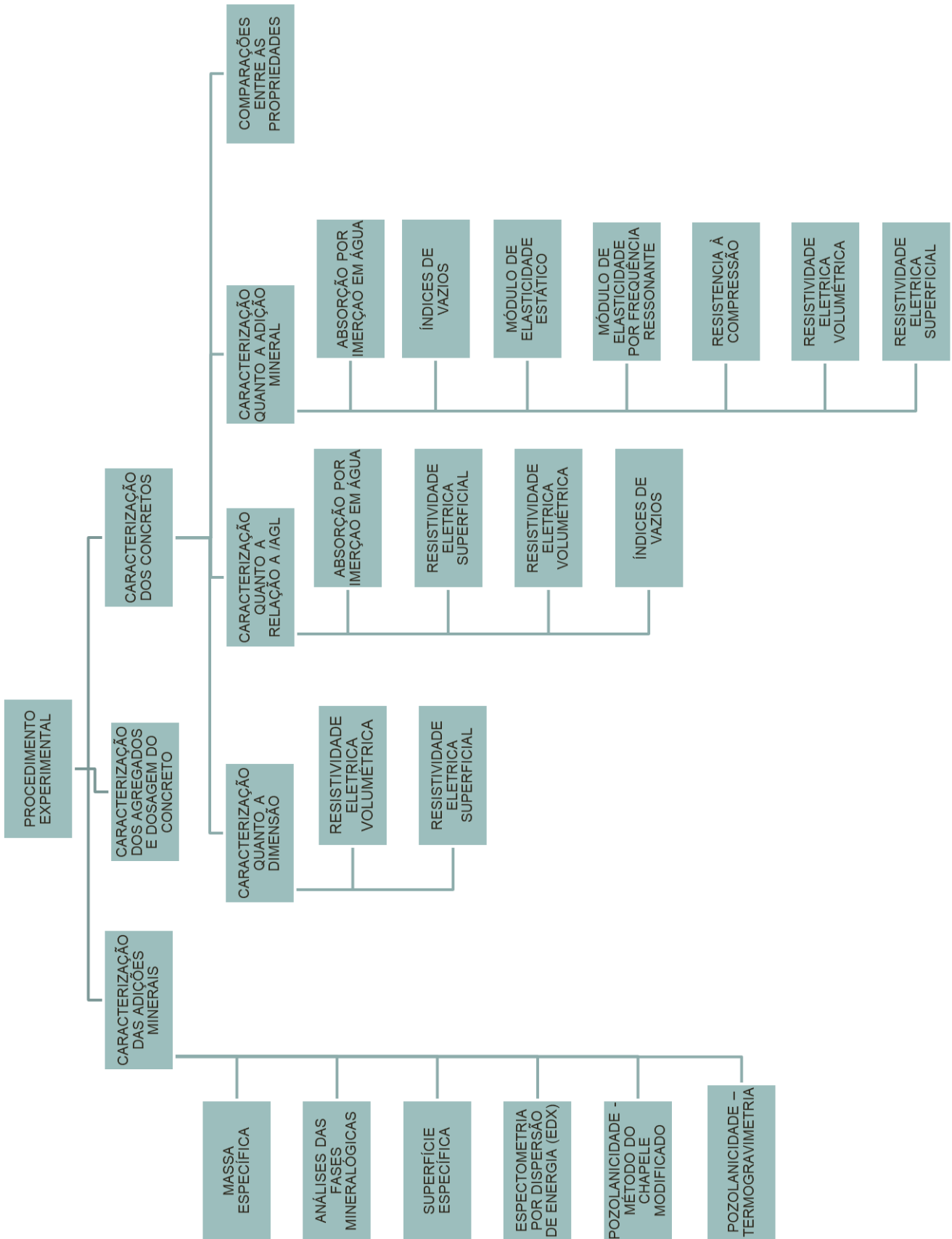
De acordo com Ghosh (2015) as medições da resistividade elétrica são influenciadas por alguns fatores, como quantidade e funcionalidade de aditivos e adições minerais, composições do cimento, evolução de atividade pozolânica e carbonatação e grau de hidratação. Portanto, por meio da resistividade elétrica é possível investigar as alterações na microestrutura do concreto e averiguar como essas mudanças favoreceram as propriedades das estruturas e a proteção das armaduras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho, de natureza experimental, consistiu em avaliar corpos de prova de concreto, de duas dimensões cilíndricas distintas, confeccionados com a mesma relação água/aglomerante e moldados com e sem adições minerais de diferentes características pozolânicas e fíler. Inicialmente foram caracterizados química e fisicamente as adições e, então, confeccionados os concretos. Os corpos de prova, após a caracterização mecânica, ensaios de absorção por imersão e módulo de elasticidade, foram submetidos aos ensaios de resistividade elétrica volumétrica e superficial.

Os ensaios, em sua maioria, foram realizados nos Laboratórios de Concreto e de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica. A Figura 18 a seguir mostra o fluxograma realizado no procedimento experimental.

Figura 18 - Fluxograma da pesquisa.



3.1 Materiais

Os corpos de prova de concreto com e sem adições foram confeccionados, com a utilização de materiais e da carta traço fornecidos pela Concreteira Wanmix, por meio do Eng. Marcos Vasconcellos, gerente de tecnologia. O traço escolhido corresponde a uma composição usual da própria Concreteira Wanmix para concretos com resistência mecânica de 30MPa. Esta resistência é realizada e solicitada às concreteiras para atender às exigências das Classes de agressividade II (centros urbanos) e III (regiões marítimas e industriais) da NBR 6118 (ABNT, 2014). Os materiais foram analisados e caracterizados antes de serem utilizados no dimensionamento e na dosagem do concreto.

Foi utilizado CPV-ARI, por ser um cimento com menor concentração de adições minerais, areia média com diâmetro máximo de 4,75mm, pó de pedra com diâmetro de 6,3mm e brita um com diâmetro de 25,0mm. Embora a empresa tenha fornecido o agregado graúdo como brita um, a caracterização indica que o material tem granulometria de brita dois. O aditivo utilizado foi o superplastificante Viscocrete Precast da Sika, a base de solução de policarboxilato em meio aquoso, com densidade de $1,09 \pm 0,02$ Kg/ L e pH de $4,5 \pm 1,0$. As caracterizações dos materiais utilizados são apresentadas nas Tabelas 3, 4, 5 e 6. A Figura 19 indica a curva granulométrica do cimento empregado na pesquisa.

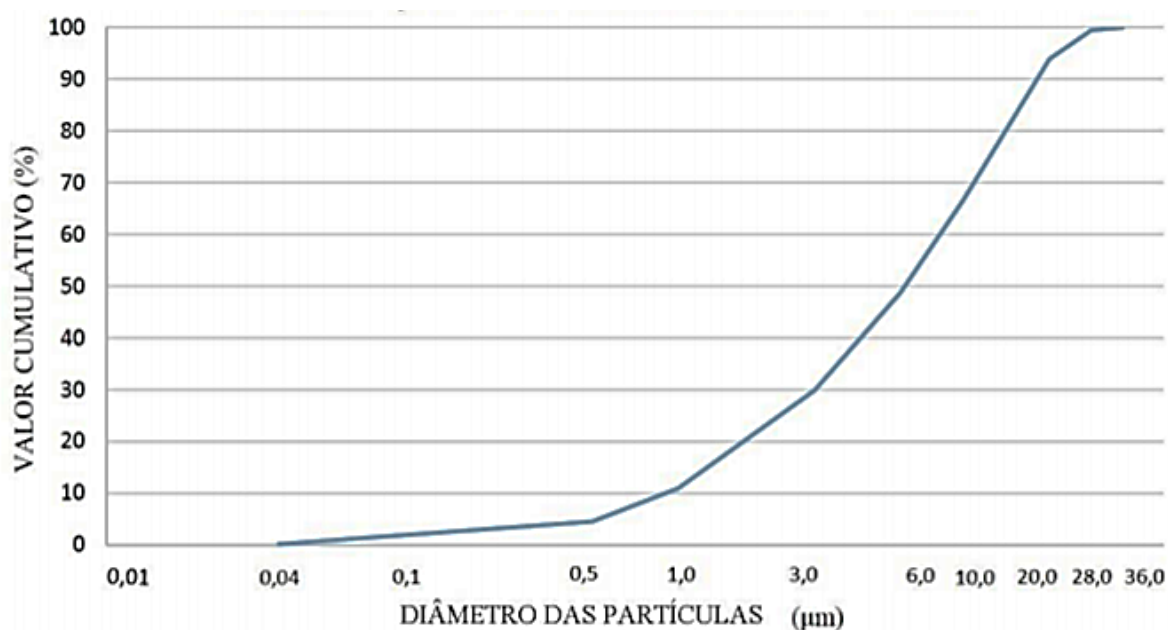
Tabela 3 - Caracterização do Cimento CPV da Cimento LIZ.

ENSAIOS QUÍMICOS				
Características do ensaio	Norma de referência	Especificação de norma	Resultado	Unidade de medida
Perda ao Fogo - PF	ABNT NBR NM 18	$\leq 4,5$	3,29	%
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NBR NM 11-2	$\leq 6,5$	2,00	%
Trióxido de Enxofre - SO ₃	ABNT NBR NM 16	$\leq 4,5$	2,90	%
Anidrido Carbônico - CO ₂	ABNT NBR NM 20	$\leq 3,0$	2,25	%
Óxido de Sódio - Na ₂ O	ABNT NBR NM 17	não aplicável	0,08	%
Óxido de Potássio - K ₂ O	ABNT NBR NM 17	não aplicável	0,71	%
Equivalente alcalino	Norma interna	não aplicável	0,55	%
Aluminato Tricálcico - C ₃ A no cimento	Norma interna	não aplicável	5,56	%

ENSAIOS FÍSICOS				
Características do ensaio	Norma de referência	Especificação de norma	Resultado	Unidade de medida
Resíduo na peneira #200	ABNT NBR 11579	$\leq 6,0$		%
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 12826	não aplicável	2,20	%
Área específica - Blaine	ABNT NBR NM 76	≥ 300	499,00	m ² /Kg
Massa específica	ABNT NBR NM 23	não aplicável	3,05	g/cm ³
Expansibilidade a quente	ABNT NBR 11582	$\leq 5,0$	0,00	mm
Início de pega	ABNT NBR NM 65	≥ 60	176,00	minutos
Fim de pega	ABNT NBR NM 65	≤ 600	221,00	minutos
Teor de água	ABNT NBR NM 43	não aplicável	30,00	%
ENSAIOS MECÂNICOS				
Resistência a compressão - 1 dia	ABNT NBR 7215	11	19	MPa
Resistência a compressão - 3 dia	ABNT NBR 7215	24	33,2	MPa
Resistência a compressão - 7 dia	ABNT NBR 7215	34	40,7	MPa
Resistência a compressão - 28 dia	ABNT NBR 7215	não aplicável	54,2	MPa

Fonte: Adaptado Wanmix, 2018

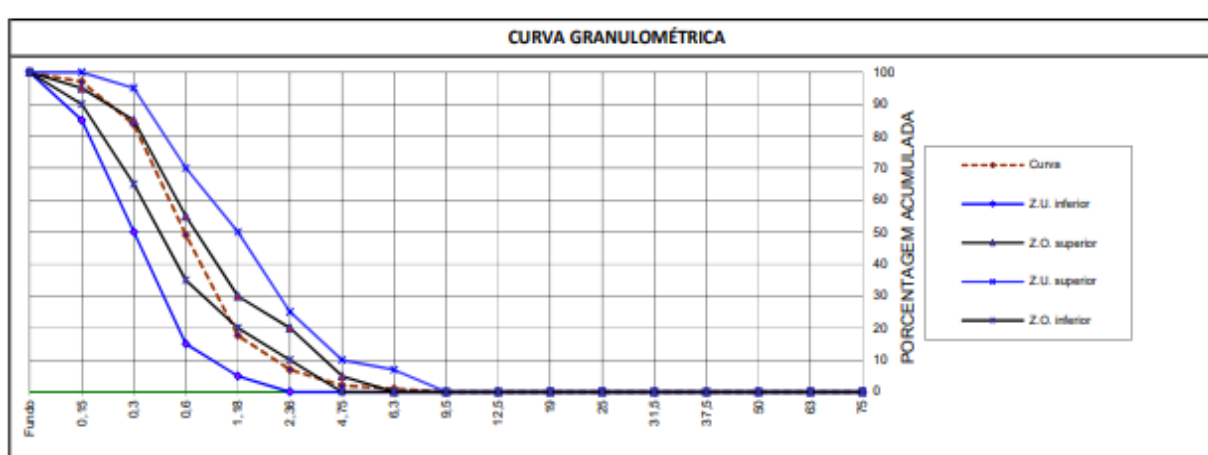
Figura 19 - Distribuição granulométrica do cimento CPV-ARI.



Fonte: Concreteira Wanmix e Cimento Liz, 2018

Tabela 4 – Caracterização da Areia Média.

GRANULOMETRIA (NBR7211)						
Massa Inicial (g):	1048,0	1063,6				
PENEIRA	PESO RETIDO (g)		PORCENTAGEM RETIDA (%)			ACUM.
(mm)	M1	M2	M1	M2	MÉDIA	(%)
75						0,0%
63						0,0%
50						0,0%
37,5						0,0%
31,5						0,0%
25						0,0%
19						0,0%
12,5						0,0%
9,5						0,0%
6,3	9,0	12,0	0,9%	1,1%	1,0%	1,0%
4,75	9,0	12,5	0,9%	1,2%	1,0%	2,0%
2,36	51,0	53,5	4,9%	5,0%	5,0%	7,0%
1,18	112,0	114,0	10,7%	10,7%	10,7%	17,7%
0,6	331,0	333,0	31,6%	31,3%	31,5%	49,1%
0,3	364,0	364,7	34,7%	34,3%	34,5%	83,7%
0,15	140,0	142,5	13,4%	13,4%	13,4%	97,0%
Fundo	31,5	31,0	3,0%	2,9%	3,0%	100,0%
Total	1047,5	1063,2	100,0%	100,0%	100,0%	
Módulo de Finura	2,56		Diâmetro Máximo	4,75		

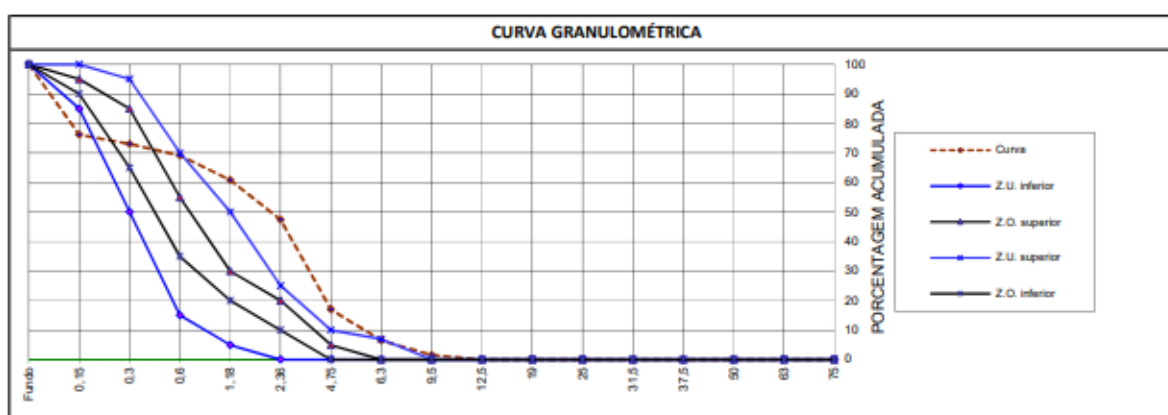


NORMAS	ENSAIOS	UNID. DE MED.	RESULTADOS	LIMITES E REFERÊNCIAS
NM 52	Massa específica seca (d)	g/cm ³	2,63	Método do Frasco de Chapman
NM 52	Massa específica "sss" (dsat)	g/cm ³		
NM 52	Massa específica	g/cm ³		
NBR 7251	Massa Unitária (seca)	kg/dm ³	1,46	Método do Caixote
NBR 7251	Massa Unitária (úmida)	kg/dm ³	1,24	Umidade = 4,0%
NM 46	Material Pulverulento (< #200)	%	2,4	Mín. = 3,0% / Máx. = 5,0%
NBR 7218	Torrões de Argila	%		
NM 30	Absorção	%		
NM 49	Impurezas Orgânicas	p.p.m.	< 300	< 300 p.p.m.
NM 51	Abrassão Los Angeles	%		

Fonte: Concreteira Wanmix, 2018

Tabela 5 - Caracterização do Pó de Pedra.

GRANULOMETRIA (NBR7211)						
Massa Inicial (g):	552,0	543,5				
PENEIRA	PESO RETIDO (g)		PORCENTAGEM RETIDA (%)			ACUM.
(mm)	M1	M2	M1	M2	MÉDIA	(%)
75						0,0%
63						0,0%
50						0,0%
37,5						0,0%
31,5						0,0%
25						0,0%
19						0,0%
12,5						0,0%
9,5	9,8	7,5	1,8%	1,4%	1,6%	1,6%
6,3	27,0	26,7	4,9%	4,9%	4,9%	6,5%
4,75	58,0	56,8	10,5%	10,5%	10,5%	17,0%
2,36	168,0	165,5	30,4%	30,5%	30,5%	47,4%
1,18	74,0	72,5	13,4%	13,3%	13,4%	60,8%
0,6	46,0	45,6	8,3%	8,4%	8,4%	69,2%
0,3	21,0	22,1	3,8%	4,1%	3,9%	73,1%
0,15	17,0	16,5	3,1%	3,0%	3,1%	76,2%
Fundo	131,0	130,0	23,7%	23,9%	23,8%	100,0%
Total	551,8	543,2	100,0%	100,0%	100,0%	
Módulo de Finura	3,45		Diâmetro Máximo	9,50		

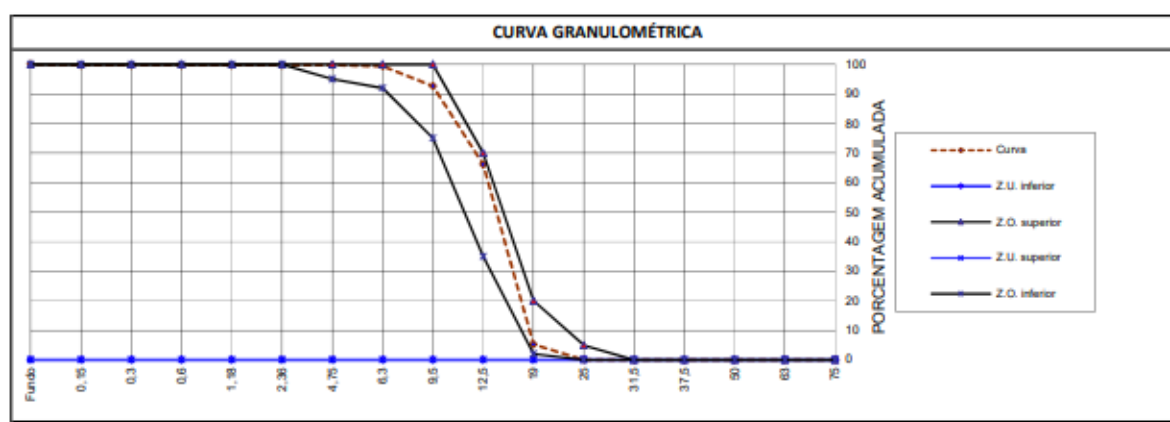


NORMAS	ENSAIOS	UNID. DE MED.	RESULTADOS	LIMITES E REFERÊNCIAS
NM 53	Massa específica seca (d)	g/cm ³	2,71	Método do Frasco de Chapman
NM 53	Massa específica "sss" (dsat)	g/cm ³		
NM 53	Massa específica	g/cm ³		
NBR 7251	Massa Unitária (seca)	kg/dm ³	1,69	Método do Caixote
NBR 7251	Massa Unitária (úmida)	kg/dm ³	1,43	Umidade = 1,0%
NM 46	Material Pulverulento (< #200)	%	22,0	Mín. = 10,0% / Máx. = 12,0%
NBR 7218	Torrões de Argila	%		
NM 53	Absorção	%		
NM 49	Impurezas Orgânicas	p.p.m.	< 300	< 300 p.p.m.
NM 51	Abrasão Los Angeles	%		

Fonte: Concreteira Wannmix, 2018

Tabela 6 – Caracterização da Brita 1.

GRANULOMETRIA (NBR7211)						
Massa Inicial (g):	5055,0	5063,8				
PENEIRA	PESO RETIDO (g)		PORCENTAGEM RETIDA (%)			ACUM.
(mm)	M1	M2	M1	M2	MÉDIA	(%)
75						0,0%
63						0,0%
50						0,0%
37,5						0,0%
31,5						0,0%
25						0,0%
19	266	267	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%
12,5	3080,0	3082,0	60,9%	60,9%	60,9%	66,2%
9,5	1338,0	1339,5	26,5%	26,5%	26,5%	92,6%
6,3	339,0	338,9	6,7%	6,7%	6,7%	99,3%
4,75	18,0	21,0	0,4%	0,4%	0,4%	99,7%
2,36						99,7%
1,18						99,7%
0,6						99,7%
0,3						99,7%
0,15						99,7%
Fundo	13,0	14,8	0,3%	0,3%	0,3%	100,0%
Total	5054,0	5063,2	100,0%	100,0%	100,0%	
Módulo de Finura	6,96		Diâmetro Máximo		25,00	



NORMAS	ENSAIOS	UNID. DE MED.	RESULTADOS	LIMITES E REFERÊNCIAS
NM 53	Massa específica seca (d)	g/cm ³	2,72	
NM 53	Massa específica "sss" (dsat)	g/cm ³		
NM 53	Massa específica	g/cm ³		
NBR 7251	Massa Unitária (seca)	kg/dm ³	1,43	Método do Caixote
NBR 7251	Massa Unitária (úmida)	kg/dm ³		
NM 46	Material Pulverulento (< #200)	%	2,0	Máx. = 2,0 %
NBR 7218	Torrões de Argila	%		
NM 53	Absorção	%		
NM 49	Impurezas Orgânicas	p.p.m.	Nenhum	Somente para Agregado Miúdo
NM 51	Abrasão Los Angeles	%		

Fonte: Concreteira Wanmix, 2018

O traço característico adotado na pesquisa foi o 1:1,48:1,01:2,7 (cimento: areia: pó de pedra: brita) com a relação a/agl de 0,45, adotando 0,5% de aditivo superplastificante Viscocrete Precast, a base de policarboxilato. Esse traço característico, denominado de referência, foi desenvolvido para um *slump* S100, de acordo com NBR 8953 (ABNT, 2015). A Tabela 7 indica a tolerância admitida para a consistência S100.

Tabela 7 - Classes de consistência.

Classes de consistência		
Classes de consistência	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibropensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais, com lançamento bombeado do concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras
Nota 1: De comum acordo entre as partes, podem ser criadas classes especiais de consistência, explicitando a respectiva faixa de variação do abatimento		
Nota 2: Os exemplos desta Tabela são ilustrativos e não abrangem todo os tipos de aplicações		

Fonte: Adaptado NBR 8953 (ABNT, 2015).

Foram confeccionados também com base neste traço, corpos de prova com quatro adições minerais diferentes em substituição a 10% em massa de aglomerante. As adições minerais utilizadas, após caracterização física e química são: o fíler calcário, a lama vermelha, a cinza de casca de arroz e o metacaulim. A porcentagem de substituição de 10% foi escolhida devido a avaliação realizada em algumas pesquisas que utilizavam o mesmo percentual, como em Raisdorfer (2015), Real (2015) e Ghoddoussi (2017). A cinza de casca de arroz e o metacaulim são adições minerais consideradas pozolânicas (CORDEIRO *et al.*, 2011; LIU *et al.*, 2017; QUARCIONI *et al.*, 2015) e o fíler calcário e a lama vermelha são adições minerais que não reagem com o hidróxido de cálcio (DEBOUCHA, *et al.*, 2017; MARTINS, 2019). Os corpos de prova foram confeccionados em cinco dosagens de concreto preservando as mesmas características e alterando apenas o tipo de adição mineral.

As adições minerais aplicadas na pesquisa foram doadas por diversas empresas brasileiras. O metacaulim, do tipo HP Ultra, foi fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil. A lama vermelha, resíduo da indústria de alumínio, foi proveniente de Ouro Preto/MG, cedida pela Universidade Federal de Ouro Preto. A cinza de casca de arroz foi fornecida pela empresa Pilleco Nobre em Alegrete/RS, e

o fíler de calcário foi doado pela Strutturare, que utiliza o material proveniente da Britadora Borges. O fíler de calcário, a cinza da casca de arroz e o metacaulim foram utilizados nas mesmas condições enviados pelos fornecedores. A lama vermelha foi utilizada após seu destorroamento e moagem, com a utilização de um almofariz, para reduzir o tamanho dos grãos. A caracterização das adições minerais encontra-se no Capítulo 3.2.1.

3.2 Métodos

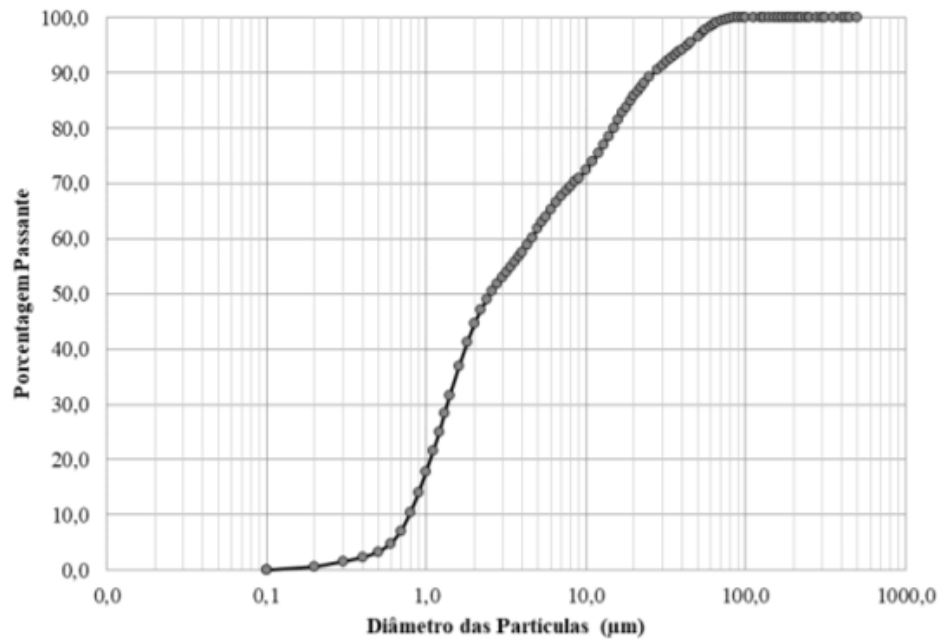
Primeiramente as adições minerais foram caracterizadas química e fisicamente. Em seguida foram confeccionados os concretos de referência e com adições minerais, os quais foram caracterizados quanto à absorção por imersão em água e índices de vazios, à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade (por ensaio de frequência ressonante forçada e por ruptura dos corpos de prova). Por último, foram determinadas as resistividades elétricas volumétrica e superficial dos concretos produzidos.

3.2.1 Caracterização das adições.

As adições minerais foram, primeiramente, analisadas com base em suas curvas granulométricas, a fim de se comparar com a granulometria do cimento Portland CPV-ARI. A área superficial específica foi desenvolvida pelo ensaio de adsorção gasosa (BET), a caracterização química foi realizada por Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDX). A identificação da estrutura do arranjo atômico e as fases mineralógicas presentes foram analisadas pela Difração de Raio X (DRX). A atividade pozolânica, ou seja, a reatividade e o caráter fíler das adições foram avaliados no ensaio de termogravimetria (TGA) e de Chapelle Modificado. As adições minerais foram acrescentadas ao concreto e avaliadas quanto a sua influência nas propriedades e na concepção do compósito cimentício.

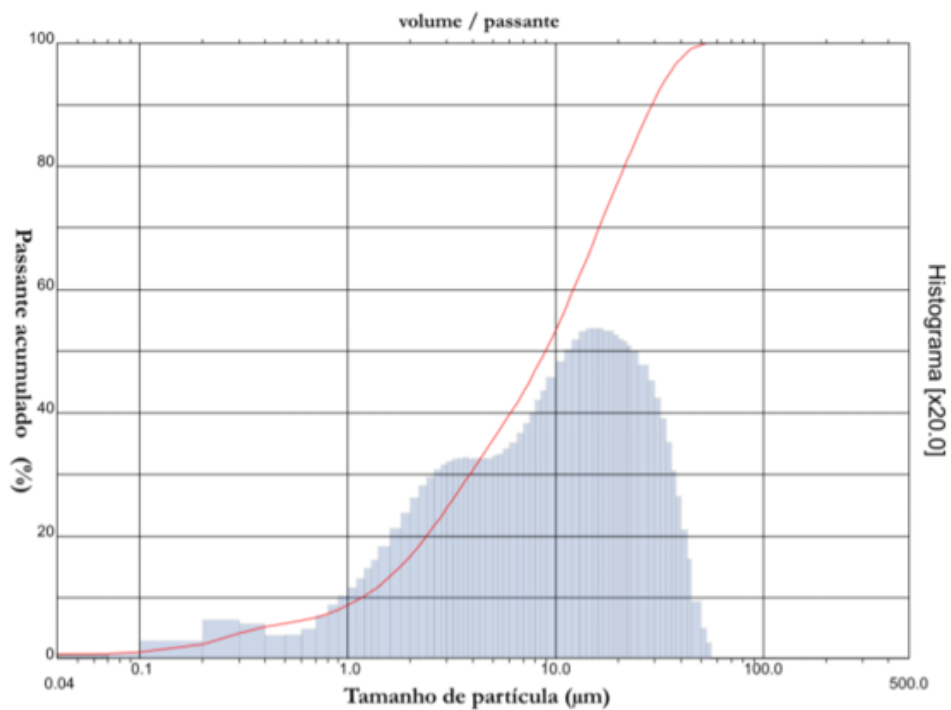
As distribuições granulométricas, realizadas apenas nas adições minerais de efeito fíler e determinadas por granulometria a laser, foram identificadas e analisadas nas caracterizações disponibilizadas pelos fornecedores dos materiais, e nas pesquisas de outros autores, como Martins (2019), Araújo (2019) e Silva (2019). Nas Figuras 20 e 21 é possível observar as distribuições granulométricas do fíler calcário e da lama vermelha.

Figura 20 - Distribuição granulométrica do Fíler Calcário.



Fonte: Britadora Borges, 2019

Figura 21 - Distribuição granulométrica da Lama Vermelha.



Fonte: Martins (2019)

A comparação da distribuição granulométrica e do tamanho médio dos grãos do cimento e das adições minerais de efeito fíler, permite analisar a possibilidade dos

materiais suplementares de proporcionarem a matriz cimentícia um efeito de nucleação e o refinamento e empacotamento dos poros da estrutura. Estes efeitos ocorrem quando se emprega um material inerte e fino (fíler) na composição do concreto. A granulometria da cinza de casca de arroz e do metacaulim foram obtidas pelo método BET, mais apropriada para materiais muito finos, os quais são propícios à aglomeração de grãos.

O ensaio de adsorção gasosa via Brunauer, Emmett e Teller (BET) possibilita avaliar irregularidades na superfície e a estrutura de poros das adições minerais. O método permite medir a área superficial, a porosidade, o tamanho das partículas e a distribuição de poros do sólido.

A área superficial específica foi avaliada pelo ensaio de adsorção de N_2 usando um método BET de 5 pontos em um analisador de área de superfície Quantachrome, modelo Nova 1200e (Figura 22), no Laboratório de Caracterização de Sólidos Particulados, na Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG. As amostras foram previamente levadas a temperatura de $110\text{ }^\circ\text{C}$, segundo as condições padrão (SHIROMA, 2016).

Figura 22 - Equipamento para ensaio de área superficial específica.



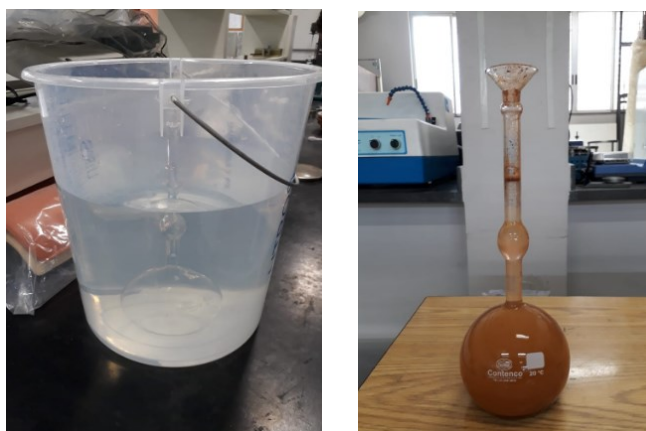
A análise química dos materiais suplementares foi determinada pela Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDX ou EDS), um método utilizado para identificação dos elementos presentes em uma amostra de material, bem como as composições e proporções qualitativas e semiquantitativas. O ensaio foi realizado em um equipamento Panalytical PW 4400/40 Axios, com radiação $CrK\alpha$, nas condições de 50 kV e 20 mA (Figura 23). Para essa análise não houve um preparo específico das amostras.

Figura 23 - Equipamento para ensaio de Espectroscopia de Raios X por dispersão em energia.



As adições minerais aplicadas aos concretos, foram também caracterizadas quanto a sua massa específica. Os ensaios de massa específica foram desenvolvidos pelo método de Lê Chatelier, de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017) (Figura 24).

Figura 24 - Ensaio de massa específica - Lê Chatelier.



A identificação da estrutura do arranjo atômico e as fases mineralógicas presentes foram analisadas pela Difração de Raio X (DRX). O ensaio se dá através de um feixe de raios X de alta intensidade que reflete na pastilha compactada do material estudado. Para a leitura do difratograma, a escala horizontal (ângulo de difração) indica o espaçamento do arranjo cristalino e a escala vertical (altura do pico) gera a intensidade do raio. As fases presentes nos materiais suplementares foram determinadas em um difratômetro no Laboratório de Raio X do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, o Difratômetro de Raios-X Philips-PANalytical PW 1710, equipado com câmara de textura (Figura 25).

Figura 25 - Equipamento para ensaio de Difração de Raios X.



A atividade pozolânica foi determinada pelo método do Chapelle Modificado, de acordo com NBR 15895 (ABNT, 2010). Esse método avalia a capacidade do material em reagir com o hidróxido de cálcio na presença de uma solução aquosa, para formar compostos de características aglomerantes (Figura 26).

Figura 26 - Ensaio de Chapelle Modificado.



O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica da UFMG e com base na norma o índice de hidróxido de cálcio, $I_{Ca(OH)_2}$, foi calculado segundo a Equação 5.

$$I_{Ca(OH)_2} = \frac{28 \times (V3 - V2) \times Fc}{m_2} \times 1,32 \quad (5)$$

Em que:

$I_{Ca(OH)_2}$ - índice de atividade pozolânica que corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado, em (mg) de $Ca(OH)_2$, por grama (g) de material

V2 - volume de HCl 0,1 mol/l, consumido no ensaio com amostra do material pozolânica, em (ml)

V3 - volume de HCl 0,1 mol/l consumido no ensaio em branco (ml)

Fc - fator de correção do HCl 0,1 mol/l

m2 - massa do material pozolânico (g)

1,32 - relação molecular $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaO}$

O teor de CaO livre, presente nas amostras de material, é medido pela titulação de solução com HCl 0,1 mol/l e fenolftaleína (1g/l), sendo o resultado do ensaio expresso em mg de hidróxido de cálcio fixado por g de material. Após o ensaio finalizado, é analisado quanto de CaO livre resta na solução. Com base na norma, a pozolanidade do material será maior, quanto mais elevado for o índice de atividade pozolânica, dado pelo teor de óxido de cálcio fixado.

O índice de pozolanidade pelo Chapelle Modificado também pode ser calculado na forma de porcentagem, pelo teor de cal fixada. Os índices de hidróxido de cálcio $I_{\text{Ca(OH)}_2}$ (mg/g) foram convertidos para porcentagem de cal fixada I_{CaO} (%), conforme a Equação 6, a fim de facilitar a comparação com os resultados obtidos nas análises por TGA/DTG. O valor de 2000 mg se refere à massa de cal diluída em solução e a conversão de $I_{\text{Ca(OH)}_2}$ para I_{CaO} é feita pela divisão do primeiro pela relação molar de 1,32 (COSTA, 2020). O material é considerado pozolânico quando o teor de hidróxido de cálcio fixado for superior a 435,6mg/g de material (HOPE FILHO *et al.*, 2017; QUARCIONI *et al.*, 2015).

$$I_{\text{CaO}} (\%) = \frac{I_{\text{Ca(OH)}_2} (\text{mg/g})}{1,32 \times 2000 \text{ mg}} \times 100 \quad (6)$$

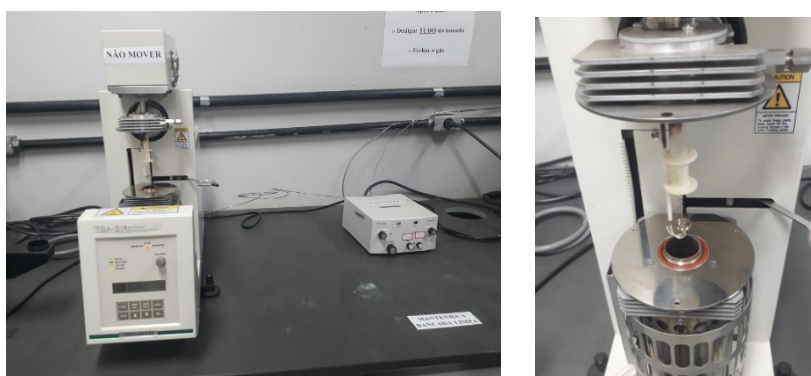
O ensaio da análise termogravimétrica (TGA) é uma medida quantitativa das perdas de massas de um sólido, quando este é aquecido em um intervalo de temperatura controlada. O TGA registra uma mudança na massa de desidratação, decomposição e oxidação das amostras devido a variações de temperatura e tempo. O ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica da UFMG.

As análises termogravimétricas das amostras foram realizadas no Analisador térmico Shimadzu (modelo TGA-51), em atmosfera oxidante (ar sintético) e inerte (nitrogênio). As curvas foram obtidas pela análise de aproximadamente 20 mg de material em cadinhos de alumínio, vazão de gás de 84 mLmin⁻¹, na faixa da

temperatura ambiente até 1000°C com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹ (Figura 27).

As amostras analisadas foram preparadas por meio da moldagem de pastas de cimento, utilizando cimento CPV, relação a/agl de 0,5 e adições minerais em substituição a 10% da massa do aglomerante. As pastas de cimento foram posteriormente moídas e passadas na peneira de malha 200, de 75 µm, para depois serem avaliadas nos ensaios de termogravimetria.

Figura 27 - Equipamento para ensaio de análises termogravimétricas.



O índice de pozolanicidade das adições minerais foi determinado pelo teor de cal fixada por esses materiais na pasta de cimento. O teor de cal fixada (I_{TGA}) foi calculado conforme a Equação 7. Nesta equação: CH_r e CH_{pa} são os teores de $Ca(OH)_2$ determinados na pasta referência e na pasta com a adição mineral estudada, respectivamente, e C é o teor de substituição do cimento pelo material (RODRIGUES *et al.*, 2010; SALES, 2014; COSTA, 2020).

$$I_{TGA} (\%) = \frac{(1-C) \times CH_r - CH_{pa}}{(1-C) \times CH_r} \times 100 \quad (7)$$

3.2.2 Confeção dos corpos

Os concretos foram confeccionados segundo a composição apresentada na Tabela 8. Todos os corpos de prova, com ou sem adições minerais, foram submetidos a processos de cura, por submersão em água, durante os 180 dias de ensaios. Esse fato possibilitou que a umidade interna dos corpos de prova se mantivesse constante ao longo de todas as idades analisadas.

Tabela 8 - Dosagens e características dos concretos confeccionados.

Informações dos concretos					
Adições Minerais	Concreto Referência	Concreto com Fíler Calcário	Concreto com Lama Vermelha	Concreto com Cinza de Casca de Arroz	Concreto com Metacaulim
Diametro (m)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Altura (m)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Área (m ²)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Volume kg/m ³	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Resistencia shunt	671,94	671,94	671,94	671,94	671,94
Cimento	CPV	CPV	CPV	CPV	CPV
Areia artificial	Média	Média	Média	Média	Média
Adição Mineral	0%	F. Calcário -10%	L. Vermelha -10%	Cinza de arroz -10%	Metacaulim -10%
Traço em massa	1:2,49:2,7	1:2,49:2,7	1:2,49:2,7	1:2,49:2,7	1:2,49:2,7
Relação a/agl	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Aditivo Superplastificante	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
Data de moldagem	27/10/2018	11/01/2019	11/01/2019	14/02/2019	09/11/2018

Foram moldados, seguindo a NBR 5738 (ABNT, 2015; versão corrigida 2016), corpos de prova de dimensões cilíndricas com 100mm de diâmetro e 200mm de altura e 150mm de diâmetro e 300mm de altura (Tabela 8). A confecção de corpos de prova com tamanhos maiores foi com vistas a avaliar a influência dessas dimensões na resistividade elétrica volumétrica do concreto e comprovar a necessidade da adequação do espaçamento dos eletrodos, em relação à altura do corpo de prova, para a medição da resistividade elétrica superficial.

3.2.3 Critérios para a avaliação estatística e para as correlações das propriedades dos concretos estudados

As análises estatísticas dos resultados obtidos para os corpos de prova de concreto com e sem adições minerais foram realizadas por meio da comparação das médias e das amplitudes dos resultados obtidos nos ensaios. As análises sobre a homogeneidade dos resultados foram realizadas segundo o método de cálculo do coeficiente de variação. O coeficiente de variação fornece a dispersão dos dados em torno da média em percentual, constituindo uma medida alternativa ao desvio padrão (BATTISTI, 2008). Assim, quanto maior o desvio padrão e o coeficiente de variação, maior a dispersão dos dados em torno da média (MATOS, 2012; MANCUSO, et al., 2018). Pimentel Gomes (1985), Garcia (1989) e Battisti (2008), desenvolveram uma classificação para interpretação do coeficiente de variação, segundo a Tabela 9.

Tabela 9 - Interpretação dos coeficientes de variação.

Coeficiente de variação	Homogeneidade da amostra
< 10%	Alta
10% a 20%	Moderada
20% a 30%	Baixa
> 30%	Muito baixa

Fonte: Garcia (1989), adaptado pelo autor,

As avaliações das correlações entre as propriedades estudadas na pesquisa, foram realizadas pelo método da regressão. Nessa avaliação são apresentadas as funções que mais se adequam estatisticamente a correlação, e calculado os coeficientes de determinação (R^2) e de correlação (R). O valor de R , entre -1 e +1, representa uma medida da intensidade do inter-relacionamento entre duas variáveis (ANDRADE, 2012). Na Tabela 10 apresentada por Shimakura (2002), é possível observar como os resultados dos coeficientes de correlação (R) podem ser interpretados.

Tabela 10 - Interpretação dos valores do coeficiente de correlação R .

Coeficiente de correlação (R) (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	Uma correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Uma correlação fraca
0,40 a 0,69	Uma correlação moderada
0,70 a 0,89	Uma correlação forte
0,90 a 1,00	Uma correlação muito forte

Fonte: Shimakura, 2002

Após testar vários tipos de correlações (Potência, Logarítmica, Linear e Exponencial) escolheu a que apresentou o maior R e conseqüentemente o maior R^2 , para representar a melhor correlação. O coeficiente de determinação R^2 mede a proporção da variabilidade em y que é explicada por x constituindo uma função direta da correlação entre as variáveis. Assim, quanto maior for o coeficiente de determinação, os pontos do diagrama de dispersão estarão mais próximos da reta de regressão. Um valor de R^2 muito próximo de 1 indica forte relação, positiva ou

negativa, entre as variáveis e, conseqüentemente, alta confiabilidade da equação de correlação em estudo (ANDRADE, 2012).

3.2.4 Dimensões dos corpos de prova de concreto

Para verificar a influência da dimensão dos corpos de prova cilíndricos nas medições de resistividade elétrica volumétrica e superficial foram comparados os resultados obtidos em corpos de prova de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura em relação a corpos de prova de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Na resistividade elétrica superficial foi empregado um afastamento único de 50 mm entre os eletrodos no Método de Wenner. A análise da dimensão dos corpos de prova na resistividade elétrica volumétrica e superficial foi realizada apenas nos concretos de referência e com adição de fíler calcário.

3.2.5 Caracterização do concreto

Os concretos com e sem adições foram caracterizados por meio de ensaios de absorção por imersão em água, de resistência à compressão, de módulo de elasticidade estático e de frequência ressonante forçada (módulo de elasticidade dinâmico). Os ensaios de módulo de elasticidade por frequência ressonante e de absorção por imersão foram realizados aos 3,7,14,21,28,56,70,100,120,150 e 180 dias. Os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático foram realizados aos 28 e 180 dias. Os corpos de prova de concreto foram secos em temperatura ambiente para a realização dos ensaios de resistência à compressão e módulos de elasticidades estático e dinâmico.

Os ensaios de absorção por imersão foram desenvolvidos, baseados na NBR 9778 (ABNT, 2005; versão corrigida 2009), pelo método da medição da massa específica, índice de vazios e absorção de água. Na realização do ensaio foi utilizado a balança hidrostática de até 32Kg. Os ensaios foram realizados em concretos com e sem adições minerais, em seis corpos de prova por traço.

A resistência à compressão dos concretos (Figura 28) e o módulo de elasticidade estático, pelo método dos extensômetros elétricos de fixação externa da EMIC (Figura 29) e pelo compressômetro (Figura 30), foram determinadas em uma prensa hidráulica da EMIC e realizadas segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 8522 (ABNT, 2017), respectivamente. Para os ensaios de resistência a compressão foi utilizada uma amostragem de três corpos de prova 100x200mm aos

28 dias e seis corpos de prova 150x300mm aos 180 dias de cada traço. Nos ensaios de módulo de elasticidade estático foram utilizados três corpos de prova 150x300mm, de cada traço, aos 28 dias e aos 180 dias.

Figura 28 - Prensa Hidráulica da EMIC.



Figura 29 - Extensômetros elétricos para medição de deformação.



Figura 30 - Compressômetro para medição de deformação.



O ensaio de módulo de elasticidade dos concretos pelo método de frequência ressonante forçada foi determinado utilizando o equipamento Erudite MKII da C.N.S. Eletronics LTDA (Figura 31). Foram realizadas três medições para cada corpo de prova, aplicando-se vibrações com frequência na faixa de 7.000–15.000 Hz e voltagem de 0,5v, considerando a constante de amortecimento superior a 15 (Sales, 2008). Foram executados ensaios em seis corpos de prova 150x300mm, de cada traço.

Figura 31 - Equipamento de módulo de elasticidade por frequência ressonante.



Com os resultados obtidos de módulo de elasticidade estático e dinâmico, por meio da frequência ressonante, nas idades de 28 e 180 dias, buscou-se encontrar uma função que representasse a melhor correlação possível entre essas duas propriedades. A escolha da melhor função de regressão foi definida como sendo a que fornecesse o coeficiente de correção (R) mais próximo de ± 1 e a que também

representasse o comportamento conhecido de crescimento dos módulos de elasticidade. O critério empregado para interpretar o quanto as variáveis estão correlacionadas entre si, encontra-se na Tabela 10.

3.2.6 Resistividade elétrica do concreto

Os ensaios de resistividade elétrica volumétrica e superficial foram realizados aos 3,7,14,21,28,56,70,100,120,150 e 180 dias. A resistividade elétrica volumétrica foi determinada no equipamento desenvolvido pelos alunos da UFMG no Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica (Figura 32). A medição da resistividade ocorre pela diferença de potencial entre as faces opostas do corpo de prova. O sistema do equipamento é composto por um gerador de sinais que libera uma corrente alternada a qual é direcionada ao banco de resistências shunt e ao corpo de prova. Como o banco de resistências shunt e o corpo de prova formam um circuito em série, a corrente é a mesma no sistema.

Nos ensaios foram adotados os seguintes parâmetros: corpo de prova saturado, frequência de 40 Hz e utilização de lã de aço para melhorar o contato e a aderência entre a superfície do corpo de prova e os eletrodos de cobre (LAGE, 2017). As medições foram desenvolvidas em concretos com e sem adições minerais de dimensões 100x200mm e 150x300mm.

Figura 32 - Equipamento de Resistividade Elétrica Volumétrica.



O equipamento utilizado para as medições da resistividade elétrica superficial foi o RESIPOD do fabricante PROCEQ (Figura 33), empregando a frequência de 40Hz e utilizando o método dos quatro eletrodos (Método de Wenner). Esta técnica foi

empregada para a resistividade elétrica de corpos de prova de 100x200mm e 150x300mm com e sem adições minerais.

As resistividades elétricas superficiais e volumétricas foram realizadas em seis corpos de prova 150x300mm (diâmetro x altura) (até 180 dias) e três corpos de prova 100x200mm (diâmetro x altura) (até os 28 dias), para comparação das medições nas duas geometrias de corpos de prova utilizadas.

Figura 33 - Aparelho de Resistividade Elétrica Superficial.



3.2.7 Resistividade elétrica e o risco de corrosão

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de resistividade elétrica superficial foi possível avaliar o risco de corrosão das armaduras nos concretos de referência e com adições minerais pozolânicas e de efeito fíler. A análise do risco de corrosão foi realizada, aos 28 dias, tendo como base a Tabela 11, proposta por Polder (2001), que relaciona a resistividade elétrica superficial com o risco de corrosão. A escolha da idade de 28 dias para avaliação dos concretos foi pelo fato dessa idade ser considerada, internacionalmente, como a principal idade de caracterização e avaliação do concreto, principalmente no que tange a resistência mecânica à compressão. A análise dos resultados pode indicar que a presença das adições minerais influencia no risco de corrosão das armaduras, caso se despassivem.

Tabela 11 – Risco de corrosão em função da resistividade elétrica superficial

Resistividade superficial do concreto	Indicação do risco de corrosão
> 200 ohm.m	Desprezível
100 a 200 ohm.m	Baixa
50 a 100 ohm.m	Alta
< 50 ohm.m	Muito Alta

Fonte: Polder, 2001

3.2.8 Correlação entre as resistividades e as propriedades físicas e mecânicas dos concretos

Por último foi realizada a análise da correlação entre as propriedades mecânicas e físicas do concreto e as suas resistividades elétricas. Sendo assim, buscou-se obter curvas de correlação para avaliar as características dos concretos estudados por meio dos ensaios de absorção por imersão, índices de vazios, resistência a compressão e módulo de elasticidade estático e dinâmico em relação as resistividades elétricas volumétrica e superficial. Foi realizado um estudo de regressão visando avaliar o quanto essas propriedades podem ser correlacionadas e como uma propriedade pode ser vinculada diretamente a outra por meio de uma função de regressão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados os resultados referentes à caracterização das adições minerais e da obtenção do traço proposto. Em seguida foi analisada a influência das dimensões dos corpos de prova de concreto de referência e com uso de filler calcário na resistividade elétrica dos concretos. Posteriormente foi avaliado a influência das diferentes adições no desempenho do concreto, por meio de ensaios de absorção por imersão e índices de vazios, de resistência à compressão, de módulo de elasticidade estático, de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada e de resistividade elétrica volumétrica e superficial. Ao final foi apresentado as correlações da resistividade elétrica volumétrica e superficial com os índices de vazios, a absorção por imersão e as propriedades mecânicas do concreto.

4.1 Caracterização das adições minerais

4.1.1 Distribuição granulométrica e superfície específica

Com base nos ensaios de curvas granulométricas do cimento CPV (Figura 19) e das adições minerais de efeito fíler (Figuras 20 e 21) é possível identificar o diâmetro médio das partículas desses materiais (Tabela 12). O fíler calcário e a lama vermelha apresentaram diâmetros médios inferiores ao cimento CPV. Isso indica que, na média, essas adições minerais possuem partículas menores que o cimento CPV e que quando adicionadas ao concreto podem desempenhar um efeito de nucleação e de compacidade granular, proporcionar um maior refinamento e empacotamento dos poros da matriz cimentícia e, conseqüentemente, diminuir a sua porosidade. As finuras das partículas da cinza de casca de arroz e do metacaulim foram obtidas apenas pelo método BET, mais apropriado para materiais muito finos e com capacidade de se aglomerar.

Tabela 12 - Diâmetro médio do cimento e das adições minerais de efeito fíler.

Diâmetro médio das partículas	
Adições Minerais	Diâmetro médio (μm)
Cimento CPV	9,74
Fíler Calcário	5,20
Lama Vermelha	8,15

Os resultados obtidos no ensaio de adsorção gasosa de N_2 (BET), permitem calcular a superfície específica das adições minerais apresentadas na Tabela 13. No trabalho de Nazari, Bagheri e Riahi, (2011) verifica-se que partículas mais finas com elevada área superficial tendem a formar estruturas mais densas e, portanto, mais resistentes. O metacaulim e a lama vermelha apresentam os maiores valores de superfície específica, seguido da cinza de casca de arroz com um valor moderado de $10,57 \text{ m}^2/\text{g}$ e do fíler calcário com um valor $3,37 \text{ m}^2/\text{g}$.

Tabela 13 - Área superficial específica das adições minerais estudadas.

Área superficial	
Adições Minerais	Área superficial específica (m ² /g)
Fíler Calcário	3,37
Lama Vermelha	13,92
Cinza da Casca de Arroz	10,57
Metacaulim	14,52

O método BET (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett e Edward Teller) baseia-se na adsorção de moléculas de um gás inerte na superfície externa e interna dos poros abertos e interligados das partículas do sólido ensaiado (SHIROMA, 2016). Em geral, maiores valores de BET, para materiais pozolânicos, estão relacionados a maiores atividades pozolânicas dos materiais, pois quanto maior for o contato da pozolana com o hidróxido de cálcio maior será a taxa de reação pozolânica. No caso da cinza de casca de arroz, a área superficial BET é fortemente influenciada pela estrutura porosa interna das partículas (CORDEIRO *et al.*, 2011). Amostras com poros fechados e presença residual de materiais orgânicos podem ter resultados baixos de porosidade e de área superficial, como foi o caso da cinza de casca de arroz analisada no trabalho. Dessa forma, o valor moderado da superfície específica da cinza de casca de arroz pode ser atribuído a estrutura porosa do material e a aglomeração das partículas internas mais finas, de forma que a sua superfície externa seja o fator preponderante para o valor não tão elevado da sua área específica. Portanto, a atividade pozolânica presente na cinza de casca de arroz parece ser principalmente associada à sua área superficial externa específica e à sua estrutura mesoporosa (VIEIRA *et al.*, 2020; CORDEIRO *et al.*, 2011).

4.1.2 Composição química

A composição química semiquantitativa do fíler calcário, da lama vermelha, da cinza de casca de arroz e do metacaulim obtida por EDX, é apresentada na Tabela 14. Com base na normalização vigente o somatório de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ deve ser igual ou superior a 50% para que uma adição seja considerada como pozolânica, segundo a ASTM C 618 (2015) e NBR 12653 (ABNT, 2014; versão corrigida de 2015). A lama vermelha, a cinza de casca de arroz e o metacaulim apresentaram somatórios desses óxidos superiores a 50%, respectivamente, 98,84%, 93,51% e 91,96%.

Portanto essas três adições são consideradas pozolânicas, segundo os critérios das normas ASTM C 618 (2015) e NBR 12653 (ABNT, 2014; versão corrigida de 2015) e como era de se esperar, o fíler calcário não apresentou composição química compatível com a de um material pozolânico.

Além disso, o baixo valor da perda em ignição (LOI) indica que as condições de calcinação, realizados pelos fabricantes da cinza de casca de arroz e do metacaulim, foram capazes de eliminar os compostos ricos em carbono (VIEIRA *et al.*, 2020)

Tabela 14 - Composições químicas das adições minerais.

Componentes	Fíler calcário	Lama vermelha	Cinza de Casca de Arroz	Metacaulim
Na ₂ O			0,10%	0,08%
Al ₂ O ₃		7,33%	0,15%	38,04%
SiO ₂	2,72%	16,29%	93,30%	51,33%
K ₂ O	0,24%	0,13%	1,49%	2,80%
Fe ₂ O ₃	0,40%	75,22%	0,06%	2,59%
TiO ₂			0,01%	1,63%
CaO	94,30%	0,11%	0,50%	0,09%
MgO	0,56%	0,03%	0,30%	0,92%
SO ₃	0,25%	0,12%		0,04%
H ₂ O				0,00%
P ₂ O ₅			0,37%	0,05%
Outros	1,53%	0,77%	0,30%	
LOI			3,42%	2,43%
TOTAL	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

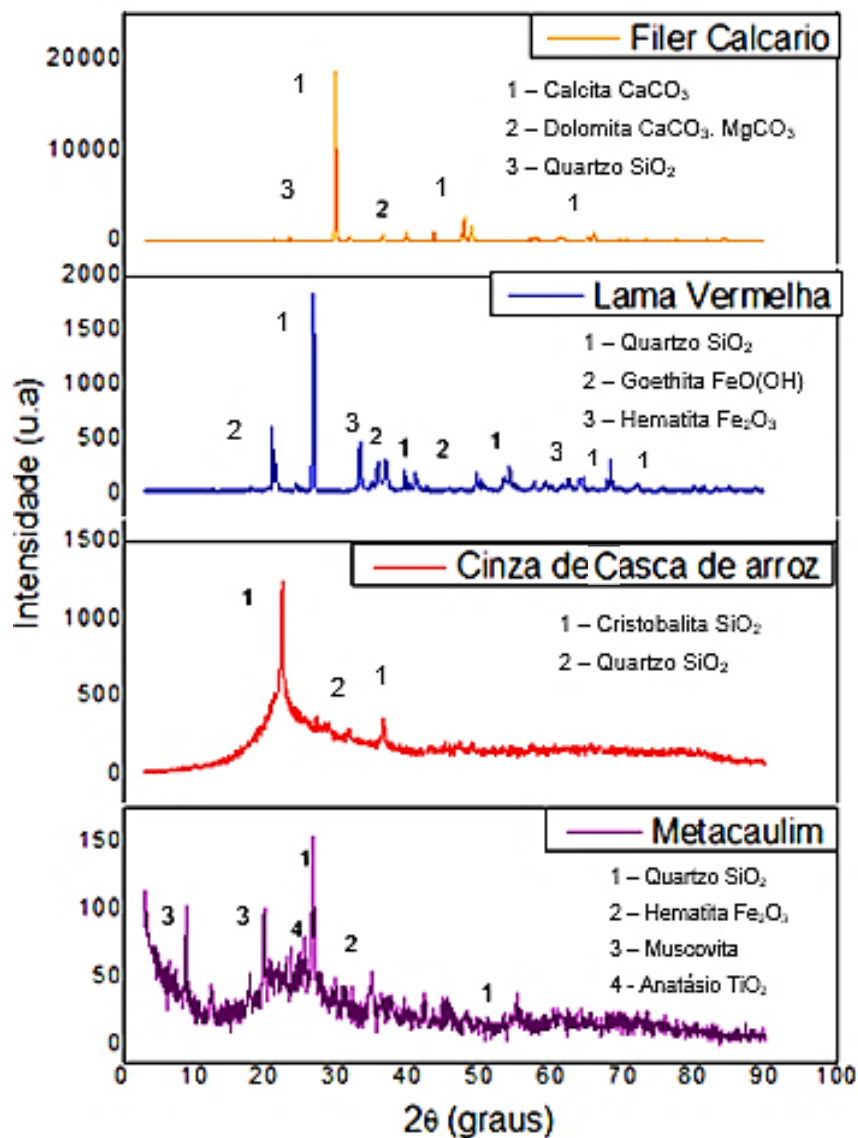
Resultados semelhantes aos obtidos para as adições de lama vermelha, cinza de casca de arroz e metacaulim podem ser encontrados nos trabalhos de Singh e Singh, (2016), Rêgo, (2004), Costa, (2020), Martins, (2019) e Dietrich *et al.*, (2017), que apresentam composições predominantemente de quartzo sílica (SiO₂), feldspato alumina (Al₂O₃) e hematita (Fe₂O₃), considerando assim, um material sílico-aluminoso, e com características de caráter pozolânico.

No entanto, a reatividade com o hidróxido de cálcio é fortemente influenciada pelo grau de amorficidade e pela superfície específica dos materiais (BENEZET & BENHASSAINE, 1999; JUENGER & SIDDIQUE, 2015). Dessa forma são necessários ensaios complementares, como Difração de Raios X e ensaios químicos para avaliar a real pozolanicidade de um material (KATARE & MADURWAR, 2020).

4.1.3 Difração de Raio X

Os resultados dos ensaios de Difração de Raios X são apresentados nas Figuras (34a, 34b, 34c e 34d) para o fíler calcário, a lama vermelha, a cinza de casca de arroz e o metacaulim.

Figura 34 – a) DRX do fíler calcário; b) DRX da lama vermelha; c) DRX da cinza de casca de arroz; d) DRX do metacaulim.



No ensaio de Difração de Raio X do fíler calcário é possível identificar os picos em $30,9^\circ$ e $50,5^\circ$ que indicam a presença do mineral dolomita (VARDHAN *et al.*, 2015), majoritariamente formado de carbonato de cálcio (CaCO_3) e carbonato de magnésio (MgCO_3). Na Difração de Raios X do fíler calcário, Figura 34a, identificou-se também a elevada presença do composto de carbonato de cálcio. Na composição química do

fíler calcário, coerente com o ensaio de DRX, verifica-se a presença predominante de óxido de cálcio (CaO) (cerca de 95% em massa). Esse comportamento também foi observado por Hoppe Filho *et al.*, (2017), Medeiros (2016) e Souza (2016).

O fíler calcário apresenta picos característicos de calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) e quartzo (SiO_2). Por outro lado, nesse material não é identificada a presença de halo amorfo no difratograma, evidenciando que tal adição apresenta um elevado grau de cristalinidade e, portanto, associada à composição química e a área específica, indica que tal adição não reagiria com o hidróxido de cálcio no ensaio de Chapelle Modificado (DEBOUCHA, *et al.*, 2017; MEDJIGBODO, *et al.*, 2018).

No difratograma de Raio X da lama vermelha verifica-se a presença das seguintes fases cristalinas: hematita, goethita, quartzo e silicatos de sódio e alumínio. Todas essas fases são coerentes com os resultados da análise química do material (Tabela 14). O alto teor de Fe_2O_3 , no EDX, justifica a presença das fases Goethita e Hematita no DRX. Resultados semelhantes foram obtidos por Martins e Pinheiro (2019), Barbosa (2019) e Martins (2019). Bastos (2014) ressalta que o ferro contido na amostra de lama vermelha é provindo da manufatura do alumínio e da sua fabricação. A estrutura cristalina da lama vermelha, mostrada na Figura 34b, associada à sua composição química, mostrada na Tabela 14, pode indicar que o material não apresentará característica pozolânica. No entanto, é importante avaliar estes resultados associados com os valores obtidos nos ensaios de Chapelle Modificado e na termogravimetria.

No difratograma de Raio X da cinza de casca de arroz foi identificada a presença de picos cristalinos correspondentes ao quartzo entre 25 e 35 graus e a cristobalita (SiO_2) entre 20 e 25 graus, que tem uma estrutura cristalina formada a altas temperaturas. De acordo com Nascimento *et al.*, (2015) a estrutura mineral, ou seja, a presença de picos de cristobalita e de fases cristalinas de quartzo no difratograma da cinza de casca de arroz se deve as características dos processos de combustão empregados e, muitas das vezes, da queima não controlada do material que atinge temperaturas mais elevadas que deveria. Os processos de combustão são de extrema relevância para a caracterização da cinza de casca de arroz, uma vez que a sílica, predominantemente presente no material, é um elemento que pode cristalizar em diferentes fases, dependendo da temperatura e da pressão adotada no processo de queima. Por outro lado, o quartzo também pode ser proveniente da contaminação no processo de coleta da casca de arroz.

Além disso, no difratograma de Raio X da cinza de casca de arroz, o desvio da linha de base entre 15 e 30 graus é indicativo da amorficidade da adição mineral, o que representa a tendência do material de apresentar maior grau de reatividade. Resultados semelhantes podem ser observados nos estudos realizados por Ocanha (2015), Cordeiro (2014), Costa (2020) e Rêgo (2004). Considerando a amorficidade da cinza de casca de arroz, sua área específica e sua composição química, é de se esperar que ela seja pozolânica. Esta tendência pode ser confirmada pelos ensaios de Chapelle Modificado e na termogravimetria.

No difratograma do metacaulim foi detectado alguns picos de fases cristalinas como quartzo ($2\theta = 26^\circ, 50^\circ$), hematita ($2\theta = 30^\circ$), muscovita ($2\theta = 10^\circ, 21^\circ$) e anatase ($2\theta = 24^\circ$), sendo o quartzo (SiO_2) o elemento mineralógico da fase cristalina mais presente no metacaulim (CABALLERO *et al.*, 2019). No entanto, a presença de uma região curva (halo) formada pelo desvio da linha de base em $2\theta = 18^\circ$ a 30° pode ser atribuída à presença de aluminossilicatos amorfos (KUENZEL *et al.*, 2019; HOPPE FILHO *et al.*, 2017; SILVA, 2019 e LINS, 2017). A presença de fases cristalina é um indício de calcinação incompleta da caulinita e a presença de picos de baixa intensidade dos cristais presentes. Embora o DRX do metacaulim defina que haja conteúdo cristalino, reforça a ideia de que a maior parte do material está em estado amorfo, o que indica o potencial reativo do metacaulim.

4.1.4 Chapelle Modificado

Na Tabela 15 são apresentados os resultados do ensaio de Chapelle Modificado para as adições de fíler calcário, de lama vermelha, de cinza de casca de arroz e de metacaulim.

Tabela 15 – Índice de pozolanicidade em teor de consumo de Ca(OH)_2 ($I_{\text{Ca(OH)}_2}$), expresso em mg/g.

Método do Chapelle Modificado	
Adições Minerais	Teor de Ca(OH)_2 (mg/g)
Fíler Calcário	117,49
Lama Vermelha	170,11
Cinza da Casca de Arroz	1156,53
Metacaulim	735,53

Na Tabela 15 é possível observar os resultados obtidos no ensaio do método do Chapelle Modificado. De acordo com Raverdy *et al.*, (1980) e Christófoli (2010) para que um material seja classificado como pozolânico, estipula-se o teor mínimo de CaO fixado igual a 330 mg/g. Isso corresponde ao teor mínimo de Ca(OH)_2 fixado igual à 435,6 mg/g (HOPPE FILHO *et al.*, 2017; QUARCIONI *et al.*, 2015). Quanto maior o teor de cal fixada, mais pozolânico é o material. Dessa forma, apenas o metacaulim e a cinza de casca de arroz podem ser identificados como adições pozolânicas, o que está, em parte, de acordo com os resultados da análise química, do ensaio BET e da Difração de Raios X.

Os dados apresentados também indicam que apesar do metacaulim apresentar elevado teor de sílica e ser amorfo ele reage em menor grau com o hidróxido de cálcio que a cinza de casca de arroz. Isto acontece, provavelmente, devido aos resultados obtidos no ensaio de Difração de Raio X. Nota-se que o metacaulim contém menor teor de fase amorfa pelo DRX do que a cinza de casca de arroz, mas possui maior valor de superfície específica. A menor pozolanidade do metacaulim em relação a cinza de casca de arroz sugere que as diferenças no teor de fase amorfa foram importantes para os índices de pozolanidade obtidos no ensaio de Chapelle Modificado. Por outro lado, o fíler calcário e a lama vermelha por possuírem baixos índices de atividade pozolânica, não poderiam ser classificados como pozolanas em relação ao ensaio de Chapelle Modificado.

A Tabela 16 indica os índices de pozolanidade do Chapelle Modificado, expressos em porcentagem (%), segundo a equação 6 no capítulo 3.2.1, que serão usados para facilitar a análise comparativa com os resultados da termogravimetria (COSTA, 2020). De acordo com o índice I_{CaO} , a cinza de casca de arroz obteve teor de cal fixada igual a 43,81%, seguido pelo metacaulim que apresentou valor de 27,86%. O fíler calcário e a lama vermelha, por sua vez, obtiveram teores de cal fixada abaixo de 10%.

Tabela 16 - Índice de pozolanicidade em teor de cal fixada (I_{CaO}), expresso em %.

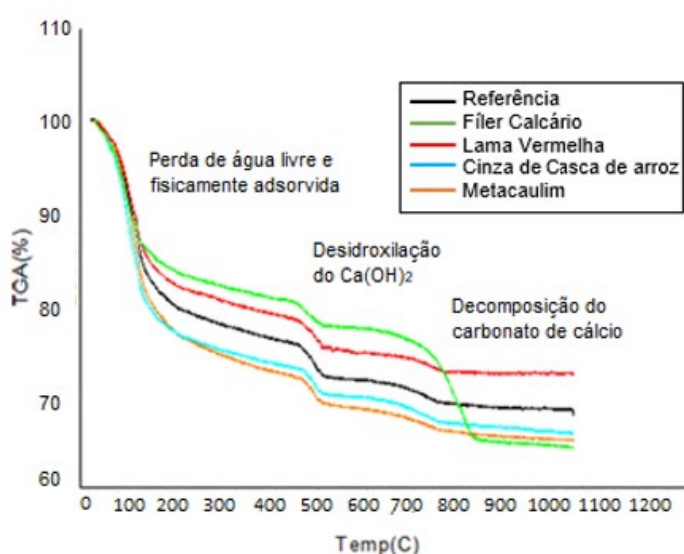
Método do Chapelle Modificado	
Adições Minerais	Teor de cal fixada (%)
Fíler Calcário	4,45
Lama Vermelha	6,44
Cinza da Casca de Arroz	43,81
Metacaulim	27,86

4.1.5 Termogravimetria

Os resultados obtidos dos ensaios de termogravimetria feitos sobre a amostra de pasta de cimento confeccionada a temperatura ambiente de 23°C com a substituição de 10% do cimento por adições minerais, em massa, estão dispostos nas Figuras 35 e 36.

Com os dados das curvas TGA e DTG foi possível o acompanhamento da evolução da hidratação das pastas ao longo do tempo e a estimativa, para cada situação, das perdas de massas dos compostos de hidratação do cimento, e, assim, avaliar o teor de hidróxido de cálcio presente, conforme método descrito por Hoppe Filho *et al.*, (2017) e Rupasinghe *et al.*, (2017).

Figura 35 - Curvas de TGA das pastas de referência e com 10% de substituição por fíler calcário, lama vermelha, cinza de casca de arroz e metacaulim.



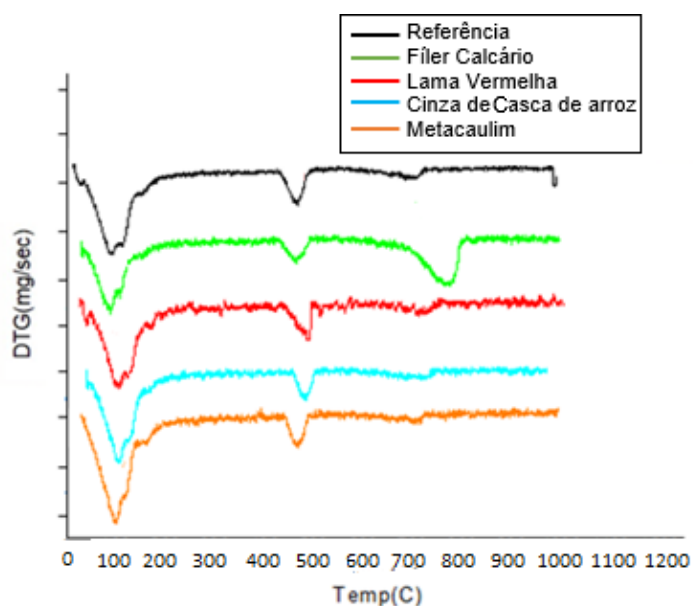
Segundo Cordeiro (2014), as reações de hidratação do cimento consistem na formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), além de outros hidratados e do hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 . Os produtos são formados a partir da reação dos compostos do cimento (C_2S , C_3S , C_3A e C_4AF) com a água. A partir das curvas de TGA/DTG, foram obtidas as perdas de massa estimadas dos compostos de hidratação do cimento, conforme descrito por Soares (2017).

A Figura 36 apresenta as curvas (TGA/DTG) da pasta de referência e das pastas com adições minerais nas idades de 28 dias de hidratação. Nos gráficos de análises térmicas (TGA) pôde-se observar três etapas de perda de massa, o primeiro evento ocorre entre a temperatura 30° a 400°C e corresponde à desidratação dos compostos silicato de cálcio hidratado (C-S-H), etringita e monossulfato de cálcio hidratado (C_4AH_{13}), ou seja, refere-se à eliminação da água livre e da água associada ao C-S-H (SONG *et al.*, 2018; MENEZES, *et al.*, 2020 e MARTINS, 2019). O segundo ocorre numa faixa estreita em torno de 450°C , onde ocorre a decomposição do hidróxido de cálcio (GHODDOUSI & ADELZADE SAADABADI, 2017 e COSTA, 2020). O último evento acontece à 690°C e está relacionado à decomposição do carbonato de cálcio e à liberação de CO_2 . (DEBOUCHA, *et al.*, 2017).

De acordo com Rodrigues *et al.*, (2010) a perda de massa de água combinada do silicato de cálcio hidratado ocorre entre 50°C a 300°C ; a desidratação desse silicato no que se refere à água interna se daria a 350°C ; a saída da água adsorvida do silicato de cálcio hidratado seria em torno de 400°C ; entre 410°C - 580°C seria identificada a desidratação do hidróxido de cálcio; e de 520°C a 900°C a decomposição do carbonato de cálcio.

A importância das curvas TGA/DTG é que possibilitam o acompanhamento da evolução da hidratação das pastas ao longo do tempo, além de analisar a hipótese de pozolanicidade de uma amostra por quantificação do consumo do hidróxido de cálcio para produção de C-S-H.

Figura 36 - Curvas da primeira derivada da termogravimetria (DTG) das pastas de referência e com 10% de substituição do cimento por fíler calcário, lama vermelha, cinza de casca de arroz e metacaulim.



Na curva TGA e DTG referente a decomposição do hidróxido de cálcio das amostras de cimento CPV com 10% de substituição por cinza de casca de arroz e metacaulim, foi observado uma leve diminuição do pico em relação ao de referência. De acordo com Lins (2017) a diminuição do pico mostra a evolução no consumo do hidróxido de cálcio pela pozolana. Segundo Lins (2017), verifica-se que os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) tendem a aumentar na reação pozolânica. Isso pode ser atribuído ao consumo de hidróxido de cálcio pela adição pozolânica na reação para produção do C-S-H.

Em virtude da substituição parcial do cimento pela cinza de casca de arroz e pelo metacaulim, a sílica presente no material reage com o Ca(OH)_2 , e, assim, consome a portlandita. Essa reação pozolânica resulta em uma diminuição do teor de hidróxido de cálcio na pasta de cimento endurecida, e, desta forma, sendo necessária uma quantidade menor de dióxido de carbono para reagir com o hidróxido de cálcio para a produção de carbonato de cálcio. Segundo Ocanha (2015), a quantificação do Ca(OH)_2 consumido, verificado por termogravimetria, resulta na quantidade consumida pela reação pozolânica e uma pequena quantidade pela carbonatação.

Nas curvas de TGA/DTG da lama vermelha pode-se identificar que a primeira perda de massa pode ser atribuída à perda de água livre e adsorvida fisicamente. A segunda perda de massa pode ser atribuída a desidroxilação do Ca(OH)_2 e a

decomposição da gibbsita $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ e da boemita $[\gamma\text{-AlO}(\text{OH})]$, componentes da bauxita $[\text{Al}_2\text{O}_3]$ (MARTINS, 2019). Nessa faixa de temperatura, de aproximadamente 450°C , também pode ocorrer a perda de água superficial ou quimicamente adsorvida, e a decomposição da goethita $[\text{FeO}(\text{OH})]$ para a formação da hematita (Fe_2O_3) (LIU *et al.*, 2011 e BOMENI *et al.*, 2018).

A Tabela 17 mostra os teores de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presentes nas pastas de cimento após 28 dias de cura. As pastas contendo cinza de casca de arroz e metacaulim apresentaram menor teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ do que a pasta referência. Assim, quanto maior a atividade pozolânica do material adicionado ao cimento, menor a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ detectado na pasta (COSTA, 2020). Deste modo, a cinza de casca de arroz apresentou maior pozolanicidade em pasta de cimento do que o metacaulim. A pasta de lama vermelha teve teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ próximo ao da pasta de referência e a pasta contendo fíler calcário obteve valores de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ superior ao de referência. A maior quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ do fíler calcário se deve, provavelmente, a maior quantidade de calcita em sua composição química e pela sua natureza calcária.

Tabela 17 - Teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ medido por Termogravimetria.

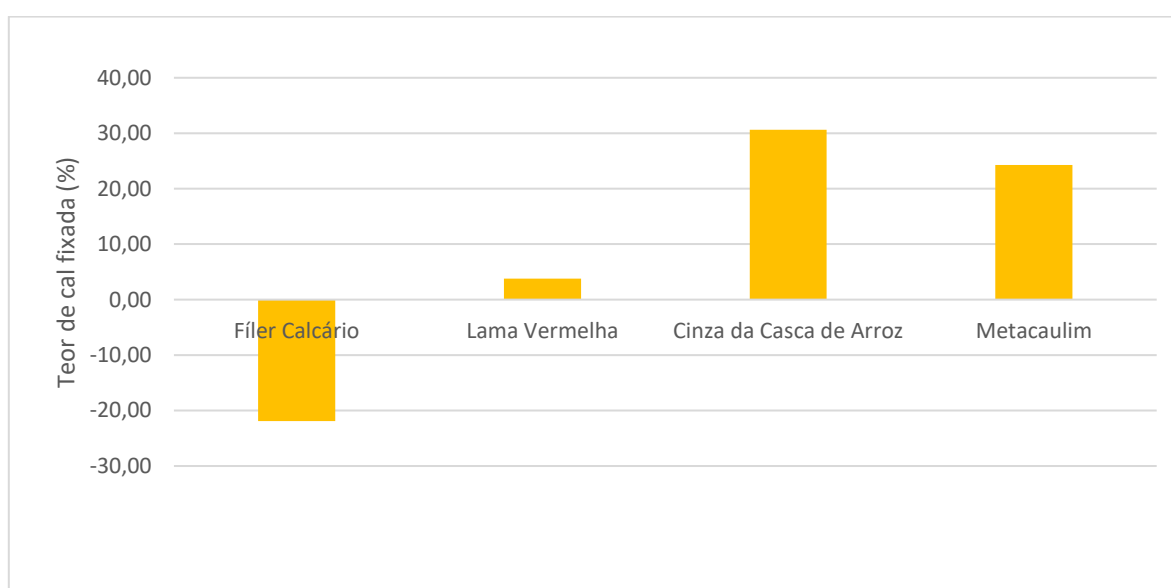
Termogravimetria	
Adições Minerais	Teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)
Referência - 100%	25,22
Fíler Calcário	27,67
Lama Vermelha	21,84
Cinza da Casca de Arroz	15,74
Metacaulim	17,19

Nas pastas contendo as adições minerais analisada, houve a redução do teor de clínquer no cimento de 100% para 90%, o que pode implicar em menor quantidade de produtos formados pela hidratação do clínquer (RUPASINGHE *et al.*, 2017 e COSTA, 2020). Para isolar o efeito de diminuição do clínquer, os teores de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ das pastas avaliadas foram comparados com o teor da pasta de referência multiplicado por 0,90, pois cada pasta contém 90% de cimento CPV. Com base nessa comparação e na diferença entre o teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de cada pasta de cimento e a pasta de referência foi possível calcular, utilizando a Equação 7, o teor de cal fixada pelos materiais (Tabela 18 e Figura 37).

Tabela 18 - Teor de cal fixada (%) medido por Termogravimetria.

Termogravimetria	
Adições Minerais	Teor de cal fixada (%)
Fíler Calcário	-21,91
Lama Vermelha	3,78
Cinza da Casca de Arroz	30,65
Metacaulim	24,26

Figura 37 - Teor de cal fixada pelas pastas de cimento por Termogravimetria.



A cinza de casca de arroz apresentou, no ensaio de termogravimetria, o maior teor de cal fixada em pasta de cimento, seguido pelo metacaulim. Além disso, a cinza de casca de arroz e o metacaulim apresentaram também maiores pozolanidades no ensaio de Chapelle Modificado. No ensaio de termogravimetria o índice de pozolanidade da cinza de casca de arroz e do metacaulim foram menores do que os encontrados no ensaio de Chapelle Modificado. Na termogravimetria, o teor de cal fixada da lama vermelha foi próximo a zero, indicando uma baixa pozolanidade deste material durante a hidratação do cimento. A pasta com fíler calcário apresentou teor de cal fixada negativo porque o teor de Ca(OH)_2 na pasta com fíler foi superior ao valor da pasta de referência multiplicado por 0,90.

O teor de cal fixada negativo na pasta de cimento contendo fíler calcário e o declínio acentuado de massa entre 600 -725 °C está associada à elevada quantidade de calcita presente na composição química do fíler calcário e, conseqüentemente, ao

alto índice de decomposição desse mineral ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) (DEBOUCHA *et al.*, 2017 e MEDJIGBODO *et al.*, 2018). A baixa reatividade da calcita com o Ca(OH)_2 e a característica de efeito fíler da adição mineral pode ter proporcionado um aumento no teor de hidróxido de cálcio em relação a pasta de referência.

4.1.6 Comparação entre resultados do Chapelle Modificado e Termogravimetria (TGA) em pasta de cimento

A análise comparativa dos resultados obtidos no ensaio de Chapelle Modificado e no TGA em pasta de cimento é indicada na Tabela 19 e na Figura 38. Nas pastas de cimento, empregadas na termogravimetria (TGA), as reações pozolânicas tendem a se intensificar somente após o ápice de hidratação do cimento, quando o endurecimento das pastas já se iniciou, o que reduz o espaço físico disponível para essas reações pozolânicas com o avanço da idade de cura das pastas (LOTHENBACH, SCRIVENER & HOOTON, 2011). Além disto, a cura das pastas no ensaio de TGA ocorre em temperatura ambiente. No ensaio de Chapelle Modificado, utiliza-se uma porção de material (1 grama) que é diluída em 250 ml de uma solução supersaturada de Ca(OH)_2 , sob temperatura elevada ($90\text{ }^\circ\text{C}$), durante 16 horas, o que poderia estimular a taxa de reação pozolânica (COSTA, 2020). Assim, pode-se presumir que o ensaio de Chapelle Modificado propiciou condições mais favoráveis para acelerar as reações pozolânicas, resultando em valores maiores de cal fixada, conforme indica a Tabela 19 e Figura 38.

Outro fator que poderia explicar os comportamentos das adições pozolânicas no ensaio de Chapelle Modificado e na termogravimetria, em primeiro momento, é o efeito da aglomeração das partículas da cinza de casca de arroz e do metacaulim durante a confecção e cura das pastas de cimento no ensaio de TGA (COSTA, 2020).

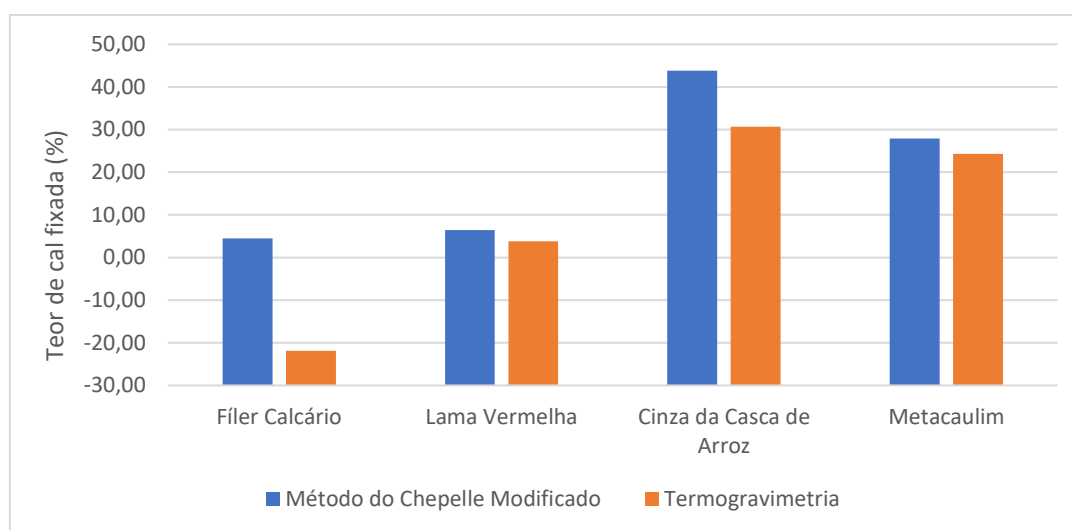
Na análise de TGA, as pastas de cimento são previamente curadas sob condições menos severas de exposição ao Ca(OH)_2 , mas com tempo prolongado de cura por imersão em água (28 dias) (COSTA, 2020). Estas condições menos favoráveis às reações poderiam tornar mais evidente os efeitos de aglomeração de partículas nas reações pozolânicas. Isto poderia explicar por que a cinza de casca de arroz e o metacaulim obtiveram maior pozolanicidade no ensaio de Chapelle Modificado e valores mais baixos de atividade pozolânica na análise de TGA. Ou seja, as condições mais propícias para reação no ensaio de Chapelle poderiam atenuar o efeito da aglomeração de partículas, propiciando um aumento do índice de

pozolanicidade. Assim, o decréscimo do índice de pozolanicidade da cinza de casca de arroz e do metacaulim no ensaio de TGA pode ser, em um primeiro momento, mais em função das áreas de superfícies específicas das partículas do que em relação aos teores de sílica e da quantidade de suas fases amorfas (COSTA, 2020).

Tabela 19 - Teor de cal fixada (%) nas pastas de cimento no ensaio de Chapelle Modificado e na análise termogravimétrica.

Índices de pozolanicidade - Teor de cal fixada (%)		
Adições Minerais	Método do Chapelle Modificado	Termogravimetria
Fíler Calcário	4,45	-21,91
Lama Vermelha	6,44	3,78
Cinza da Casca de Arroz	43,81	30,65
Metacaulim	27,86	24,26

Figura 38 - Teor de cal fixada (%) nas pastas de cimento no ensaio de Chapelle Modificado e na análise termogravimétrica.



Na análise dos gráficos de correlação entre os ensaios de Chapelle Modificado e a termogravimetria (TGA) é possível observar que as duas técnicas possuem comportamento semelhante quanto ao índice de atividade pozolânica. Nos dois ensaios pode-se identificar que a cinza de casca de arroz é a adição com maior atividade pozolânica, seguida do metacaulim. O fíler calcário e a lama vermelha são materiais com características não pozolânicas. Por outro lado, percebe-se que no ensaio de TGA os valores dos índices de pozolanicidade das adições pozolânicas

foram menores que nos ensaios de Chapelle Modificado, conforme discutido anteriormente

4.1.7 Massa específica

Os resultados dos ensaios de massa específica pelo método de Lê Chatelier, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017), pode ser visto na Tabela 20. Resultados semelhantes foram encontrados por outros pesquisadores (MOTA, 2016; MARTINS 2019; RÊGO, 2004; SINGH & SINGH, 2017; ARAUJO, 2019).

Tabela 20 – Resultado de massa específica das adições minerais estudadas.

Massa específica	
Adições Minerais	Massa específica (Kg/dm ³)
Fíler Calcário	2,70
Lama Vermelha	2,43
Cinza da Casca de Arroz	2,17
Metacaulim	2,56

4.2 Caracterização dos concretos

4.2.1 Conformidade do traço

O concreto no estado fresco foi avaliado quanto a sua consistência por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, de forma a verificar se atendia a premissa de S100, segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015), estabelecida no traço inicial. A Tabela 21 mostra os abatimentos medidos (*slump*). A consistência do traço de referência atendeu a premissa inicial (S100), a qual admite *slump* de 100mm a 160mm. Apesar do uso de aditivo superplastificante, conforme descrito no Item 3.1, não foi possível compensar completamente o efeito das adições mais finas na demanda de água e consequente diminuição da trabalhabilidade.

Tabela 21 – Consistência dos concretos com e sem adições minerais.

Abatimento do cone	
Adições Minerais	Slump Test 0,45 (cm)
Sem adição	11,50
Fíler Calcário	8,5
Lama Vermelha	7,5
Cinza de Casca de Arroz	7,0
Metacaulim	7,5

Porém, é possível verificar que mantendo a relação água/aglomerante constante, de 0,45, nas dosagens, a tendência das adições minerais é de absorver uma maior quantidade de água da mistura e diminuir a plasticidade do concreto. Segundo Rodrigues *et al.*, (2010), a mistura com pozolanas pode exigir maior relação água/aglomerante, em função do tamanho das partículas, visto que quanto mais fina for a adição, maior será a quantidade de água requerida na mistura.

A demanda de água de uma mistura está relacionada com a superfície específica e com a densidade de empacotamento das partículas. Quanto maior for a área superficial, menor será a densidade de empacotamento e maior será a demanda de água (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009). Um material pozolânico muito fino e, conseqüentemente, com superfície específica mais elevada do que a do cimento, como é o caso do metacaulim, da cinza de casca de arroz e até mesmo da lama vermelha e do fíler calcário estudados, aumenta a demanda de água superficial, diminuindo a quantidade de água de preenchimento dos poros, mas não altera a quantidade total de água no sistema (ZHANG *et al.*, 1996). Assim, mantendo-se a área superficial constante, quanto mais estreita for a distribuição granulométrica das partículas, maior será a demanda de água para se obter uma mistura com trabalhabilidade adequada (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009).

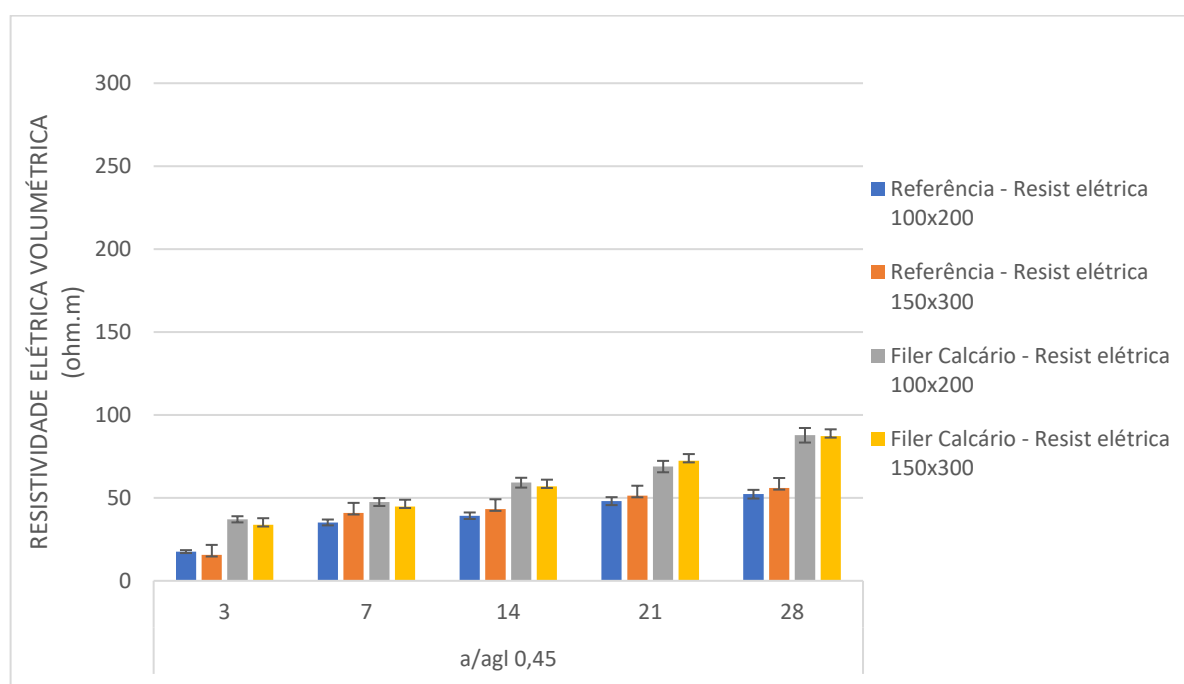
Embora as adições tenham diminuído as consistências dos concretos avaliados por meio do *slump test*, esse fato não implicou em dificuldade de moldar adequadamente os corpos de prova.

4.2.2 Influência das dimensões dos corpos de prova

Nos gráficos das Figuras 39 e 40 são apresentados os resultados das resistividades elétricas volumétrica e superficial, respectivamente, dos concretos com e sem adição de fíler calcário e com relação a/agl de 0,45, nas idades de 3, 7, 14, 21 e 28 dias.

Na Figura 39 pode-se observar os resultados dos ensaios de resistividade elétrica volumétrica para os corpos de prova 100x200mm e 150x300mm. Observa-se que a resistividade elétrica volumétrica não é significativamente influenciada pelas dimensões dos corpos de prova, embora aos 7 dias houve uma variação um pouco maior entre o concreto de referência 100x200mm e 150x300mm. Para a adequada medição da resistividade elétrica volumétrica, o equipamento adotado para a realização dos ensaios foi adaptado de acordo com as dimensões dos corpos de prova. Isso indica que a quantidade de corrente elétrica alternada que passa pelo corpo de prova é a mesma independente das dimensões que ele possua. Isso também reforça que a resistividade elétrica volumétrica representa uma característica de toda a massa do concreto avaliado e da sua qualidade.

Figura 39 – Resistividade elétrica volumétrica em corpos de prova 100x200mm e 150x300mm.

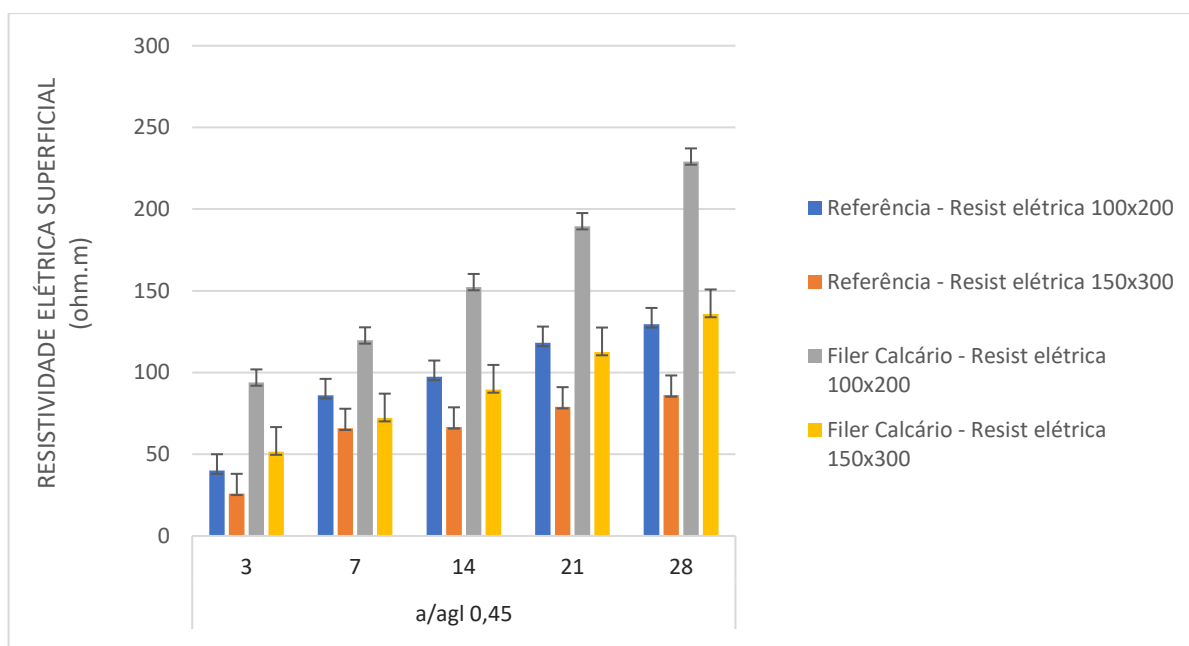


Os ensaios de resistividade elétrica volumétrica e superficial realizado até os 28 dias para as duas dimensões de corpos de prova, possuem coeficientes de variação máximos de aproximadamente 4% e 6%, respectivamente. Isso representa estatisticamente, de acordo com a Tabela 9 do item 3.2.3, que os concretos possuem baixa amplitude nos resultados de resistividades e característica de maior homogeneidade. A análise estatística por meio do coeficiente de variação também

pode ser encontrada em outras pesquisas, como em Lage (2018), Soares Jr. (2019); Costa (2020).

Na a Figura 40 é possível observar os resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial para os corpos de prova 100x200mm e 150x300mm.

Figura 40 – Resistividade elétrica superficial em corpos de prova 100x200mm e 150x300mm.



Os resultados da resistividade elétrica superficial foram maiores para os corpos de prova de concretos de dimensões 100x200mm para todas as situações analisadas, comprovando que as dimensões dos corpos de prova são determinantes para a medição da resistividade elétrica superficial. Isso acontece, segundo o fabricante do equipamento usado, a Proceq, porque o Resipod com espaçamento entre os eletrodos de 50mm, somente permite medidas válidas em corpos de prova com $d/a \leq 4$ e $L/a \geq 5$, sendo “d” o diâmetro do cilindro, “a” o espaçamento entre os eletrodos e “L” a altura do cilindro. Ou seja, pode-se comprovar que os corpos de prova cilíndricos 100x200mm não devem ser empregados para medir a resistividade elétrica superficial pelo Resipod de 50mm de afastamento entre os eletrodos (a), uma vez que por não possuir as dimensões necessárias está sujeito a ocorrência de vazão da corrente elétrica durante o procedimento da medição de resistividade elétrica superficial, ocasionando em resultados incoerentes. Apenas o corpo de prova de dimensões 150x300mm (diâmetro - altura), permite a medição completa do bulbo de corrente elétrica gerada pelo aparelho. Esses resultados permitiram estabelecer as dimensões

dos corpos de prova a serem empregados no estudo da resistividade superficial.

4.2.3 Influência do material nas propriedades do concreto

A influência das adições minerais nas propriedades do concreto foi avaliada em corpos de prova de concreto com ou sem adições minerais, com relação a/agl de 0,45 e aditivo superplastificante, a base de policarboxilato, na dosagem de 0,5%.

a) Absorção por imersão e índices de vazios

Os resultados e a amplitude dos valores obtidos de absorção de água por imersão e índice de vazios são apresentados nas Figuras 41 e 42, respectivamente. Nestes ensaios é possível avaliar a porosidade dos concretos e sua permeabilidade no período de análise. Embora os valores de absorção por imersão tenham sido inferiores aos encontrados na literatura (Araújo, 2019), para um concreto de resistência de 30MPa, foi possível comparar o desempenho dos concretos com adições em relação ao concreto de referência.

Figura 41 – Absorção por imersão em água.

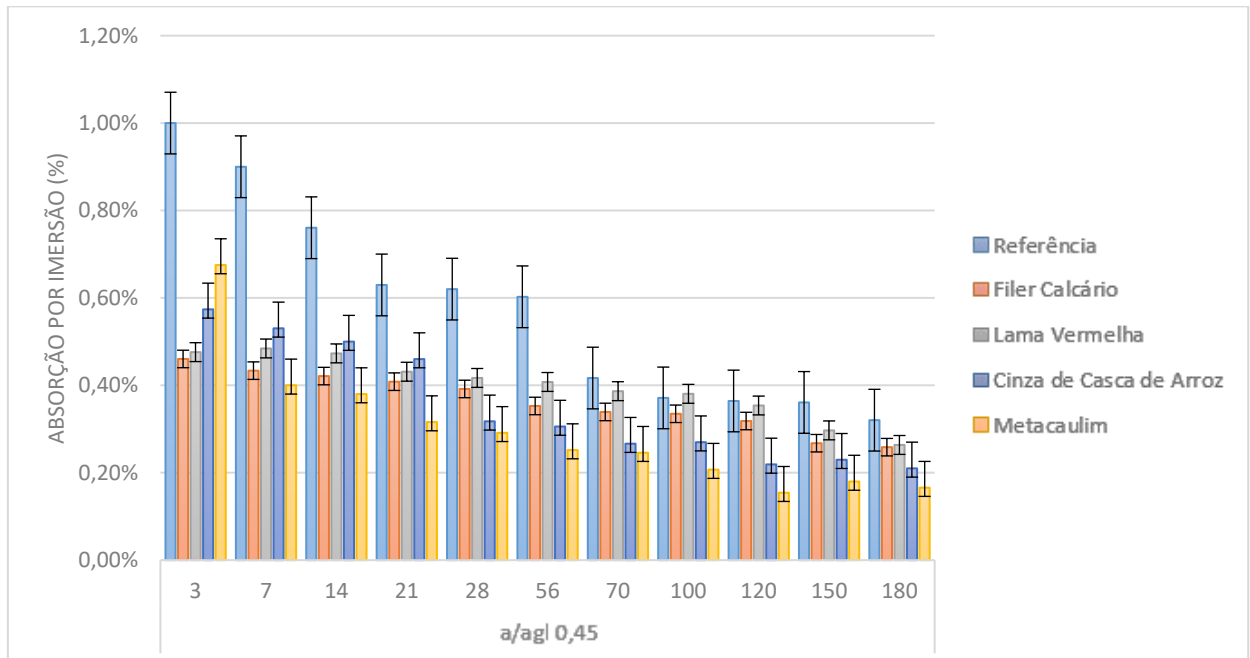
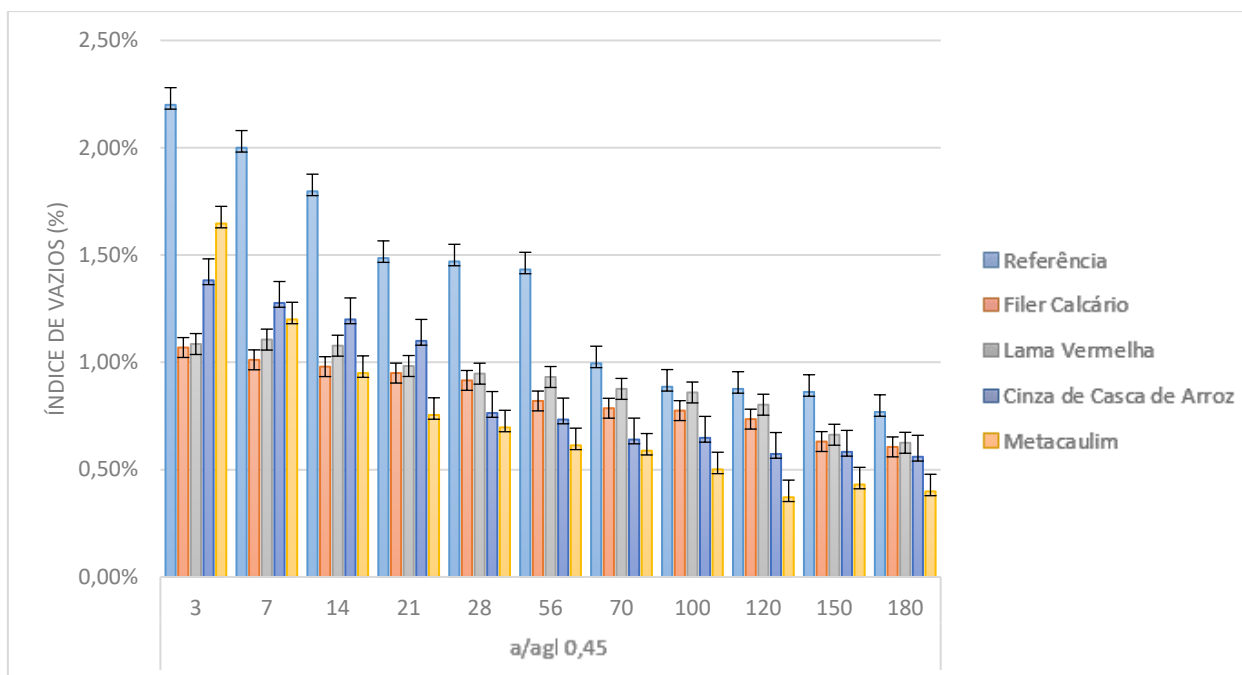


Figura 42 – Índices de vazios do concreto.



Os dados indicam que aos 180 dias os corpos de prova obtiveram valores de absorção por imersão de 0,32% para os concretos de referência, 0,26% para os com fíler calcário, 0,26% para os com lama vermelha, 0,21% para os com cinza de casca de arroz e de 0,17% para os compostos com metacaulim. Enquanto para os índices de vazios os resultados foram de 0,77% para os concretos de referência, 0,61% para os com fíler calcário, 0,63% para os com lama vermelha, 0,56% para os com cinza de casca de arroz e de 0,40% para os compostos com metacaulim. Isso representa uma diferença máxima de aproximadamente 50% entre o concreto sem adições e com adição de metacaulim para a absorção por imersão e de 48% para os índices de vazios.

Os dados indicam coeficientes de variação de aproximadamente 12% para os ensaios de absorção por imersão e 16% para os ensaios de índices de vazios, o que sugere, de acordo com a Tabela 9, uma homogeneidade razoável dos corpos de prova estudados, com uma dispersão moderada dos resultados em relação à média. A proporção de diminuição da absorção e dos índices de vazios do concreto e a sua queda monotônica ao longo da idade do concreto indicam que as adições minerais promoveram um refinamento dos poros e, conseqüentemente, uma redução na conectividade desses poros. Estes poros, em função de sua menor dimensão, não influenciaram os módulos de elasticidade que seriam afetados por vazios capilares e microfissuras de maiores dimensões (MEHTA & MONTEIRO, 2014)

Conclui-se que a incorporação de adições minerais em substituição parcial a massa do cimento Portland no concreto, está associada a uma menor absorção de água por imersão e menor índice de vazios para todos os casos analisados em comparação com o concreto de referência (sem adição), independente da pozolanicidade do material (efeito fíler e pozolânico). Isto indicaria que as adições não pozolânicas, ou que não reagiram totalmente, estariam atuando como fíleres, preenchendo os vazios ou servindo como agentes nucleantes (BIRICIK & SARIER, 2014; SHUI *et al.*, 2010). Fonseca (2016) e Diniz (2018) observaram características semelhantes nos concretos com adições minerais.

No caso das cinzas de casca de arroz e do metacaulim o fato das adições diminuírem a porosidade dos concretos estaria relacionada ao efeito pozolânico, uma vez que essas adições tem a característica de reagir com o hidróxido de cálcio e formar silicatos secundários que atuam na porosidade do material. Enquanto o fíler calcário e a lama vermelha têm a propriedade de fíleres, ou seja, possuem partículas finas responsáveis pelo preenchimento de vazio entre os grãos de cimento, pela modificação do empacotamento granular e pela alteração na nucleação e na porosidade do concreto.

Nos gráficos de absorção por imersão e índices de vazios, Figuras 41 e 42, é possível analisar que o efeito pozolânico, de refinamento dos poros, é mais eficiente na porosidade do concreto à medida que avança a idade, sendo que aos 180 dias os concretos com adições pozolânicas são os que apresentam menores índices de vazios. Enquanto o efeito fíler ficou mais evidente nas primeiras idades, obtendo resultados sempre melhores em relação ao concreto de referência.

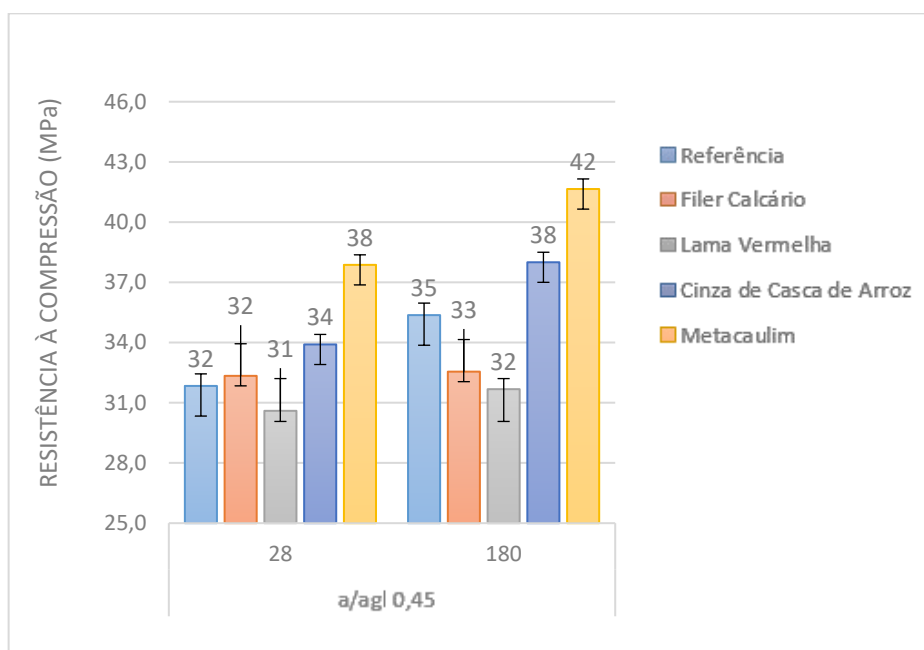
b) Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão dos concretos foram realizados nas idades de 28 e 180 dias, sendo rompidos três corpos de prova por traço aos 28 dias e seis corpos de prova por traço aos 180 dias. Esses resultados são apresentados na Figura 43. Os concretos aos 28 dias obtiveram resistência máxima, de aproximadamente 38 MPa e aos 180 dias de 42MPa, para os concretos com metacaulim.

No gráfico da resistência à compressão, Figura 43, é possível observar que as adições minerais pozolânicas podem melhorar a resistência do concreto em, aproximadamente, 12% e beneficiar em seu desempenho estrutural e em sua

aplicabilidade, como observado também por Gomes (2015).

Figura 43 – Resistência à compressão.



Baseado na análise dos resultados apresentados na Figura 43, destaca-se que as adições minerais que caracterizam-se por alto índices de atividades pozolânicas, como é o caso do metacaulim e da cinza de casca de arroz, de acordo com o resultado do ensaio de Chapelle Modificado, provocaram um aumento na resistência à compressão axial dos concretos, acentuado com o avanço da idade, se comparados aos que possuem apenas características de fileres.

No ensaio de resistência à compressão é possível observar que o metacaulim, apesar de ter um índice de pozolanicidade menor que o da cinza de casca de arroz, apresenta, no concreto, um maior valor de resistência mecânica. Isso pode estar associado a influência da sua maior área superficial e ao consequente efeito de preenchimento e nucleação dos poros do concreto, o que levou a obtenção de maiores resistência à compressão. Com isso, pode-se verificar, então, que o metacaulim, por possui características de finuras superiores à da cinza de casca de arroz, levou a uma menor porosidade no concreto e, conseqüentemente, a uma maior resistência à compressão.

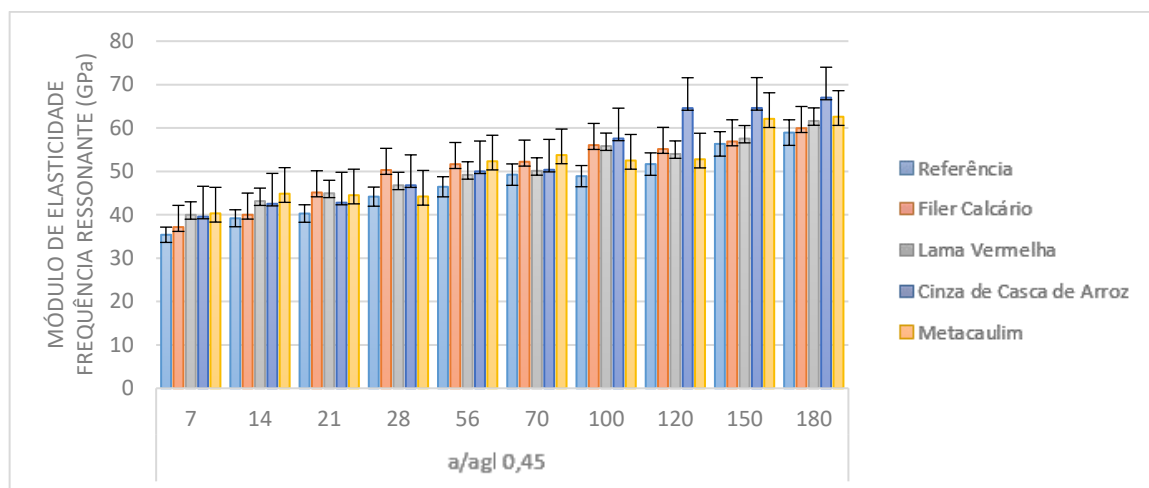
Com o uso das barras de erros presentes no gráfico é possível perceber que os resultados das resistências à compressão foram de pequena variação em relação à média, para todas as dosagens estudadas. Isso sugere, de acordo com a Tabela 9,

uma boa uniformidade dos corpos de prova na resistência mecânica à compressão, sendo obtidos resultados máximos de coeficientes de variação de 11% e médios de 7,5% (SOARES JR., 2019; COSTA, 2020).

c) Módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada e módulo de elasticidade estático

Os resultados dos módulos de elasticidade por frequência ressonante e do módulo de elasticidade estático, durante a evolução da hidratação do concreto, são apresentados nas Figuras 44 e 45, respectivamente. Na Figura 44 em que são apresentados os resultados do módulo de elasticidade por frequência ressonante é possível observar que concretos com adições minerais apresentaram um aumento em sua rigidez em relação ao concreto de referência, sem adição, como observado também por Gomes (2015). Pode-se identificar que o módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada foi influenciado pela pozolanicidade e pelo efeito fíler das adições minerais.

Figura 44 – Módulo de elasticidade por frequência ressonante.



Analisando os valores apresentados na Figura 44, os resultados médios obtidos do módulo de elasticidade dinâmico por frequência ressonante apresentam tendência de crescimento ao longo do ciclo do ensaio. Ou seja, com o avanço da idade, o valor do módulo de elasticidade em todas as misturas evidencia um aumento significativo.

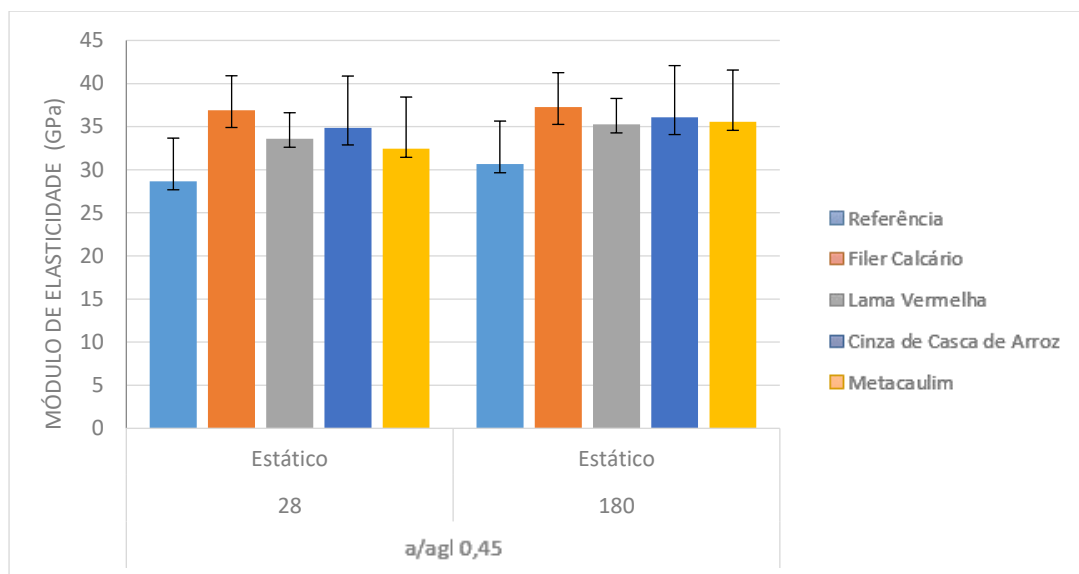
O uso de adições minerais pozolânicas e fíleres em substituição parcial ao cimento interfere de modo significativo no valor do módulo de elasticidade por frequência ressonante, apresentando, assim, resultados superiores ao do concreto de

referência e diferentes do obtido na resistência à compressão (Figura 43). Além disso o módulo de elasticidade por frequência ressonante do concreto com adições dos fíleres (fíler calcário e lama vermelha) apresentaram resultados estatisticamente semelhantes entre si. O mesmo comportamento estatístico pode ser observado nos resultados das adições minerais pozolânicas (cinza de casca de arroz e metacaulim) que proporcionaram alterações de mesma proporção no concreto, embora aos 120 dias a cinza de casca de arroz tenha apresentado um crescimento maior em relação ao concreto com metacaulim.

Os gráficos dos módulos de elasticidade não são análogos aos que mostram os resultados da resistência mecânica à compressão, sendo que as adições minerais interferem nessas propriedades de formas diferentes. O coeficiente de variação máximo de 13% e médio de 9% indicam uma uniformidade razoável dos resultados obtidos de módulo de elasticidade dinâmico e estático, segundo a Tabela 9 imposta por Pimentel (1985). Isso pode ser observado nos gráficos das Figuras 44 e 45, cujos resultados dos concretos, no aspecto estatístico, não obtiveram amplitudes e variações significativas em relação à média.

No gráfico da Figura 45, referente aos resultados de módulo de elasticidade estático, verifica-se que entre as idades de 28 dias e 180 dias, ocorreu um aumento de rigidez em valores absolutos em torno de 6,5% para o concreto de referência, 2% para o com fíler calcário, 4% para o com lama vermelha, 3% para o concreto com cinza de casca de arroz e 9% para o concreto com metacaulim. Nesse sentido, tem-se aos 180 dias o valor máximo de, aproximadamente, 37 GPa para o concreto com fíler calcário e o valor mínimo de, aproximadamente, 31GPa para o concreto de referência.

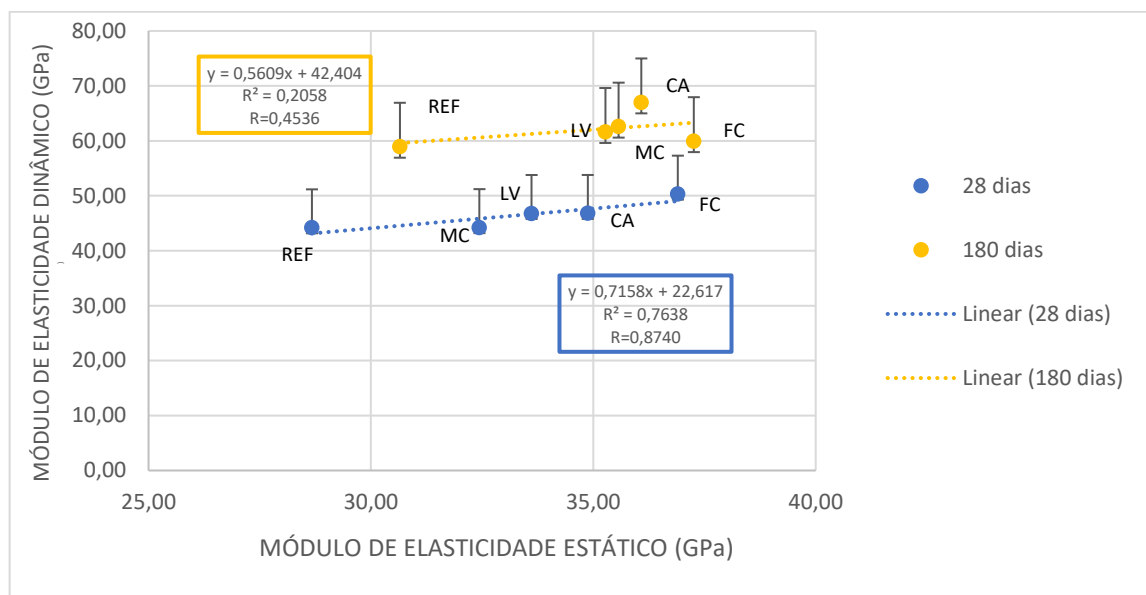
Figura 45 – Módulo de elasticidade estático.



No gráfico da Figura 45 é possível perceber que a substituição de 10% da massa de cimento por adições pozolânicas ou com efeito fíler indica um aumento de rigidez significativo no concreto, obtendo valores de módulo de elasticidade estático superiores quando comparado com o módulo estático do concreto de referência.

A Figura 46 apresenta a correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático aos 28 e 180 dias. Como pode ser analisado no gráfico da Figura 46, aos 180 dias, o concreto de referência apresenta valores de módulo estático de 30,65 GPa e de módulo por frequência ressonante de 58,93 GPa, o concreto com fíler calcário possui os resultados de 37,26GPa de módulo estático e 59,95 GPa para o módulo dinâmico e o concreto com cinza de casca de arroz, apresenta os valores de 36,08GPa e 67GPa, respectivamente. A diferença entre os módulos do concreto de referência e os módulos do concreto com adição de cinza de casca de arroz, por exemplo, representa menos de 15% para ambos os módulos de elasticidade.

Figura 46 – Correlação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico.



Nos resultados de módulo de elasticidade por frequência ressonante nota-se que todas as misturas que contêm adições minerais apresentaram valores com variações significativas em comparação com o concreto de referência. O mesmo desempenho pode ser analisado no módulo de elasticidade estático. As porosidades dos concretos com adições minerais, mesmo com a sua menor dimensão, influenciaram os módulos de elasticidade estático e dinâmico do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Os pequenos vazios capilares e as menores dimensões das microfissuras favoreceram o aumento dos módulos de elasticidade estático e dinâmico dos concretos com adições pozolânicas (cinza de casca de arroz e metacaulim) e com efeito fíler (fíler calcário e lama vermelha).

A diferença entre os valores de módulo de elasticidade por frequência ressonante (dinâmico) dos concretos foi superior, em comparação com o módulo de elasticidade estático (ALMEIDA, 2012). É notável que o ensaio do módulo dinâmico, neste caso, apresentou os resultados em um intervalo de amplitude maior do que em relação ao ensaio de módulo estático.

Os valores de módulos de elasticidade nas duas idades analisadas, 28 dias e 180 dias, possuem uma tendência aproximada (ARAÚJO *et al.*, 2018). A curva de regressão mais adequada aos dados foi a gerada pela função linear, cujos valores dos coeficientes de correlação (R) foram superiores a 0,87 aos 28 dias e superiores a 0,45 aos 180 dias. Observando a relação imposta na Tabela 10, esse valor de R indica

que existe uma correlação forte entre os módulos de elasticidade aos 28 dias e uma correlação moderada aos 180 dias.

A correlação entre os módulos de elasticidade não é facilmente determinada pela análise do comportamento físico do material, pois a heterogeneidade do concreto influencia nos dois módulos de maneiras distintas (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009). Porém, na presente pesquisa, os resultados obtidos de módulo de elasticidade dinâmico foram 40 % superiores aos módulos de elasticidade estático. De acordo com Almeida (2012) e Castro & Pandolfelli (2009), o módulo de elasticidade dinâmico é indicado como sendo superior ao módulo de elasticidade estático em torno de 20%, 30% e 40% tendo como base a resistência mecânica do material.

Na pesquisa realizada por Santos *et al.* (2013) foi desenvolvida uma correlação entre dosagens de concreto e os seus respectivos resultados de módulo de elasticidade estático e dinâmico. No artigo foi possível identificar que as funções de regressão e os valores de módulos de elasticidade obtidos pelos autores corroboram com os resultados encontrados na Figura 46, e confirmam que os valores de módulo de elasticidade dinâmico são muito superiores aos valores dos módulos de elasticidade estático para um mesmo concreto. Comportamentos semelhantes dos resultados obtidos podem ser identificados nos trabalhos de Singh *et al.* (2017), Melo (2016) e Rodrigues *et al.* (2015).

d) Resistividade elétrica volumétrica e superficial

A resistividade elétrica volumétrica e superficial dos corpos de prova de concreto foram realizadas para os concretos com e sem adições minerais. Os valores encontrados são apresentados nas Figuras 47 e 48.

Figura 47 - Resistividade elétrica volumétrica.

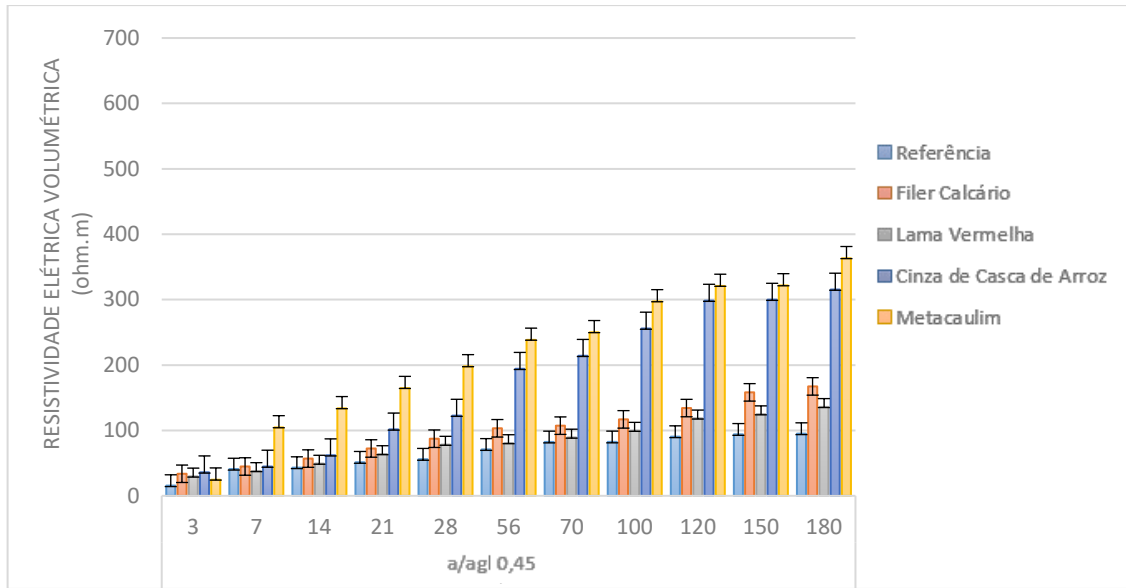
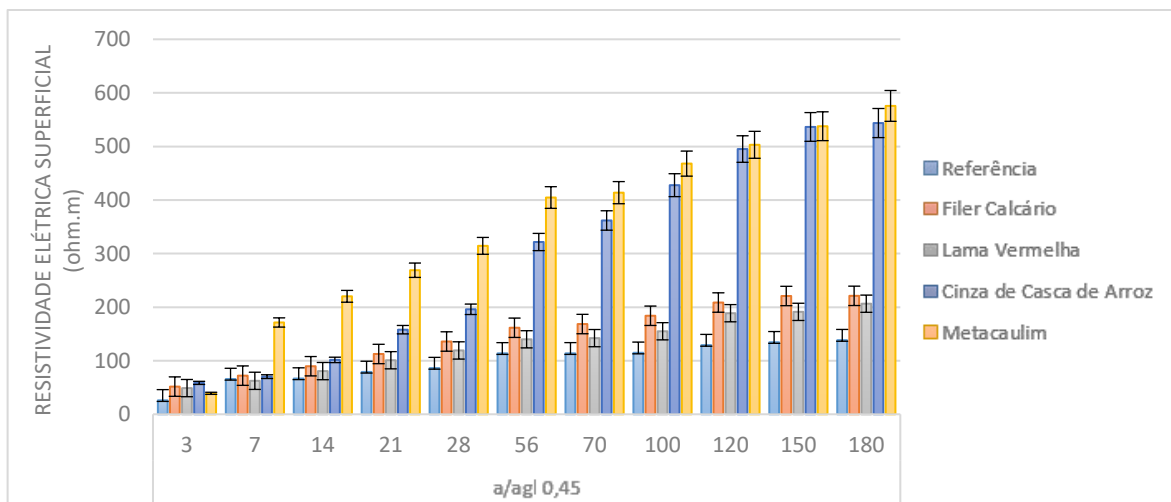


Figura 48 – Resistividade elétrica superficial.



Nas Figuras 47 e 48, observa-se um aumento nos valores de resistividade elétrica à medida que a idade aumenta em relação a todos os traços analisados. Isso acontece devido à evolução da hidratação do cimento e do consequente endurecimento progressivo do concreto. Esse comportamento encontra-se de acordo com outros trabalhos como Medeiros Jr. e Gans, (2017). Mediante os dados analisados, os valores de resistividade elétrica volumétrica e superficial em todos os traços que contém adições minerais são maiores em valores absolutos para as todas as idades e, após os 28 dias, também em termos estatísticos, quando comparados com o concreto de referência.

Na avaliação dos valores obtidos e das características de crescimentos mostrados nos gráficos das Figuras 47 e 48, durante a evolução do concreto, é possível identificar que os coeficientes de variação dos ensaios de resistividade elétrica volumétrica e superficial não ultrapassam 10%, porcentagem que indica uma homogeneidade dos corpos de prova analisados, de acordo com a Tabela 9. Esse baixo valor de coeficiente de variação, provavelmente, é devido ao fato que os corpos de prova sempre permaneceram imersos em água.

Nos gráficos de resistividade elétrica volumétrica e superficial é possível observar que aos 3 dias as adições minerais não influenciam significativamente nas medições, embora os valores absolutos sejam um pouco maiores que os valores obtidos no concreto de referência, sem adições. O metacaulim começa a exercer uma melhoria nas resistividades a partir dos 7 dias, enquanto no caso da cinza de casca de arroz a melhoria é mais relevante depois dos 28 dias. Além disso, após os 56 dias, as adições pozolânicas se comportaram de forma semelhante em relação aos crescimentos das resistividades. Esses fatos podem ser explicados pela maior finura dos materiais pozolânicos estudados, pela sua composição química, pela gradual diminuição da porosidade do concreto com a progressão das reações pozolânicas e pelo tempo que as adições pozolânicas precisam para reagirem com a matriz cimentícia (SINGH *et al.*, 2017 e MELO, 2016). O filer calcário e a lama vermelha, com efeito fíler, começaram a contribuir no aumento da resistividade volumétrica e superficial de forma absoluta e estatística em idades mais avançadas, após os 100 dias.

Aos 180 dias os valores médios de resistividade elétrica volumétrica foram de 95,10 ohm.m para o concreto de referência, 167,33 ohm.m com filer calcário, 135,98 ohm.m para o concreto com lama vermelha, 315,46 ohm.m para o concreto com cinza de casca de arroz e 363,23 ohm.m para o concreto com metacaulim. Levando em consideração os valores de resistividade volumétrica obtidos aos 28 dias e comparando com os obtidos aos 180 dias, verifica-se que houve um ganho de 53% para os concretos com pozolanas e 42% para concretos com adições não pozolânicas.

A resistividade elétrica superficial dos concretos analisados, por meio da utilização do aparelho Resipod, apresentou os seguintes resultados médios aos 180 dias: 138,38 ohm.m para o concreto de referência, 221,11 ohm.m para o com filer calcário, 206,42 ohm.m para o com lama vermelha, 543,67 ohm.m para o concreto

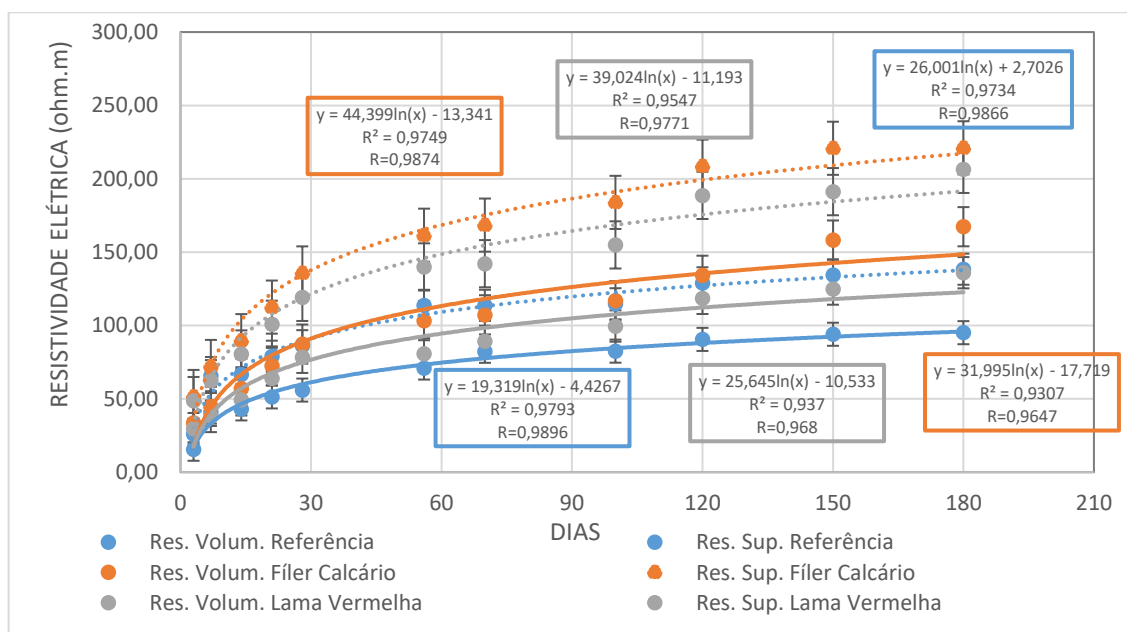
com cinza de casca de arroz e 575,67 ohm.m para o concreto com metacaulim. A maior resistividade elétrica superficial do concreto com metacaulim acompanhou os resultados de resistividade elétrica volumétrica.

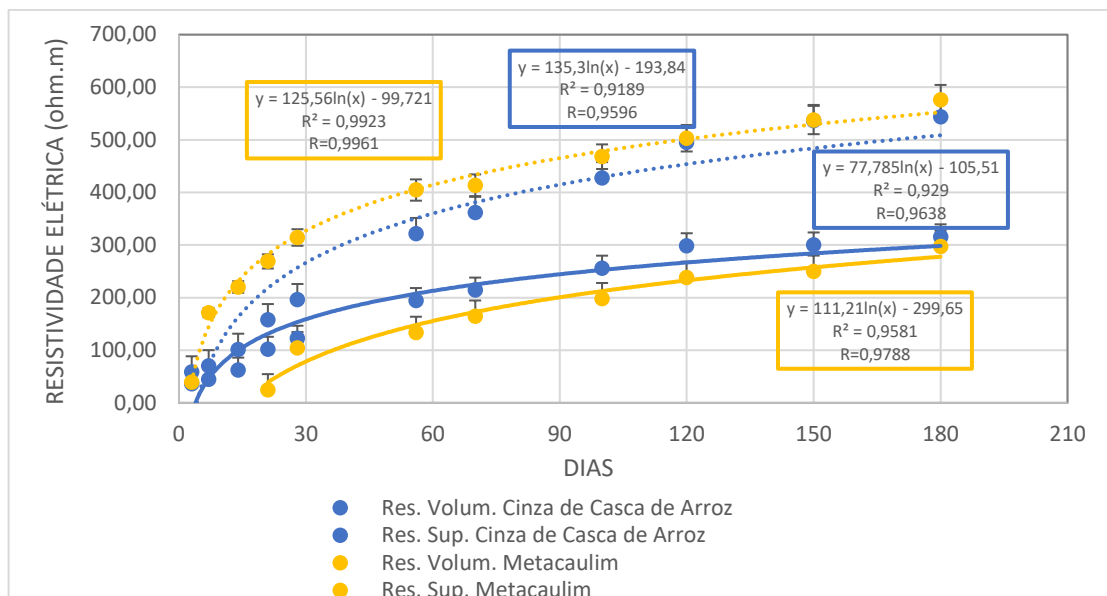
O concreto com adição de metacaulim, considerado uma adição pozolânica, apresenta o maior valor de resistividade superficial, de 575,67 ohm.m, valor este superior em aproximadamente 75% em relação ao concreto de referência. Como o metacaulim gerou uma matriz cimentícia de porosidade mais fechada, isso dificultou a saída da água superficial, levando a obtenção de maior valor médio da resistividade elétrica superficial.

Nos ensaios aos 180 dias é possível observar uma diferença significativa dos valores de resistividade volumétrica entre o concreto com adições minerais pozolânicas e de efeito fíler em relação ao concreto de referência, em torno de 72% para o concreto com adições pozolânicas e 35% para os concretos com adições de efeito fíler. Na resistividade superficial, as diferenças foram de 75% e 34%, respectivamente. Essa diferença também, pode ser notada na pesquisa realizada por Soares Jr. (2019).

Diante dos resultados obtidos, a Figura 49 representa o gráfico das resistividades elétricas volumétricas e superficiais dos concretos analisados para as misturas com e sem adições minerais até a idade de 180 dias.

Figura 49 – Comparação das resistividades elétricas.





Os valores de resistividade elétrica volumétrica e superficial em todos os traços analisados, possuem uma tendência crescente bem próxima da logarítmica até 180 dias. Isto é demonstrado pelos coeficientes de correlação cujos valores são superiores a 0,95, ou seja 95%. Com esse valor de coeficiente de correlação R é possível afirmar, de acordo a Tabela 10, que as resistividades elétricas possuem crescimento com um alto índice de correlação ao longo da evolução do concreto.

Além disso, nos gráficos obtidos identifica-se que as curvas, tanto de resistividade volumétrica quanto superficial, possuem crescimentos monotônicos para concreto com e sem adições minerais e que a partir dos 56 dias esse crescimento apresentou uma proporcionalidade semelhante até os 180 dias.

Comparando os ensaios de resistividade elétrica é possível perceber que os resultados obtidos pelo método superficial terão uma diferença relevante em relação ao método volumétrico, em torno de 38% em todas as idades analisadas (Figura 49). Podemos perceber que o uso de adições minerais pozolânicas em substituição ao cimento em massa influencia significativamente nos resultados das resistividades elétricas do concreto. Como pode ser observado também por Raisdorfer (2015).

Pode-se dizer que os resultados obtidos de resistividade elétrica volumétrica e superficial apresentam um crescimento à medida que aumenta a idade dos concretos, principalmente em concretos com adições minerais. Isso pode ser atribuído a alta finura e a composição química de características pozolânicas e fíleres das adições minerais, que promovem um refinamento na estrutura de poros do concreto e torna a matriz cimentícia menos porosa. Este efeito, ocasionado por uma maior densificação

da zona de transição e da matriz cimentícia, provoca um preenchimento dos poros existentes e reduz os espaços disponíveis para a água. Comportamentos similares são demonstrados nos estudos de Khodabakhshian *et al.* (2018a).

Com os resultados obtidos para a resistividade elétrica superficial é possível analisar a taxa de risco de corrosão dos concretos com adições minerais e do concreto de referência, empregando-se a Tabela 11, proposta por Polder (2001). Aos 28 dias de ensaio pode-se perceber que os concretos de referência possuem alto risco de corrosão, os concretos com adições minerais de fíleres apresentam baixo risco de corrosão e os concretos com adições pozolânicas apresentam risco de corrosão considerado desprezível. Portanto o uso de adições minerais pozolânicas ou fíleres, aos 28 dias, promoveram a diminuição da porosidade do concreto, e conseqüentemente a redução da possibilidade da ocorrência de um processo corrosivo nos compósitos cimentícios.

4.2.4 Correlações entre as resistividades e as demais propriedades do concreto

Com base nos resultados obtidos dos ensaios, realizados no Capítulo 4.2.3, foi possível estabelecer correlações entre as resistividades elétricas volumétrica e superficial e as propriedades mecânicas do concreto, seus índices de vazios e sua absorção por imersão em água.

a) Resistividades elétricas e índices de vazios / absorção por imersão

As Figuras 50 a 53 indicam a correlação entre a resistividade elétrica volumétrica e superficial e a absorção por imersão e o índice de vazios para todos os concretos estudados dos 3 dias até os 28 dias. A correlação obtida nas Figuras 50 a 53 retratam o comportamento inverso entre essas propriedades específicas. Assim, a água absorvida na microestrutura do concreto aumenta sua condutividade elétrica e, conseqüentemente, reduz sua resistividade elétrica.

Figura 50 – Resistividade elétrica volumétrica e a absorção por imersão.

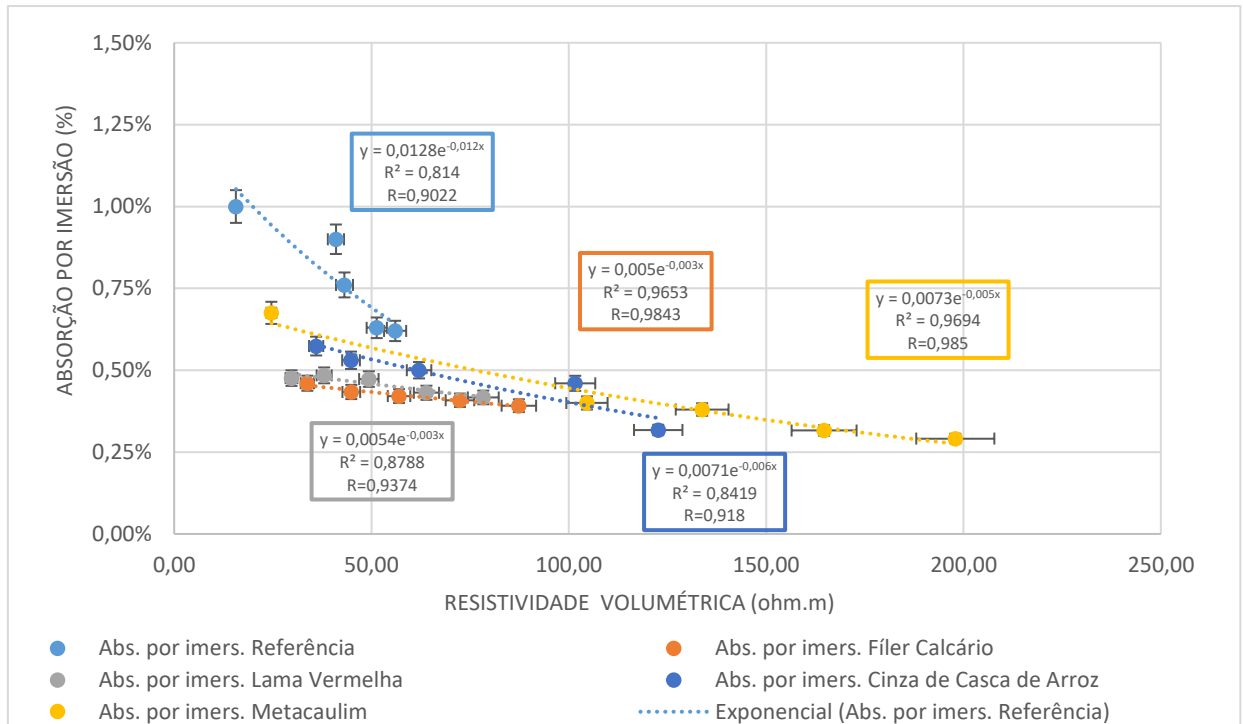


Figura 51 - Resistividade elétrica volumétrica e índices de vazios

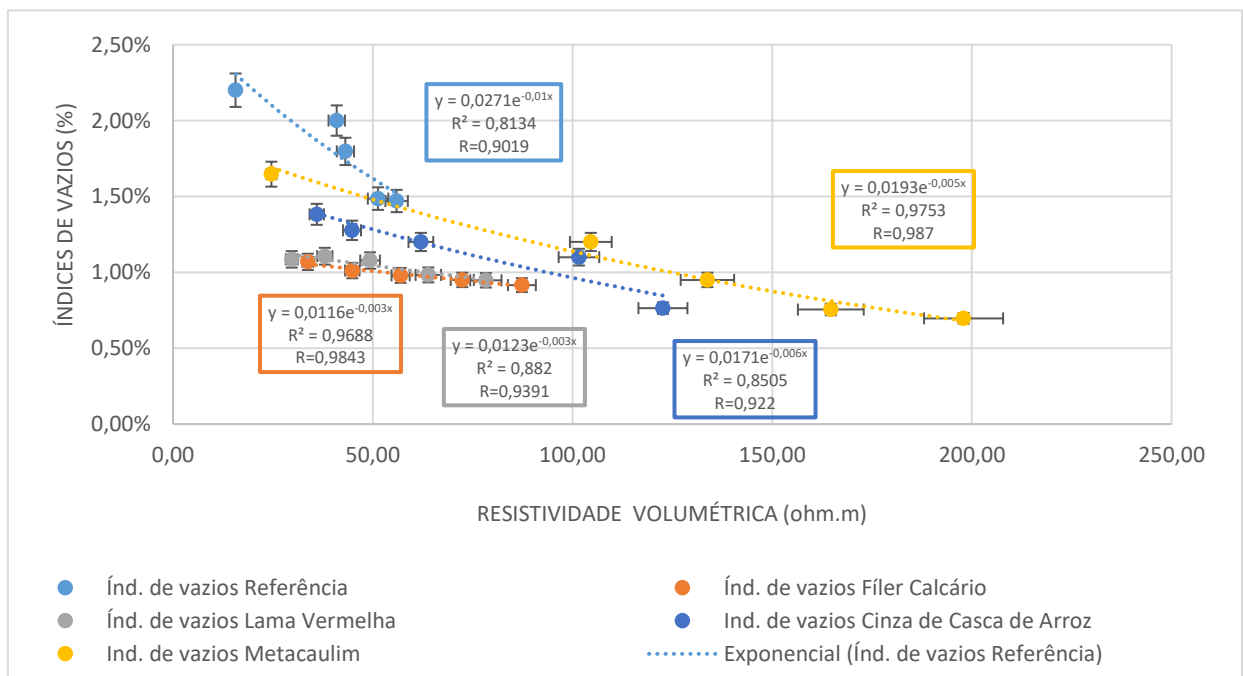


Figura 52 - Resistividade elétrica superficial e a absorção por imersão.

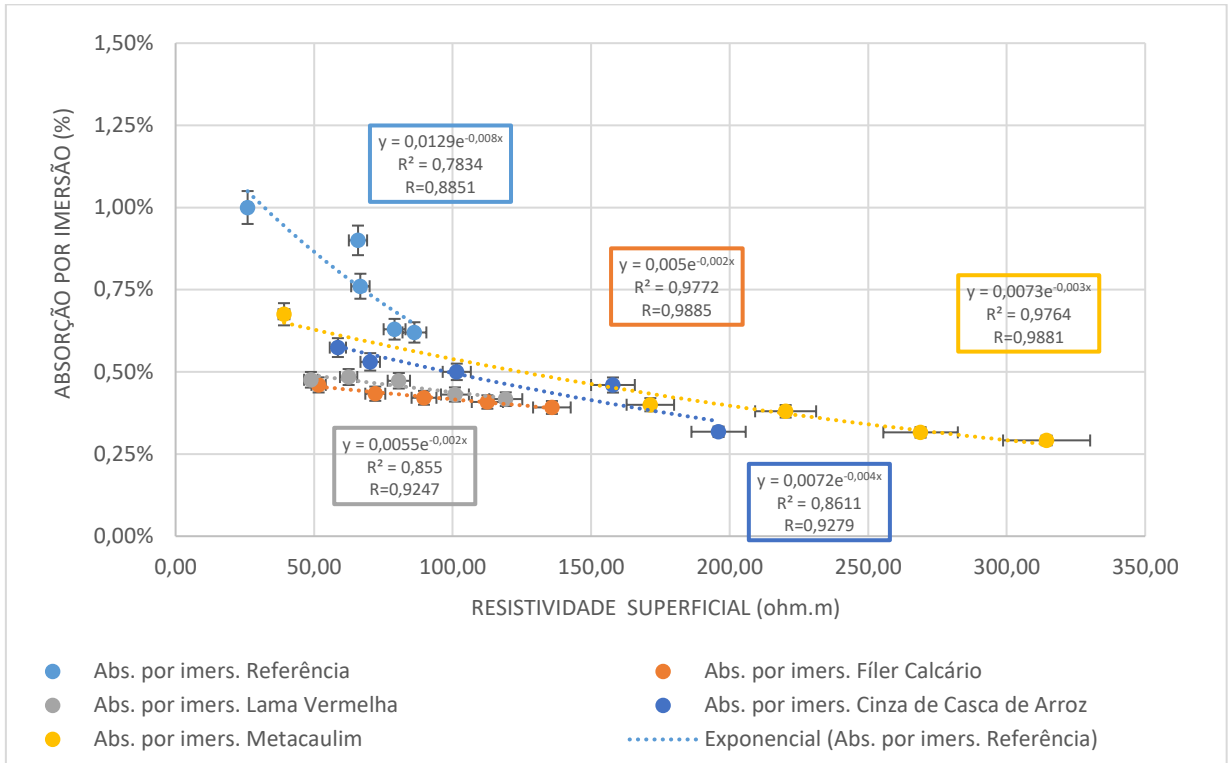
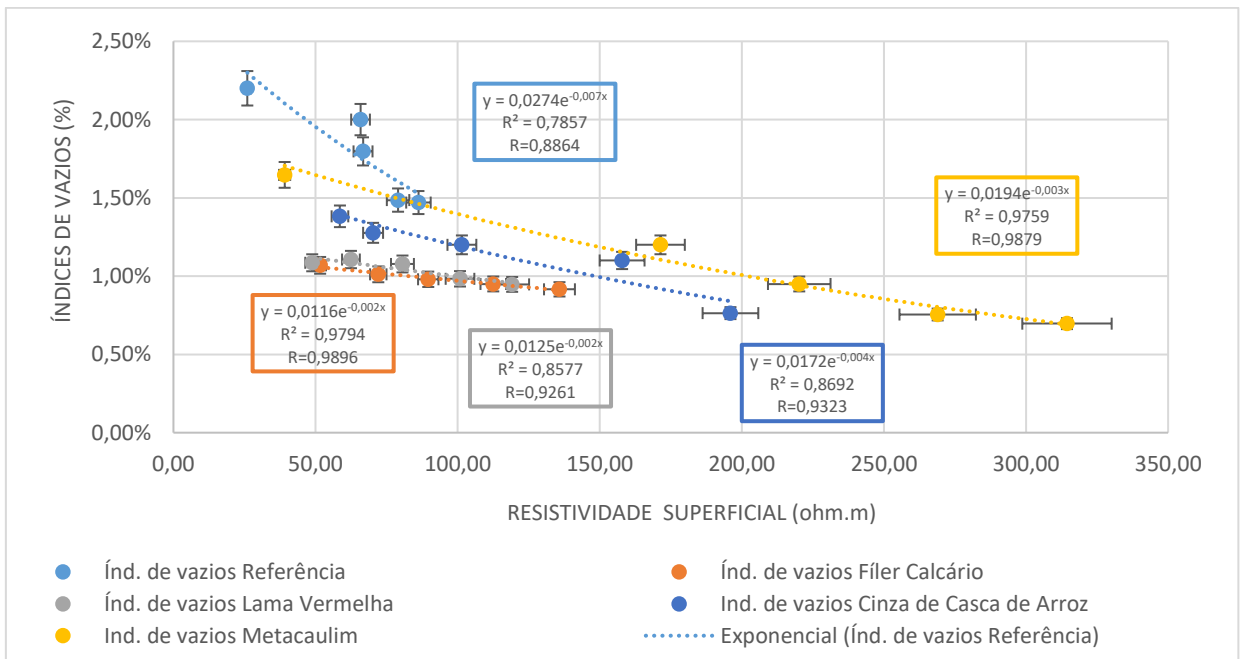


Figura 53 - Resistividade elétrica superficial e índices de vazios



A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se dizer que, de acordo com as Figuras 50 a 53, o índice de vazios e absorção por imersão diminuem à medida que a resistividade elétrica aumenta. Para todos os traços testados a resistividade elétrica e o índice de vazios dos concretos estão inversamente relacionados. Os concretos com altos índices de atividade pozolânica apresentam maiores valores de resistividade elétrica e menores valores de índices de vazios, ou seja, a pozolanicidade interfere na porosidade dos concretos e na sua resistência ao ataque de agentes agressivos.

A curva de correlação que melhor se ajusta aos dados experimentais foi gerada pela função exponencial, com valores de coeficiente de correlação próximos e superiores a 0,90, ou 90%. Isso sugere, de acordo com a interpretação proposta por Shimakura (2002) na Tabela 10, que essas propriedades possuem uma correlação muito forte entre si, ou seja, com as funções informadas nos gráficos é possível obter uma relação direta entre a porosidade do concreto e a sua resistividade elétrica.

Esse comportamento pode ser explicado pela interligação dos poros do concreto e pela característica condutiva da solução contida nessa estrutura porosa. Sendo assim, quanto maior a quantidade de poros nas amostras, seja proveniente da maior relação água/aglomerante ou pelo não uso de pozolana, melhores serão as condições de movimentação da corrente elétrica no interior do concreto, resultando em menores valores de resistividade elétrica. Esses resultados estão em acordo com outros trabalhos de Diniz (2018) e Araújo (2019).

b) Resistividades elétricas e resistência à compressão

Baseado nas condições analisadas, as Figuras 54 e 55 apresentam os gráficos de correlação entre a resistência à compressão axial e as resistividades elétrica volumétrica e superficial para todas as misturas nas idades de 28 dias e 180 dias.

Figura 54 - Resistividade elétrica volumétrica e resistência à compressão.

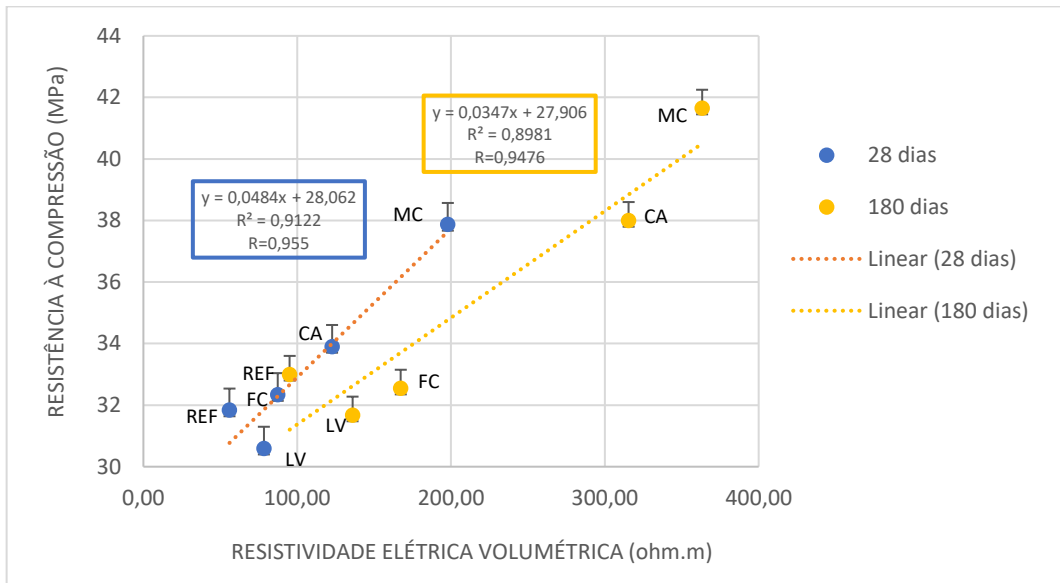
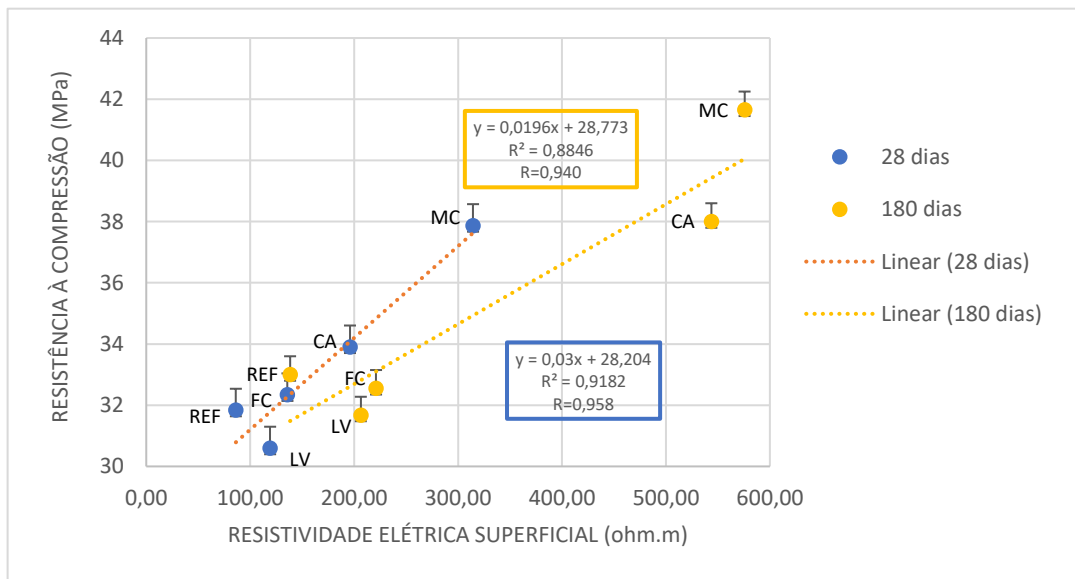


Figura 55 – Resistividade elétrica superficial e resistência à compressão.



Com os dados obtidos pode-se perceber que a linearidade das correlações pode ser indicada pelos coeficientes de correlação que obtiveram valores próximos a 0,95. Esses valores são considerados pela estatística adequados na evolução explicativa do modelo de crescimento linear. Os critérios de avaliação mostrados na Tabela 10 indicam que existe uma correlação muito forte ($R \geq 0,9$) entre as resistividades elétrica volumétrica e superficial e a resistência à compressão.

Destaca-se uma correlação linear aproximada entre as duas propriedades, pois ambas dependem diretamente da porosidade da matriz. Comportamentos

semelhantes são observados anteriormente por Dinakar *et al.* (2007), Lübeck *et al.* (2012) e Araújo (2019). Lübeck *et al.* (2012) complementa que à medida que o concreto amadurece, a relação pode ser devidamente afetada por outras propriedades, como o efeito de densificação da pasta pela produção progressiva dos compostos hidratados, a saturação dos poros e a condutividade da solução intersticial

Lübeck *et al.* (2012) retrata também que a diminuição da porosidade com o avanço do grau de hidratação da pasta repercute tanto na resistência mecânica quanto na resistividade elétrica, mesmo que o último também seja influenciado por outras propriedades, como a condutividade da solução de poros e o grau de saturação do concreto.

c) Resistividades elétricas e módulos de elasticidades

Diante das condições analisadas, as Figuras 56 a 59 representam os gráficos de correlação entre as resistividades elétricas e o módulo de elasticidade estático aos 28 e 180 dias e entre as resistividades elétricas e o módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada para todas as misturas nas idades de 7 a 28 dias.

Figura 56 - Resistividade elétrica volumétrica e módulo de elasticidade estático.

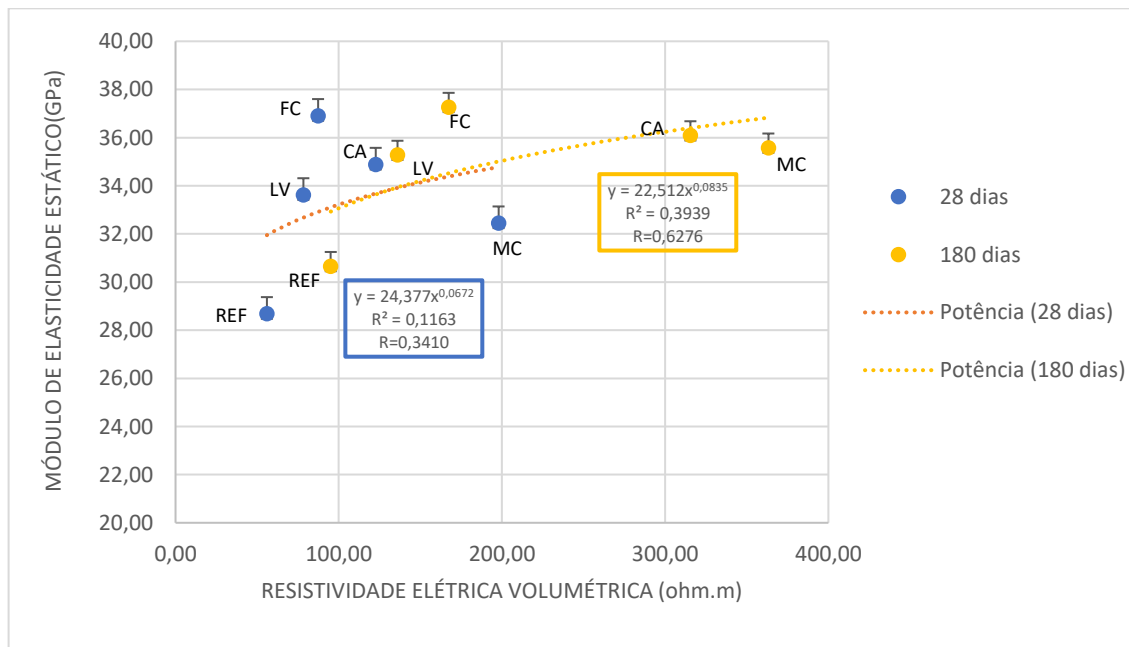


Figura 57 - Resistividade elétrica superficial e módulo de elasticidade estático.

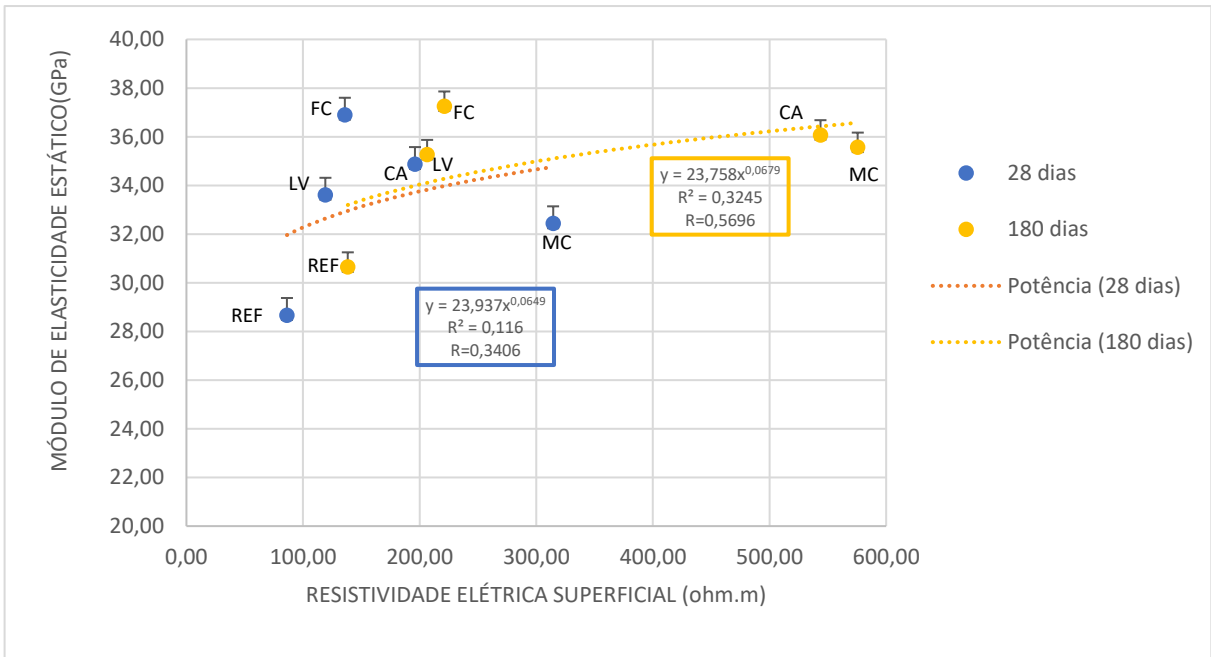


Figura 58 - Resistividade elétrica volumétrica e módulo de elasticidade dinâmico.

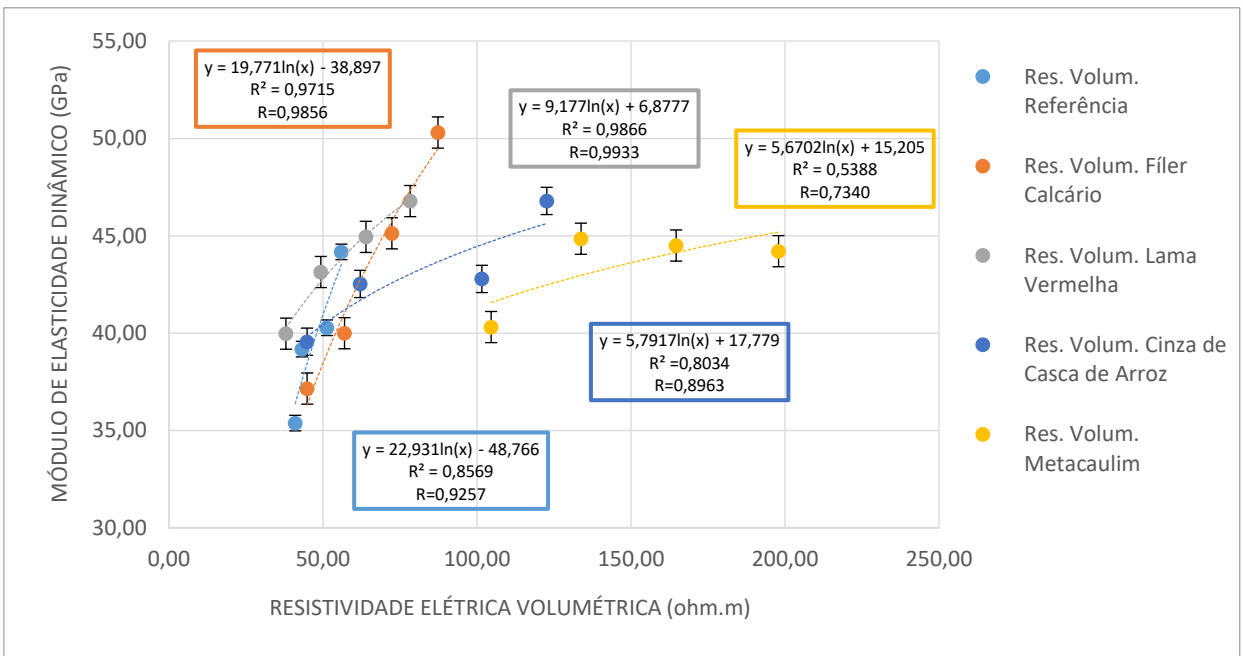
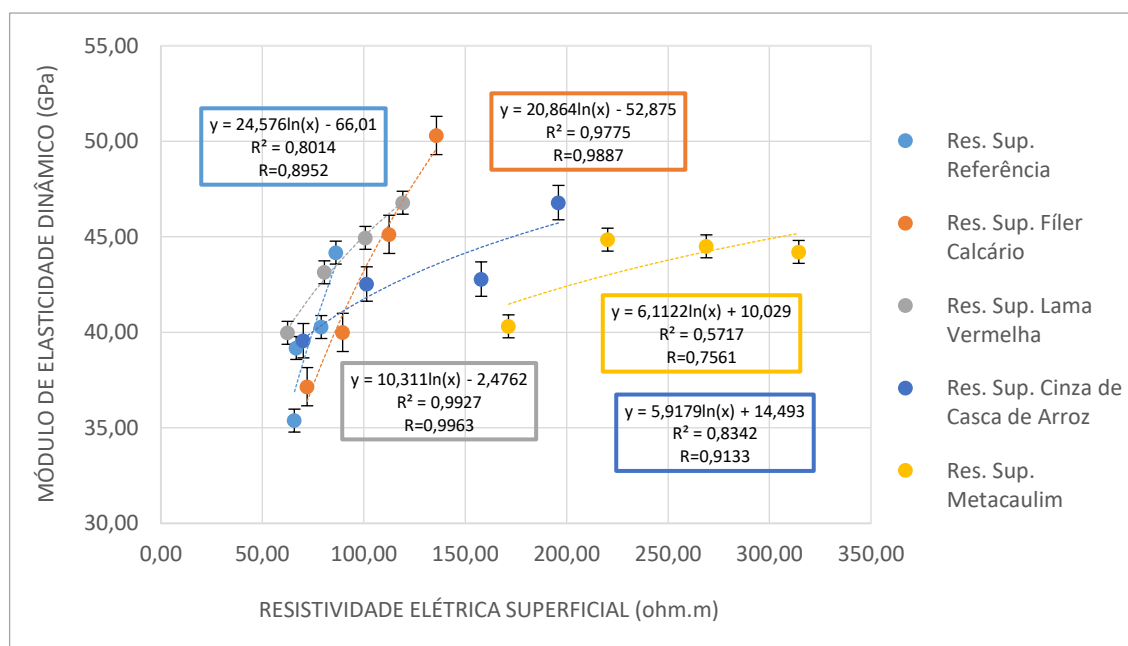


Figura 59 - Resistividade elétrica superficial e módulo de elasticidade dinâmico.



Os gráficos de correlação entre as resistividades elétricas e o módulo de elasticidade estático indicam um crescimento de potência pouco satisfatório aos 28 dias, com coeficientes de correlação próximo de 0,35. Os baixos valores de correlação confirmam, de acordo com a Tabela 10, que as propriedades possuem uma correlação fraca entre si e que a análise estática de regressão de potência entre elas não é recomendada. Aos 180 dias esses coeficientes apresentam valores mais aceitáveis para a comparação dessas propriedades, com coeficientes de correlação próximos a 0,6, indicando uma correlação moderada entre o módulo de elasticidade estático e as resistividades elétricas.

Nos gráficos de correlação entre as resistividades elétricas e o módulo de elasticidade por frequência ressonante é possível perceber um crescimento logarítmico satisfatório em todos os traços, com coeficientes R superiores a 0,73 ou 73% e uma correlação forte entre elas (Tabela 10). Observa-se uma similaridade de comportamento ao registrar um aumento no valor das resistividades elétricas quanto no valor do módulo de elasticidade dinâmico à medida que aumenta a idade do concreto. Essa ocorrência pode ser devido ao progresso de hidratação da pasta. Estudo de Rodrigues *et al.* (2015) e Araújo (2019) apresentam uma relação de comportamentos similares.

Porém, Ramezaniyanpour *et al.* (2011) salienta que não é indicado usar a resistividade elétrica como um indicador para avaliação do módulo de elasticidade

estático. O mesmo autor descreve que o módulo de elasticidade estático não tem efeito significativo sobre a resistividade do concreto, mas sobre outra perspectiva, a solução do composto químico dos poros tem uma grande influência na resistividade do concreto, podendo afetar o módulo de elasticidade do material.

d) Resistividade elétrica volumétrica e superficial

Conforme os valores apresentados através de gráficos nas Figuras 60, 61 e 62, observa-se que corpos de provas com diferentes traços de concreto possuem o mesmo comportamento ao relacionar o método de resistividade elétrica superficial com o método de resistividade volumétrica nas idades de 3, 7, 14, 21, 28, 56, 70, 100, 120, 150 e 180 dias.

Figura 60 – Correlação entre as resistividades elétricas volumétrica e superficial referente ao concreto de referência nas idades de 3, 7, 14, 21, 28, 56, 70, 100, 120, 150 e 180.

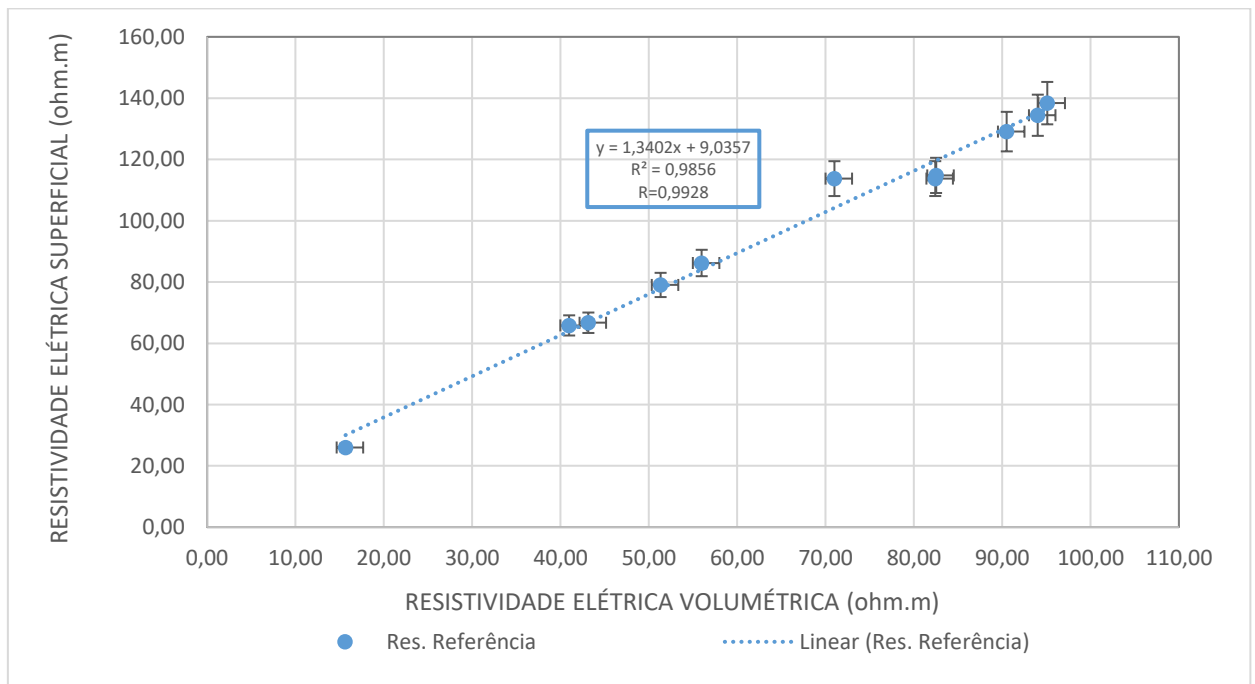


Figura 61 - Correlação entre as resistividades elétricas volumétrica e superficial referente aos concretos com fileres nas idades de 3, 7, 14, 21, 28, 56, 70, 100, 120, 150 e 180.

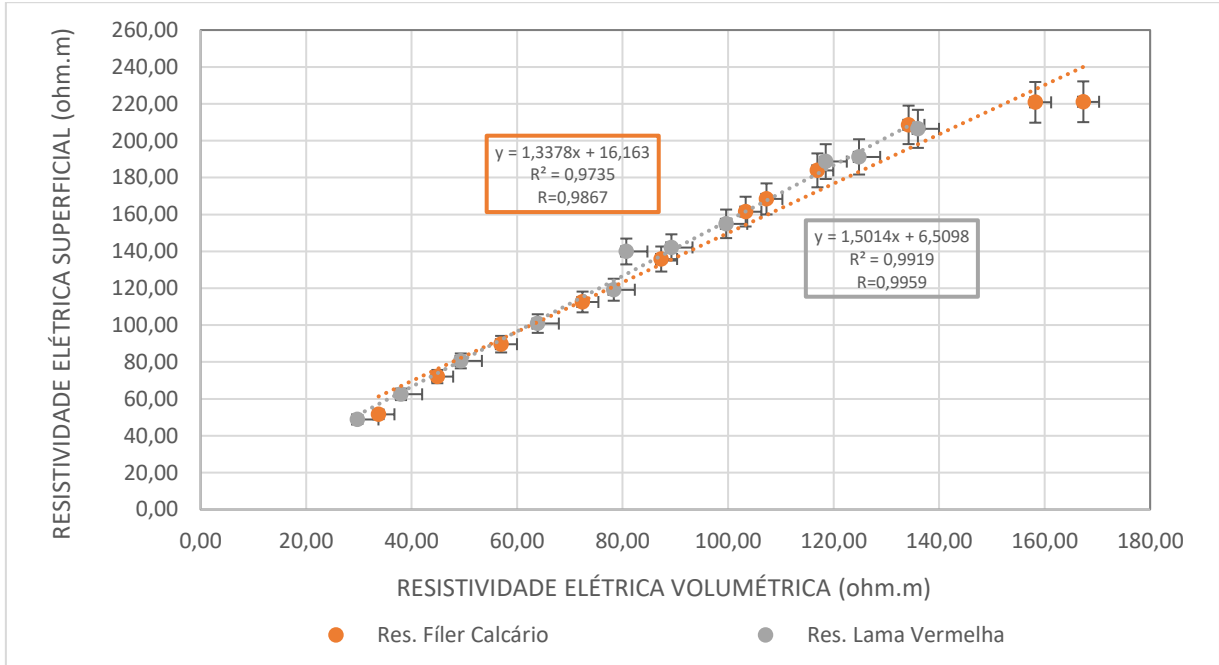
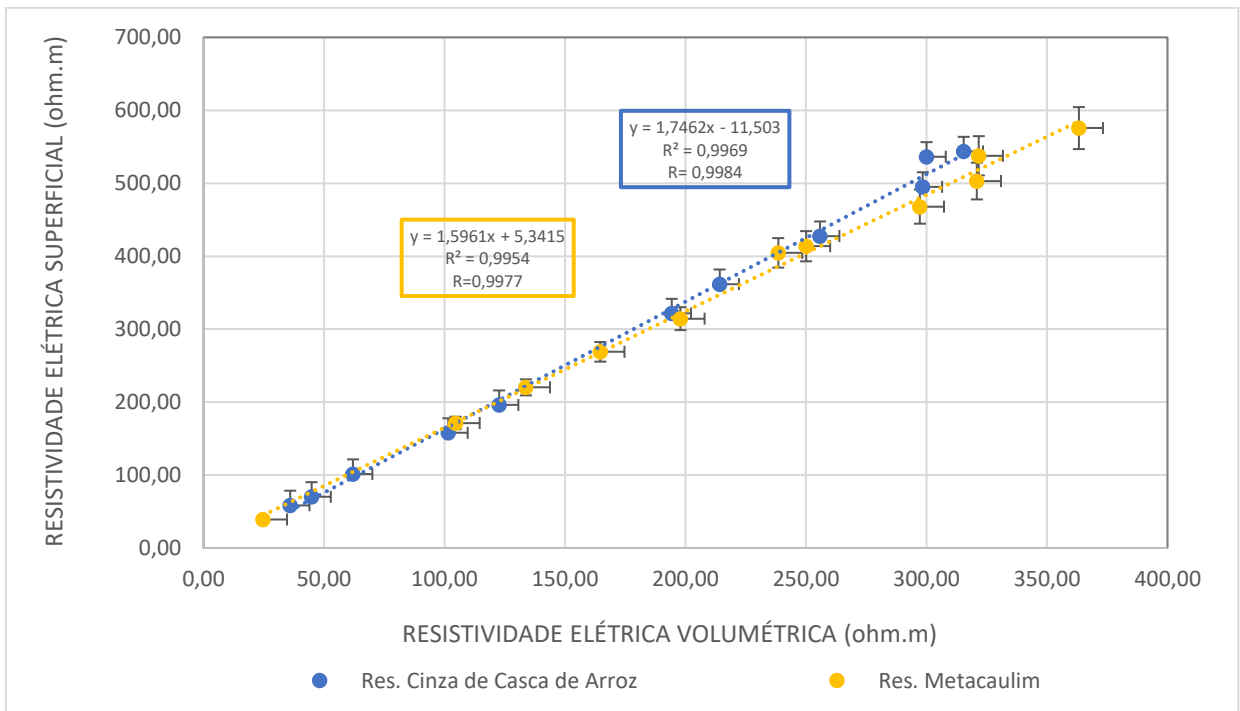


Figura 62 - Correlação entre as resistividades elétricas volumétrica e superficial referente aos concretos com pozolanas nas idades de 3, 7, 14, 21, 28, 56, 70, 100, 120, 150 e 180.



As correlações entre a resistividade elétrica volumétrica e superficial em todas as dosagens analisadas, possuem uma tendência crescente bem próxima da função linear dos 3 aos 180 dias de cura. Isto é indicado pelos coeficientes de correlação (R) cujos valores são superiores a 0,98, ou seja 98%. De acordo com a interpretação do coeficiente R, descrita na Tabela 10, é possível identificar uma correlação muito forte entre as resistividades elétricas

No gráfico das Figuras 60, 61 e 62 pode-se analisar que independentemente da natureza da adição mineral utilizada no concreto a correlação entre as resistividades elétricas volumétricas e superficial dos materiais foram semelhantes, de forma que os gráficos indicaram um crescimento linear proporcional para todas as dosagens realizadas. Essa correlação “muito forte” entre as duas variáveis, possibilita que com o método da resistividade elétrica superficial, por ser mais simples de aplicação e utilizado *in loco* nas obras, seja possível estimar o valor da resistividade elétrica volumétrica.

Além disso, nos gráficos obtidos identifica-se que as curvas de correlações entre as resistividades elétricas volumétrica e superficial, possuem crescimentos monotônicos para concreto com e sem adições minerais. Esse crescimento apresentou uma proporcionalidade semelhante até os 180 dias de ensaios, sendo que para todas as idades os valores absolutos de resistividade elétrica superficial foram superiores aos valores de resistividade elétrica volumétrica. A diferença significativa de resultados entre as resistividades elétricas volumétrica e superficial para todas as idades analisadas em um mesmo concreto, pode ser explicado considerando que superficialmente o concreto encontra-se mais susceptível a variação da umidade do que internamente, na qual a umidade tende a permanecer constante em um intervalo de tempo maior.

Por fim, os resultados obtidos com esse trabalho são úteis para melhor compreender a relação entre os parâmetros associados à durabilidade e a qualidade das estruturas de concreto. A análise e as correlações entre os parâmetros e propriedades específicas dos compósitos cimentícios, com adições minerais de diferentes características pozolânicas e de efeito fíler, foi essencial para o entendimento da importância dessas propriedades para proporcionar melhores desempenhos ao concreto, mais resistência ao ataque de agentes agressivos e condições mais favoráveis para a sua durabilidade e vida útil.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões apresentadas abaixo são referentes aos resultados obtidos para os compósitos cimentícios estudados e elaborados com as adições minerais caracterizadas nessa pesquisa (fíler calcário, lama vermelha, cinza de casca de arroz e metacaulim). Nesse sentido, apesar da representatividade dos dados obtidos em relação aos efeitos pozolânico e fíler, caso as dosagens e os tipos de adições sejam alterados, incluindo alterações nas suas composições químicas e físicas, novas pesquisas devem ser realizadas a fim de confirmar e complementar os resultados e análises aqui obtidos e realizados.

Com base nas características químicas, as adições minerais de lama vermelha, cinza de casca de arroz e metacaulim apresentam índices elevados do somatório dos elementos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e atendem as demais exigências químicas da NBR 12653 (ABNT, 2014; versão corrigida 2015) e ASTM C 618 (2015), que classificam essas adições como um material pozolânico. Por outro lado, nos ensaios de pozolanidade (Chapelle Modificado e TGA), verificou-se que a lama vermelha não possui características pozolânicas.

A lama vermelha apresentou maior superfície específica, seguida do metacaulim, da cinza de casca de arroz e do fíler calcário. O valor obtido da superfície específica da cinza de casca de arroz foi inferior ao usualmente apresentado na literatura. Isso pode estar associado a estrutura porosa do material e ao efeito de aglomeração das partículas mais finas, de forma que a sua superfície externa tenha sido o fator preponderante para a obtenção de um valor relativamente baixo da sua área específica. Apesar disso, nos ensaios de Chapelle Modificado a cinza de casca de arroz mostrou um elevado índice de pozolanidade devido a sua amorficidade identificada no ensaio de DRX.

No ensaio de Difração de Raio X (DRX) foi possível verificar que a cinza de casca de arroz e o metacaulim apresentaram maiores quantidades de sílica amorfa e, por isso, são consideradas adições com características pozolânicas. A amorficidade do metacaulim pode ser considerada menor que a da cinza de casca de arroz devido à menor dimensão do seu halo amorfo no difratograma analisado. Por outro lado, o fíler calcário e a lama vermelha possuem estruturas basicamente cristalinas e com altos índices de materiais quartzosos.

A caracterização da atividade pozolânica pelo Método do Chapelle Modificado indica que o metacaulim e a cinza de casca de arroz apresentaram elevados valores de teores de Ca(OH)_2 , indicando que são materiais que reagem facilmente com o hidróxido de cálcio. Os dados apresentados também mostram que apesar do metacaulim apresentar elevado teor de sílica e ser amorfo ele reage em menor grau com o hidróxido de cálcio que a cinza de casca de arroz. O metacaulim contém menor teor de fase amorfa pelo DRX do que a cinza de casca de arroz, mas possui maior valor de superfície específica. Isso sugere que as diferenças na fase amorfa foram importantes para os índices de pozolanicidade obtidos no ensaio de Chapelle Modificado. Por outro lado, o fíler calcário e a lama vermelha apresentaram resultados no ensaio de Chapelle Modificado inferiores aos que caracterizam as adições como pozolânicas.

Nos ensaios de TGA foi possível avaliar que as pastas com metacaulim e cinza de casca de arroz, por serem pozolânicas, apresentavam em suas composições quantidades inferiores de hidróxido de cálcio em relação à pasta de referência. A pasta de lama vermelha apresentou teores de Ca(OH)_2 próximos ao da pasta de referência e a pasta com fíler calcário apresentou teor de hidróxido de cálcio superior à pasta de referência. Este comportamento do fíler calcário pode ser devido à elevada quantidade de calcita presente nessa adição e à natureza de fíler do material.

Na análise da resistividade elétrica realizada com base na geometria dos corpos de prova de concreto é possível detectar uma similaridade de valores médios de resistividade elétrica volumétrica em todas as idades entre os corpos de prova cilíndricos com dimensões (100 x 200) mm e (150 x 300) mm. Por outro lado, o mesmo não acontece nos resultados de resistividade elétrica superficial, comprovando que o equipamento utilizado nos ensaios dos corpos de prova (100x200) mm não possui o correto espaçamento entre os eletrodos, facilitando, assim, a fuga de corrente elétrica durante a realização do ensaio.

Os resultados de absorção por imersão e índice de vazios, ao longo do tempo, indicaram uma diminuição da porosidade e da permeabilidade tanto nos concretos com adições minerais, como naqueles sem adições minerais. Isso mostra que os concretos nas maiores idades são mais compactos e menos porosos. Além disso, houve uma diminuição de percentual de absorção de água e índice de vazios nos concretos com adições em comparação ao concreto de referência.

Nos ensaios de resistência à compressão, dos concretos, nota-se que a substituição parcial do cimento por adições de elevada reatividade pozolânica proporcionou um significativo aumento de resistência à compressão axial em comparação com o concreto de referência e de característica de fíleres.

A influência da pozolanicidade nas características do concreto, como por exemplo na sua porosidade, permeabilidade e resistência mecânica é de alta relevância. Isso pode ser observado também nos módulos de elasticidade estático e por frequência ressonante forçada dos compósitos cimentício, nos quais as adições minerais, tanto pozolânicas quanto de efeito fíler, proporcionaram alterações significativas na rigidez do material.

As adições minerais pozolânicas e fíleres aumentaram a resistividade elétrica volumétrica e superficial do concreto no intervalo de tempo analisado. As adições pozolânicas apresentaram maior influência no aumento das resistividades elétricas do concreto. Além disso, o emprego das adições minerais pozolânicas promoveu a redução do risco de ocorrência de um processo corrosivo nos compósitos cimentícios, após a despassivação das armaduras, de um nível considerado de alto risco para um nível desprezível. Portanto, as adições minerais pozolânicas proporcionam uma melhora nas propriedades resistivas, mecânicas e na durabilidade do concreto. Ressalta-se, ainda, que a resistividade elétrica é uma das principais propriedades controladoras do processo eletroquímico que leva ao fenômeno da corrosão das armaduras.

As resistividades elétricas volumétrica e superficial apresentaram resultados inversamente proporcionais aos percentuais de índices de vazios e de absorção por imersão, sendo que quanto menor a porosidade maior é a resistividade elétrica do compósito cimentício. As correlações obtidas entre essas propriedades foram consideradas muito forte, uma vez que as curvas de regressão exponencial apresentaram valores de coeficiente de correlação (R) próximos e superiores a 0,90.

Na correlação entre as propriedades mecânicas e as resistividades elétricas é possível perceber que elas obtiveram valores elevados de coeficientes de correlação (R). Dessa forma, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade por frequência ressonante podem ser correlacionados satisfatoriamente com as resistividades elétricas, tendo como base as curvas de regressão lineares e logarítmicas obtidas. Porém, na correlação entre os módulos de elasticidade estáticos e as resistividades elétricas os coeficientes de correlação foram próximos a 0,35 aos

28 dias e a 0,60 aos 180, indicando, respectivamente, uma fraca e moderada correlação entre as duas variáveis estudadas.

Apesar dos métodos de medida das resistividades elétricas volumétrica e superficial avaliarem partes diferentes do concreto, pode-se dizer que a resistividade elétrica superficial é significativamente maior que a resistividade volumétrica para todas as idades analisadas. Esse comportamento pode indicar que superficialmente o concreto esteja mais susceptível a variação de umidade do que internamente, na qual a umidade tende a permanecer constante em um intervalo de tempo maior. A metodologia adotada na pesquisa e a ordem de realização dos ensaios podem ter contribuído para a variação e a perda de umidade na superfície do concreto. Isso porque o ensaio de resistividade elétrica superficial foi sempre realizado após a medição da resistividade volumétrica, permitindo a evaporação da água contida nas partes mais superficiais dos concretos. Além disso, pode-se observar que as correlações entre essas propriedades foram consideradas muito fortes, uma vez que ao empregar as curvas de regressão linear os coeficientes de correlação (R) obtidos foram superiores a 90%.

Os resultados obtidos comprovam que a resistividade elétrica volumétrica e superficial são propriedades extremamente sensíveis às mudanças que ocorrem no âmbito microestrutural do concreto. Portanto, as adições minerais interferem na microestrutura dos compósitos cimentícios, influenciando nos resultados de absorção por imersão, índices de vazios, resistividades elétricas e resistência à compressão dos concretos, possibilitando a produção de materiais mais duráveis, com bons desempenhos estruturais, melhores propriedades físicas e mecânicas e mais resistentes ao ataque de agentes agressivos.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado no levantamento bibliográfico e na pesquisa realizada, faz-se as sugestões para futuros trabalhos a seguir listadas:

- Realizar a mesma metodologia experimental, porém utilizando as adições minerais pozolânicas e fíleres em proporções diferentes, a fim de verificar os teores críticos das adições;
- Estudar por meio de metodologias específicas (MEV), a relação entre a microestrutura dos concretos com adições pozolânicas e de efeito fíler e suas resistividades;

- Realizar ensaios em concretos com diferentes tipos de cimento e acrescentar as adições minerais, de forma a correlacionar os valores obtidos de resistividade elétrica, módulo de elasticidade, absorção por imersão e resistência à compressão;
- Verificar a relação entre a saturação dos poros do concreto com a resistividade elétrica do concreto;
- Analisar o efeito da superfície corroída da armadura sobre a resistividade elétrica superficial do concreto;
- Avaliar a influência das águas de distribuidoras diferentes do país empregadas para produzir e curar os concretos sobre a resistividade elétrica;
- Analisar as diversas formas de medição da resistividade elétrica superficial e volumétrica e verificar a diferença entre elas, visando futura normalização;
- Analisar a influência do teor de escória de alto forno, em diferentes proporções, na resistividade elétrica do concreto;
- Avaliar a influência da umidade do ar na resistividade elétrica do concreto;
- Avaliar a influência dos diferentes tipos de aditivos sobre a resistividade elétrica do concreto;
- Avaliar a influência de diferentes tipos de cura (submerso, câmara úmida, cura química e cura térmica) sobre a resistividade elétrica do concreto; e
- Avaliar a influência das dimensões e do teor dos agregados na resistividade elétrica do concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ABNT, NBR 16697:2018. **Cimento Portland pozolânico**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2018.

_____, NBR 5738:2015 Versão Corrigida 2016. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.

_____, NBR 5739:2018. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2007.

_____, NBR 8953:2015 – **Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e Consistência**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.

_____, NBR 9204:2012. **Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2012.

_____, NBR 9778:2005 Versão Corrigida 2:2009. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2005.

____, NBR 12655:2015 Versão Corrigida: 2015 **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.

____, NBR 12653:2014 Versão Corrigida: 2015 **Materiais pozolânicos — Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2014.

____, NBR 15895:2010 **Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chappelle modificado**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2010.

____, NBR 8522:2017 **Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2017.

____, NBR 16605:2017 - **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

ASTM. Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. **C 618**. United States, 2012

ASTM. Standart Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. **C 215-08**. United States, 2015

ABREU, A. G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. – Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 1998.

AÏT-MOKHTAR, A. *et al.* (2013), **Experimental investigation of the variability of concrete durability properties**, *Cement and Concrete Research*, V.45, pp. 21-36.

ALMEIDA, S. M. *et al.* **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. 2012.

ALMEIDA, A. P. M. . **Avaliação do efeito da porosidade nas etapas de beneficiamento de minério de ferro da Samarco**. 2012.

ANDRADE, D. da S. **Propriedades mecânicas do concreto por meio de ensaios não destrutivos: estudo de caso da estrutura do estádio maracanã**. 2012. 246f. Orientador Prof. Dr. Enio Pazini Figueiredo. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiana.

ARAUJO A. de; PANOSSIAN Z.; OLIV K. J.; FILHO M. L. P.. **Técnicas de medição da resistividade elétrica em estruturas atmosféricas de concreto convencional**. Técnica Educação, Edição 210 - Setembro/2014.

ARAÚJO, C. C. *et al.* **Estudo de correlações entre propriedades do concreto e ensaios não destrutivos**. 2018.

ARAUJO, F. M. *et al.* **Análise da influência do resíduo da lama de marmoraria como elemento de substituição parcial do cimento nas propriedades do concreto**. 2019.

BABAEI, M.; DEGHANIAN, C. **Electrochemical assessment of characteristics and corrosion behavior of Zr-containing coatings formed on titanium by plasma electrolytic oxidation**. In: *Surface and Coatings Technology*. 2015 ; Vol. 279. pp. 79-91.

BADOGIANNIS, E. G. *et al.* **Durability of metakaolin self-compacting concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 82, p. 133-141, 2015.

BADANOIU, A.; GEORGESCU, M.; PURI, A. **The study of “DSP” binding systems by thermogravimetry and differential thermal analysis.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 74, n. 1, p. 65–75, 2003.

BARBOSA, J. T. L. **Caracterização de compósitos poliméricos feitos com resíduos pós-consumo (poliestireno de alto impacto) e industriais (lama vermelha e fibra de vidro/resina epóxi).** 2019.

BARCO, T. **Adições Minerais; Slide Payer.** 2014. Disponível em <<https://slideplayer.com.br/slide/1612534/>>. Acesso em 27 de julho de 2018.

BASTOS, R. S. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, 2014.

BATTISTI, I. D. E.; BATTISTI, G.. **Métodos estatísticos.** 2008.

BENEZET, J. C.; BENHASSAINE, A. **The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powders.** *Powder Technology*, v. 103, p. 26–29, 1999.

BENTOA, N. I. *et al.* **Compósitos baseados em carvão de PET e lama vermelha como catalisadores para a remoção de contaminantes orgânicos em água.**

BERWANGER FILHO, J. A. *et al.* **Caracterização e utilização de cinza de casca de arroz como adsorvente alternativo para remoção de btx em efluente industrial, através do uso de um sistema de filtração com pressão positiva.** In: Forum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais. 2014.

BIRICIK, H.; SARIER, N. **Comparative study of the characteristics of nano silica - silica fume - and fly ash - incorporated cement mortars.** *Materials Research*, v. 17, n. 3, p. 570–582, 2014.

BOMENI, I. Y. *et al.* **Ceramic with potential application of ngwenfon alluvial clays (noun, west cameroon) in building construction: Mineralogy, physicochemical composition and thermal behaviour.** *Construction and Building Materials*, v. 182, p. 493-503, Set.2018.

BRAUN, C. E. **Determinação instantânea da relação água cimento e da resistência à compressão do concreto no estado fresco através do método da resistência elétrica.** São Leopoldo, Fevereiro 2015.

CABALLERO, L. R.; PAIVA, M. das D. M.; FAIRBAIRN, E. M. R.; TOLEDO FILHO, R. D. **Thermal, Mechanical and Microstructural Analysis of Metakaolin Based Geopolymers.** *Materials Research*. São Carlos, vol. 22, n. 2, 2019. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2018-0716>

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

CHOPRA, D. *et al.* **Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash.** *Biosystems engineering*, v. 130, p. 72-80, 2015.

CHRISTÓFOLLI, J. L. **Estudo de Argilas Calcinadas para Produção de Cimento Portland**

Pozolânico na região de Curitiba, Paraná – Brasil. Tese de mestrado – Universidade Federal do Paraná. Paraná. 2010.

CIMENTO ITAMBÉ (Rio de Janeiro). **Cimento para toda a obra.** Rio de Janeiro, 2014. 144 slides, color. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/uploads/2014/05/Palestra_Itambe_Cimento.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2018.

CORDEIRO, G. C. *et al.* **Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash.** *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 5, p. 529-534, 2011.

CORDEIRO, L. de N. P. *et al.* **Análise do potencial pozolânico da cinza de casca de arroz (CCA) através da técnica de Refinamento de Rietveld.** *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 19, n. 2, p. 150-158, 2014.

COSTA, L. M. **Influência da pozolanicidade na ativação alcalina.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais.** In: ISAIA, G. C.. *Concreto: Ciência e Tecnologia.* São Paulo: Editora Ibracon, 2011. V1. Cap. 8, p. 261-309.

DEBOUCHA, W. *et al.* **Hydration development of mineral additives blended cement using thermogravimetric analysis (TGA): Methodology of calculating the degree of hydration.** *Construction and Building Materials*, v. 146, p. 687-701, 2017.

DIETRICH, Y. P.; TELES C. R.; VIEIRA, G. L. **Desempenho mecânico e análise da corrosão das armaduras em concretos produzidos com adição de resíduos de rochas ornamentais.** *Revista Matéria*, ISSN 1517-7076 artigo e-11891, v.22, n. 04, 2017.

DINAKAR, P., BABU, K. G., SANTHANAM, M. **Corrosion behavior of blended cements in low and medium strength concretes.** *Cement and Concrete Composites*, v.29, n. 2, pp. 136-145, 2007.

DINIZ, H. A. A.. **Estudo das propriedades mecânicas e dos parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais submetidos à carbonatação.** Dissertação de Mestrado. Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

ELIA, G. A *et al.* **An Advanced Lithium–Air Battery Exploiting an Ionic Liquid-Based Electrolyte.** *Nano Lett.*, 14, 2014.

FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. **Corrosão das armaduras das estruturas de concreto.** *Boletim técnico 06*, México, 2013.

FLEURY, C. G. **Estudo da Reatividade Pozolânica de Cinzas de Resíduos Agroindustriais com Cimento Portland.** 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2016.

FONSECA, T. V. **Avaliação de Concretos Autoadensáveis com Baixos Consumo de Cimentos Incorporando Metacaulim, Pozolana da Casaca do Arroz, Filer Calcário e Adição de Cal Hidratada.** Dissertação de mestrado 121 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

GARCIA, C. H. **Tabelas para classificação do coeficiente de variação.** IPEF, 1989. 11 p., 1989.

GHODDOUSI, P.; SAADABADI, L. A. **Study on hydration products by electrical resistivity for self-compacting concrete with silica fume and metakaolin.** *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 219-228, 2017.

GHOSH, P.; TRAN, Q. **Influence of parameters on surface resistivity of concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 62, p. 134-145, 2015.

GOMES, C.; MARTON, L. F. **Concreto de Cimento Portland Tipo III e Sílica Da Casca Do Arroz (SCA): Uma Contribuição à Sustentabilidade.** Bonito, Ms: Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto, 2015.

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

HOPPE FILHO, J. *et al.* **Pozzolanic activity of mineral additions to Portland cement (Part I): Pozzolanic activity index with lime (PAI), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetry (TG/DTG) and modified Chappelle.** *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 22, n. 3, 2017.

HORNBOSTEL, K.; LARSEN, C. K.; GEIKER, M. R. **Relationship between concrete resistivity and corrosion rate—a literature review.** *Cement and Concrete Composites*, v. 39, p. 60-72, 2013.

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

HU, J. (2017), **Comparison between the effects of superfine steel slag and superfine phosphorus slag on the long-term performances and durability of concrete.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, p. 1251–1263, <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6107-9>.

HYDRO. **Como a alumina é extraída da bauxita.** Disponível em <http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil/Sobre-o-aluminio/Ciclo-de-vida-do-alumínio/Refino-da-alumina/>. Acessado em 27 de Janeiro 2020.

IONASHIRO, M. G. **Fundamentos da Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial.** São Paulo: Giz Editorial, 2015, p.82.

IRASSAR, E. F. *et al.* **Propriedades de cimentos compostos (com três adições) com filer calcário e escória.** *Revista ALCONPAT, Yucatan*, v. 5, n. 2, p. 83-95, 2015.

ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G.; MORAES, R. **Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete.** *Cement & Concrete Composites*, v. 25, p. 69-76, 2003.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** v. 1, 2º ed., São Paulo, 2010.

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.

KANNAN, V.; GANESAN, K. **Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin.** *Construction and Building Materials*, v. 51, p. 225-234, 2014.

KATARE, V. D.; MADURWAR, M. V. **Design and investigation of sustainable pozzolanic material.** *Journal of Cleaner Production*, v. 242, p. 118431, 2020.

KAVITHA, O. R. *et al.* **Fresh, micro-and macrolevel studies of metakaolin blended self-compacting concrete.** *Applied Clay Science*, v. 114, p. 370-374, 2015.

KEULEN, A. *et al.* **Effect of admixture on the pore structure refinement and enhanced performance of alkali-activated fly ash-slag concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 162, p. 27-36, 2018.

KHODABAKHSHIAN, A; BRITO, J.; GHALEHNOVI, M.; SHAMSABADI, E.A. **Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder.** *Construction and Building Materials*, v.169, p.237-251, 2018.

KHODABAKHSHIAN, A; GHALEHNOVI, M.; BRITO, J.; SHAMSABADI, E.A. **Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder.** *Journal of Cleaner Production*, v.170, p.42-60, 2018a.

KOENDERS, E. A. B., PEPE, M., MARTINELLI, E. (2014), **Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates,** *Cement and Concrete Research*, V.56, pp. 203-212.

KUENZEL, C.; RANJBAR, N.. **Dissolution mechanism of fly ash to quantify the reactive aluminosilicates in geopolymerisation.** *Resources, Conservation and Recycling*, v. 150, p. 104421, 2019.

LAGE, E. B. D. *et al.* **Resistividade Elétrica Volumétrica do Concreto: Parâmetros Laboratoriais.** 56^o Edição – Congresso Brasileiro do Concreto, 2017, IBRACON 2017.

LAGE, E. B. D. **Comparação dos métodos de ensaio não destrutivo para qualidade do concreto: resistividade elétrica superficial e volumétrica em corpo de prova.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

LAYSSI, H. *et al.* **Electrical resistivity of concrete.** *Concrete International*, v. 37, n. 5, p. 41-46, 2015.

LE, H. T.; LUDWIG, H. M.. **Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete.** *Materials & Design*, v. 89, p. 156-166, 2016.

LENCIONI, J. W.; LIMA, M. G. **Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto – Estado-da-Arte.** VI Congresso internacional sobre patologias e reabilitação de estruturas, Sixth edition. Córdoba – Argentina. CINPAR 2010

LEVY, S. M., **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria,** Tese de Doutorado, EPUSP/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2001.

LINS, D. N.. **Análise da resistência à compressão do cimento LC³ e a influência das adições minerais em seu desempenho.** 2017.

LIU, Y.; LIN, C.; WU, Y. (2007) **Characterization of red mud derived from a combined Bayer Process and bauxite calcination method.** *Journal of Hazardous Materials*, 146, p.255-261.

LIU, X. *et al.* **Structural investigation relating to the cementitious activity of bauxite residue - Red mud.** *Cement and Concrete Research*, 2011.

LIU, Y. *et al.* **Assessment of pozzolanic activity of calcined coal-series kaolin.** *Applied Clay Science*, v. 143, p. 159–167, 2017.

LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. **Supplementary cementitious materials.** *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011.

LÜBECK, A; GASTALDINI, A. L. G; BARIN, D. S.; SIQUEIRA, H. C. **Compressive strength and electrical properties of concrete with Portland cement and blastfurnace slag.** *Cement & Concrete Composites*, v.34, p. 392-399, 2012.

MANCUSO, A. C. B. *et al.* **Estatística descritiva: perguntas que você sempre quis fazer, mas nunca teve coragem.** *Clinical & Biomedical Research*, v. 38, n. 4, 2018.

MARTINS, M. L. Figueiredo & PINHEIRO, I. P.. **Rejeitos da indústria de produção de alumínio e magnésio como substituinte parcial do Cimento Portland para a Mitigação dos Impactos Ambientais causados pela Emissão de CO₂.** VI Congresso de Engenharia Civil, Juiz de Fora/MG, 15 a 17 de maio de 2019.

MARTINS, M. L. F. **Subprodutos da Fabricação de Magnésio Metálico e Refino da Bauxita como Substituintes ao Cimento Portland.** 2019. 90f. 2001.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Ciência e Desenvolvimento de Materiais.

MATOS, M. A. C. **Erro e tratamento de dados analíticos.** Química Analítica IV - II sem/2012

MEDEIROS, M. H. F. de *et al.* **Resíduo de cerâmica vermelha e fíler calcário em compósito de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcali-silica.** *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 21, n. 2, p. 282-300, 2016.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; GANS, P. S. **Efeito da adição de pozolana na resistividade elétrica superficial do concreto.** *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 2, n. 3, 2017.

MEDJIGBODO, G. *et al.* **Hydration, shrinkage, and durability of ternary binders containing Portland cement, limestone filler and metakaolin.** *Construction and Building Materials*, v. 183, p. 114-126, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais- 2ª Edição.** Ed.: IBRACON. ISBN.:978-85-98576213. Português, 2014.

MELO, L.S.C. **Caracterização de compostos de cimento Portland confeccionados com resíduos do processamento a úmido de rochas ornamentais de origens distintas. Mestrado em materiais de construção civil.** Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

MENDES, M. **RESISTIVIDADE ELÉTRICA.** Hospedado <http://brasilecola.uol.com.br/fisica/resistividade-eletrica.htm>. ACESSADO DIA 15/08/2018. 20XX.

MENEZES, R. M. R. O. *et al.* **Efeito do teor de água e tamanho de partícula na decomposição térmica de pastas de cimento moídas.** *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 25, n. 1, 2020.

MOHAMMED, M. K.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. **Carbonation of filler typed self-compacting concrete and its impact on the microstructure by utilization of 100% CO₂ accelerating techniques.** *Construction and Building Materials*, v. 50, p. 508-516, 2014.

- MOTA, D. A. **Influência da adição de materiais pozolânicos na corrosibilidade do concreto armado, analisada por meio do potencial de corrosão e resistividade elétrica.** Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana. Salvador, p. 141. 2016.
- NAKANISHI, E. Y. **Cinza residual da queima de biomassa do capim elefante (*Pennisetum purpureum*) como material pozolânico substituto do cimento Portland.** 2013. Dissertação (Mestrado em Qualidade e Produtividade Animal) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2013.
- NASCIMENTO, Guilherme Colle et al. **Caracterização físico-química da cinza de casca de arroz oriunda do processo termelétrico do sul de Santa Catarina-Brasil.** *Ciência e Natura*, v. 37, n. 3, p. 634-640, 2015.
- NAZARI, A.; BAGHERI, A.; RIAHI, S. **Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash.** *Materials Science and Engineering A*, v. 528, n. 24, p. 7395– 7401, 2011.
- NEPOMUCENO, M. C. S.; BERNARDO, L. F. A.; PINTO, H. A. S., **Betão estrutural de agregados leves de resistência normal e alta: dos estudos laboratoriais à produção no local- caso de estudo**, 4º Cong. Nac. Construção, Coimbra, 18-20 Dez. 2012.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: Pini, 5ª edição. 2015. 828p.
- NEUMANN, R.; SCHENEIDER, C. L.; ALCOVER NETO A. (2004) **Caracterização Tecnológica de Minérios. Capítulo 3.** Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro – RJ, p. 55-106.
- OCANHA, K. E. **Caracterização de Cinza de Casca de Arroz para uso como material adsorvente.** 2015.
- OLIVEIRA, C. F. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais de Construção) – Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG Brasil, 2018.
- PÁDUA, P. G. L. **Desempenho de compósitos cimentícios fabricados com cimentos aditivados com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar in natura e beneficiadas.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- PAYA, J. *et al.* **Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue . Thermogravimetric analysis studies on FC3R – lime pastes.** *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 1085–1091, 2003.
- PERIM, J. R. *et al.* **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada.** 2013.
- PIASTA, W., & ZARZYCKI, B. **The effect of cement paste volume and w/c ratio on shrinkage strain, water absorption and compressive strength of high performance concrete.** *Construction and Building Materials*, 140, 395-402. 2017.
- PIMENTEL-GOMES F., **Curso de Estatística Experimental**, 1985. Piracicaba-SP. ESALQ/USP. 467p.
- POLDER, R. B. **Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC – 154 technical recommendation.** *Construction and Building Materials*, v. 15, 2001, p. 125-131.

Proceq S. A. **Manual Resipod**. 2017. Disponível em: <https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Resipod_Sales%20Flyer_Portuguese_high.pdf>. Acesso em 20 de outubro de 2018.

QUARCIONI, V. A. *et al.* **Indirect and direct Chapelle's methods for the determination of lime consumption in pozzolanic materials**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo, v. 8, n. 1, p. 1-7, Fev. 2015.

RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou da substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos** – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2015.

RAMACHANDRAM, V. S. **Thermal analysis**. In: **Handbook of Analytical Techniques in Concret Science and Technology**. *J. Building Material series*. 2001. Pg. 127-173.

RAMEZANIANPOUR, A.A.; PILVAR, A.; MAHDIKHANI, M.; MOODI, F. **Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength**. *Construction and Building Materials*, v.25, p.2477-2479, 2011.

RAVERDY, M. *et al.* **Appréciation de l'Activité Pouzzolanique de Constituents Secondaires**. In: CONGRÉS INTERNATIONAL DE LA CHIMIE DES CIMENTS, v. 3, 1980. p.36-41.

REAL, L. V. **Efeito de adições pozolânicas na estimativa de vida útil do concreto exposto a cloretos através da resistividade elétrica superficial**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Departamento de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. 2015.

REAL, L. V. *et al.* **Influência de materiais pozolânicos na resistividade elétrica superficial do concreto**. Revista Técnico-Científica, n. 21, 2019.

RÊGO, J. H. S. **Viabilidade técnica da utilização da Cinza de Casca de Arroz produzida sem controle da temperatura como adição mineral ao cimento**. 2001. 200f. 2001. Orientador Prof. Dr. Enio Pazini Figueiredo. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiana.

RÊGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento—aspectos de microestrutura das pastas**. 2004. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado. Faculdade de Tecnologia. UNB. Brasília, 2004, 274p.

REIS, F. J. L. **Materiais aglomerantes, agregados e adições minerais**; *Linkedin*. 2016. Disponível em <<https://www.slideshare.net/CleisiBarbosa/materiais-aglomerantes-agregados-e-adies-mineraispptx>>. Acesso em 27 de julho de 2018.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J.A.; MORELLI, M.R. **Efeito da adição de lama vermelha na corrosibilidade do concreto armado avaliado por meio de técnicas eletroquímicas** – Revista Ibracon de Estruturas e Materiais – v. 5, nº 4, São Paulo 2012

ROCHA, F.; CAMPOS, H.; SOARES-ANDRADE, T.; ROQUITSKI, A.; & MEDEIROS, M. **Influência da Espessura de Cobrimento e da Contaminação por Cloretos nas Leituras de Potencial de Corrosão das Armaduras**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, 8(2), pp. 43-53. 2014.

RODRIGUES, R.; BRITO, J. D.; SARDINHA, M. **Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge**. *Construction and Building Materials*, v. 77, p. 349-356, 2015.

RODRIGUES, M.S. *et al.* **Characterization and pozzolanic evaluation of sugar cane bagasse ashes.** IC-NOCMAT 2010, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NONCONVENTIONAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES. Cairo-Egypt, p. 1-9. Anais, 2010.

RUPASINGHE, M. *et al.* **Investigation of strength and hydration characteristics in nano-silica incorporated cement paste.** *Cement and Concrete Composites*, v. 80, p. 17–30, 2017.

SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland.** Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2014.

SALES, R.B.C. **Estudo de compostos de cimento Portland utilizando o ensaio de frequência ressonante forçada e termografia.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SALOMÃO, P. E. A. *et al.* **Corrosion protection study in construction steel armor.** *Research, Society and Development*, v. 8, n. 1, p. 181504, 2019.

SANTOS, M. O. dos *et al.* **Estudo de concretos com adição de nanosílica submetidos à ação combinada de cloretos e CO₂.** 2019.

SANTOS, M J. C. *et al.* **Avaliação da reatividade do metacaulim reativo produzido a partir do resíduo do beneficiamento de caulim como aditivo na produção de argamassa.** 2013.

SANTOS, A. M.; CABRAL, L. M. C.; MONTEIRO, E. B.; HELENE, P. R. L. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico para diferentes dosagens de concreto.** Anais do 55o Congresso Brasileiro de Concreto, 2013

SATA, V. *et al.* **Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix.** *Cement & Concrete Composites*, v. 34, p. 94-100, 2012.

SCRIVENER, K. L.; NONAT, A. **Hydration of cementitious materials, present and future.** *Cement and concrete research*, v. 41, n. 7, p. 651-665, 2011.

SFIKAS, I. P.; BADOGIANNIS, E. G.; TREZOS, K. G. **Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin.** *Construction and Building Materials*, v. 64, p. 121-129, 2014.

SHATAT, M. R. **Hydration behavior and mechanical properties of blended cement containing various amounts of rice husk ash in presence of metakaolin.** *Arabian Journal of Chemistry*, v. 9, p. S1869-S1874, 2016.

SHI, W. *et al.* **Corrosion Investigation of Reinforced Concrete Based on Piezoelectric Smart Materials.** *Materials*, v. 12, n. 3, p. 519, 2019.

SHIMAKURA, S. E. **Interpretação do coeficiente de correlação.** [Disponível em: www.est.ufpr.br], 2002.

SHINZATO, M. C. *et al.* **Efeito da adição de lama vermelha nas propriedades eletroquímicas e de adsorção de um latossolo vermelho.** Revista do Instituto Geológico, v. 36, n. 1, p. 51-65, 2015.

SHIROMA, L. *et al.* **Atividade pozolânica de resíduos de isoladores de porcelana em matrizes cimentícias.** 2016.

SHUI, Z. *et al.* **Dominant factors on the early hydration of metakaolin-cement paste.** *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, v. 25, n. 5, p. 849–852, 2010.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. **Supplementary Cementing Materials** – Springer editor, Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

SILVA, D. C. M. da. **Resistividade**; *Alunos online – Física*. 2015. Disponível em <<https://alunosonline.uol.com.br/fisica/resistividade.html>>. Acesso em 27 de julho de 2018.

SILVA, L. M. A. **Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás, 2016.

SILVA, P. R. da; BRITO, J.. **Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler.** *Construction and Building Materials*, v. 86, p. 101-112, 2015.

SILVA, E. J. da *et al.* **Avaliação por análise de DRX da influência do beneficiamento de moagem na atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 24, n. 4, 2019.

SINGH, N.; SINGH, S. P. **Carbonation and Electrical Resistance of self-Compacting Concretes Made with Recycled Concrete Aggregates and Metakaolin.** *Construction and Building Materials*, v. 121, p. 400-409, set. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.009>

SINGH, M; SRIVASTAVA, A.; BHUNIA, D. **Long term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste marble powder slurry.** *Construction and Building Materials*, v. 198, p. 553-569, 2019.

SINGH, M., SRIVASTAVA, A.; BHUNIA, D. **An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry.** *Construction and Building Materials*, p. 471, Mar., 2017.

SIQUEIRA, I. S., DWECK, J. & TOLEDO FILHO, R. D. **Effect of microcrystalline and microfibrillated cellulose on the evolution of hydration of cement pastes by thermogravimetry.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (2020). .

SOARES, E. N. C.; GARCIA, D. C. S.; YOSHIDA, M. I.; AGUILAR, M. T. P.; FIGUEIREDO, R. B. **Avaliação da pozolanicidade das cinzas do Capim Elefante Cameroon por ensaios de termogravimetria.** *CIÊNCIA & ENGENHARIA* , v. 26, p. 41-48, 2017.

SOARES, A. P. F.; VASCONCELOS, L. T.; NASCIMENTO, F. B. C. do. **Corrosão em armadura de concreto.** Maceió: Ciências Exatas e Tecnológicas, 2015.

SOARES JR, P. R. R.; BARRETO, R. R.. **Steel Fiber Reinforced Concrete Durability Using Electrical Resistivity Test.** Belo Horizonte: Revista Construindo, 2019.

SOARES, A. de S. **Identificação dos Mecanismos de Deterioração das Pontes de Concreto Armado na Região do Curimataú Oriental Paraibano: Estudo de Caso.** 2015. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciência Tecnologia e Saúde, Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2015.

SOARES, E. N. C. **Avaliação da atividade pozolânica das cinzas do capim elefante por análise termogravimétrica e ensaio de variação de condutividade elétrica em solução de hidróxido de cálcio.** 2017.

SONG, Y. *et al.* **Corrosion of reinforcing steel in concrete sewers.** *Science of the Total Environment*, v. 649, p. 739-748, 2019.

SONG, H., JEONG, Y., BAE, S., *et al.*, **A study of thermal decomposition of phases in cementitious systems using HT-XRD and TG,** *Construction and Building Materials*, v. 169, pp. 648–661, Mar. 2018.

SOUZA, D. J. de. **Capacidade de adições minerais em mitigar o ataque por sulfatos de sódio e magnésio em argamassas de cimento Portland.** 2016.

SUA-IAM, G.; SOKRAI, P.; MAKUL, N. **Novel ternary blends of Type 1 Portland cement, residual rice husk ash, and limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 1028-1034, 2016.

TCHAKOUTÉ, H. K. *et al.* **Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: a comparative study.** *Construction and Building Materials*, v. 114, p. 276-289, 2016.

TEIXEIRA, M. M.. **Resistividade elétrica; Brasil Escola.** Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/resistividade-eletrica.htm>>. Acesso em 27 de julho de 2018.

TIRONI, R.; TREZZA, M. A.; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E. F. **Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v.117, 2014, p.547-556.

ULIANA, J.G.; CALMON, J.L; VIEIRA, G.L.; TEIXEIRA, J.E.S.L.; NUNES, E. **Heat treatment of processing sludge of ornamental rocks: application as pozzolan in cement matrices.** *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 8, p. 100-123, 2015.

VARDHAN, K.; GOYAL, S.; SIDDIQUE, R.; SINGH, M. **Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement.** *Construction and Building Materials*, v. 96, p. 615-621, 2015.

VIEIRA, A. P., TOLEDO FILHO, R. D., TAVARES, L. M., & CORDEIRO, G. C. (2020). **Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 236, p. 117553, 2020.

WEERDT, K. de; BEN HAHA, M.; LE SAOUT, G.; KJELLEN, K. O.; JUSTNES, H.; LOTHENBACH, B.. (2011) **Hydration mechanisms of ternary Portland cement containing limestone powder and fly ash.** *Cement and Concrete Research*. 2011; vol. 41 (3).

ZHANG, C.; WANG, A.; TANG, M.; LIU, X. **The filling role of pozzolanic material.** *Cement and Concrete Research*. n26, v.6, p.943-947, 1996.

ZHU, W. *et al.* **Influences of corrosion degree and corrosion morphology on the ductility of steel reinforcement.** *Construction and Building Materials*, v. 148, p. 297-306, 2017.