

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DA LAMA DE
MARMORARIA COMO ELEMENTO DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL
DO CIMENTO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO**

Fabiana Madeira de Araújo

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Junho/2019

FABIANA MADEIRA DE ARAÚJO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DA LAMA DE MARMORARIA
COMO ELEMENTO DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO
NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Chahud

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

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

FABIANA MADEIRA DE ARAÚJO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DA LAMA DE MARMORARIA COMO ELEMENTO DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Construção Civil".



Prof. Dr. Eduardo Chahud
Coordenador do Curso de Mestrado em Construção Civil
da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

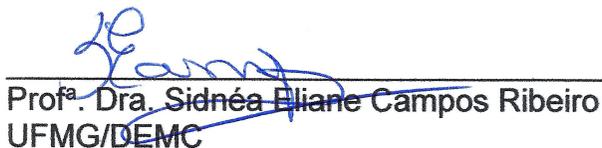
Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Chahud
Orientador - UFMG/DEMC



Profª. Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar
Coorientadora - UFMG/DEMC



Profª. Dra. Sidnéa Eliane Campos Ribeiro
UFMG/DEMC



Profª. Dra. Luciana Nunes de Magalhães
ENGE - Escola Superior Dom Helder Câmara

Belo Horizonte, 26 de junho de 2019

A663a

Araújo, Fabiana Madeira de.

Análise da influência do resíduo da lama de marmoraria como elemento de substituição parcial do cimento nas propriedades do concreto [recurso eletrônico] / Fabiana Madeira de Araújo. – 2019.

1 recurso online (xx,145 f.: il., color.): pdf.

Orientador: Eduardo Chahud.

Coorientadora: Maria Teresa Paulino Aguilár.

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

Anexos: f. 144-145.

Bibliografia: f. 130-143.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil - Teses. 2. Concreto – Durabilidade - Teses.
3. Concreto - Propriedades mecânicas - Teses. 4. Resistividade elétrica - Teses. I. Chahud, Eduardo. II. Aguilár, Maria Teresa Paulino. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691(043)

Dedico este trabalho como objetivo de incentivar e auxiliar os empresários de marmoraria em práticas sustentáveis como a reutilização de materiais e a destinação adequada dos resíduos sólidos produzidos, visando na criação de um futuro sustentável tanto para os negócios, à sociedade e ao meio ambiente, adaptando a um meio em constante transformação.

Dedico também a todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, com a sua realização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ter ajudado a realizar mais um grande sonho de conquistar o título de Mestre, e pela saúde que tem me dado para que eu possa superar diariamente os desafios impostos pela vida.

Aos meus queridos pais, irmãos e familiares, minhas maiores motivações, por me incentivar, acreditar e por compreenderem a necessidade de dedicação ao Mestrado.

Ao meu namorado, pela paciência, compreensão e companheirismo no decorrer destes longos meses.

Ao coordenador e professor Dr. Eduardo Chahud, pela orientação, incentivo, paciência, inspiração, ensinamentos e por todas as contribuições para a qualidade e concretização deste trabalho.

À Professora Dra. Maria Teresa, pela orientação e assistência para a realização da dissertação.

Agradeço 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 e de Química da UFMG, aos colegas do laboratório, do mestrado e disciplinas isoladas, pela disponibilidade e por todo o apoio e colaboração na realização dos ensaios.

Aos membros da banca, pela disponibilidade e pela colaboração.

À Universidade Federal de Minas Gerais pela infraestrutura para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Aos empresários de marmoraria que deixaram utilizar os resíduos de rochas ornamentais (lama de marmoraria ou lama abrasiva) e pela paciência na explicação do processo.

A empresa Martins Lanna pela doação de agregados graúdo e miúdo.

A empresa InterCement pelo fornecimento dos cimentos *Portland* utilizados.

A empresa ViaTest e Labcon Consultoria pelos ensaios realizados e serviços prestados com tanta paciência e dedicação.

Por fim, minha eterna gratidão a todos vocês que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma no desenvolvimento e construção desta pesquisa.

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação.
Mas se você não fizer nada, não existirão resultados.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

Atividades econômicas e processos produtivos desenvolvidos na sociedade têm contribuído para a geração de resíduos. Em relação ao beneficiamento de rochas ornamentais, especialmente na fase do corte e polimento realizado por equipamentos à úmido, é gerado um tipo de resíduo denominado lama de marmoraria ou lama abrasiva, composta pela mistura do pó de diferentes tipos de rochas, água e restos de elementos abrasivos. Esse volume de resíduos vem apresentando um aumento significativo diante da demanda da construção civil e a grande participação de empresas brasileiras no mercado nacional e internacional em produção e exportação de rochas ornamentais. Em consequência, muitas empresas de marmoraria continuam descartando seus resíduos de forma irregular ou sem um devido tratamento adequado, sem previsão de utilização ou reuso, normalmente em aterros industriais ou aterrados em lugares clandestinos, poluindo o solo e água, e quando seco esse resíduo transforma em pó fino sendo prejudicial à saúde humana. No entanto, um dos problemas enfrentados em alguns municípios se refere à destinação final dos resíduos e neste sentido, o trabalho vem analisar a influência do uso do resíduo da lama de marmoraria (em pó) na massa do concreto (sem fins estruturais) como substituição parcial do peso do cimento. Vários estudos vêm sendo desenvolvidos para o aproveitamento do resíduo de rochas ornamentais e tem motivado a busca por alternativas tecnológicas viáveis, bem como sua aplicação como insumo na construção civil. Diante disso, quatro misturas de concreto contendo a lama de marmoraria, inclusive o traço de referência, foram preparadas e avaliadas a influência do resíduo nas propriedades mecânicas e nos parâmetros de durabilidade nas idades 3, 7, 14, 28, 60, 91, 120 e 180 dias através dos ensaios de resistência mecânica, módulo de elasticidade, resistividade elétrica superficial e volumétrica, absorção de água por imersão e capilaridade e trabalhabilidade. A metodologia experimental está embasada nos ensaios relacionados a finura, análise física, mineralógica, termogravimétrica e atividade pozolânica do resíduo. Neste sentido, os corpos de prova foram confeccionados com cimento *Portland* CPV ARI, areia média artificial, brita nº 1 e relação a/c de 0,53. O trabalho procurou investigar o efeito da adição do pó da lama de marmoraria em teores de 10%, 20% e 30% na mesma proporção em relação a substituição do peso do cimento. Os resultados indicam que a aplicação do resíduo nas misturas consideravelmente não influenciou em algumas propriedades, indicando que até 20% do pó da lama de marmoraria pode ser usado como substituição parcial do peso do cimento. No entanto, a partir de 20% de resíduo em substituição do cimento podem comprometer as características técnicas da mistura e afetar algumas propriedades no estado fresco e endurecido do concreto. Em conformidade com a durabilidade, a influência do resíduo parece não comprometer a resistividade elétrica superficial e volumétrica, mesmo apresentando uma queda com o aumento do teor de porcentagem do resíduo nas misturas. Verificou-se uma efetiva correlação entre os valores de resistência mecânica e a resistividade elétrica e módulo de elasticidade, porém pode-se dizer que a resistência e a absorção de água dos concretos estão inversamente relacionadas. Todavia, este resíduo da lama de marmoraria recolhido no tanque da empresa é formado por diferentes tipos de rochas e apresentou um ganho de resistência acima de 25 MPa aos 28 dias para as misturas contendo 10% e 20%. Dessa forma, o uso do resíduo pode colaborar para o desenvolvimento sustentável, podendo contribuir para a redução do consumo do cimento, bem como propiciar um destino final melhor ao resíduo.

Palavras-chave: *Resíduos da lama de marmoraria. Concreto. Propriedades mecânicas. Durabilidade. Resistividade elétrica.*

ABSTRACT

Economic activities and productive processes developed in society have contributed to the generation of waste. Regarding the processing of ornamental rocks, especially in the cutting phase and polishing carried out by equipment wet, a type of residue called marble slurry or abrasive slurry is generated consisting of the powder mix of different types of rock, water and residues of abrasive elements. This volume of waste is showing a significant increase on the construction demand and the large participation of Brazilian companies in the domestic and international markets in the production and export of ornamental rocks. Consequently, many marble companies continue discarding their waste irregularly or without due appropriate treatment, with no provision for use or reuse, usually in industrial or grounded landfills in underground locations, polluting the soil and water, and when dry this residue becomes fine powder being harmful to human health. However, one of the problems in some municipalities relates to the disposal of waste in this sense, the work comes to analyze the influence of the use of the residue of marble slurry (powder) in the mass of concrete (without structural purposes) as a substitute partial weight of cement. Several studies have been developed for the use of the residue of ornamental and has motivated the search for viable alternative technologies and their application as raw material in construction. Thus, four mixtures of concrete containing marble slurry including the feature of reference, were prepared and evaluated the influence of residue on the mechanical properties and the durability parameters in aged 3, 7, 14, 28, 60, 91, 120 and 180 days through mechanical resistance, modulus of elasticity, surface and volume resistivity, by immersion and capillary water absorption and workability. The experimental methodology is grounded in trials relating fineness, physics analysis, mineralogical, thermogravimetric and pozzolanic activity of the residue. In this regard, the samples were prepared with Portland cement CPV ARI artificial medium sand, gravel 1 and w/c ratio of 0.53. The study aimed to investigate the effect of the addition of mud marble powder content of 10%, 20% and 30% in the same proportion to the replacement of cement weight. The results indicate that the application of the residue in the mixtures did not influence considerably on some properties, indicating that 20% of marble powder slurry can be used as partial replacement of cement weight. However, from 20% residue in partial replacement of cement may compromise the technical characteristics of the mixture and affect some properties of fresh and hardened concrete. In accordance with the durability, the influence of residue seems not impair the surface and volume resistivity, even showing a decrease with the increase of the residue percentage content of the mixtures. There was a correlation between effective values of mechanical resistance and electrical resistivity and modulus of elasticity, but it can say that the strength of concrete and water absorption are inversely related. However, this residue slurry collected in the marble company tank is formed by different types of rocks and showed a gain strength above 25 MPa at 28 days for the mixtures containing 10% and 20%. Thus, the use of waste contribute to sustainable development, contributing to the reduction of cement consumption, as well as providing a better final destination to the residue.

Keywords: Marble factory slurry waste. Concrete. Mechanical properties. Durability. Electrical resistivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Principais exportações brasileiras por país de destino em 2018 (US\$1.000) .	7
Figura 3.2 - Principais estados exportadores em 2018 (US\$1.000).....	7
Figura 3.3 - Evolução anual do faturamento das exportações brasileiras de rochas ornamentais 1999 a 2018.....	9
Figura 3.4 - Lama de marmoraria próxima a indústria	10
Figura 3.5 - Lama de marmoraria exposta ao meio ambiente.....	10
Figura 3.6 - Fluxograma do processo do beneficiamento de rochas ornamentais	12
Figura 3.7 - Local de estocagem das placas	14
Figura 3.8 - (a) Máquinas no processo de levigamento; (b) polimento e lustração da peça	14
Figura 3.9 - (a) Máquina de corte automático; (b) Máquina de corte com disco diamantado	14
Figura 3.10 - Processo de desidratação da lama e reutilização da água.....	16
Figura 3.11 - Desenho esquemático de sonda Wenner de 4 eletrodos	31
Figura 3.12 - Desenho esquemático de resistividade elétrica volumétrica.....	31
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas de ensaios da pesquisa.....	36
Figura 4.2 - Caracterização do agregado miúdo.....	37
Figura 4.3 - Caracterização do agregado graúdo	38
Figura 4.4 - Lama armazenada no tanque após tratamento	39
Figura 4.5 - Processo de preparação do resíduo para aplicação na pesquisa.....	40
Figura 4.6 - (a) Resíduo após passar pela secagem em estufa no laboratório; (b) Destorroamento manual do resíduo; (c) Resíduo de lama em pó e ensacado.....	41
Figura 4.7 - Corpos de prova de (10 x 20) cm e (15 x 30) cm moldados	44
Figura 4.8 - Fluxograma de caracterização do resíduo da lama de marmoraria	46
Figura 4.9 - Equipamento de analisador de densidade real.....	47
Figura 4.10 - Frasco volumétrico submerso no banho termostático.....	47
Figura 4.11 - Caracterização e granulometria do resíduo	49

Figura 4.12 - Equipamento granulômetro a laser (Marca Cilas).....	49
Figura 4.13 - Equipamento de difratograma de raios X	51
Figura 4.14 - Ensaio de pozolanicidade.....	53
Figura 4.15 - Ensaio de consistência por abatimento do tronco de cone (<i>slump test</i>).....	54
Figura 4.16 - Prensa hidráulica e posicionamento do corpo de prova após ruptura.....	55
Figura 4.17 - (a) Determinação do eixo do corpo de prova e (b) Prensa hidráulica do ensaio de resistência à compressão diametral	56
Figura 4.18 - Procedimento de medição de resistividade elétrica superficial dos CP's	57
Figura 4.19 - Equipamento do ensaio de resistividade elétrica volumétrica.....	58
Figura 4.20 - Equipamento de módulo de elasticidade por frequência ressonante	60
Figura 4.21 - Aparelho de módulo de elasticidade estático.....	61
Figura 4.22 - Ensaio de absorção de água por imersão	63
Figura 4.23 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	64
Figura 4.24 - (a) Rompimento diametral e (b) medição das alturas de ascensão capilar .	64
Figura 5.1 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	67
Figura 5.2 - Ensaio de impurezas orgânicas do agregado miúdo	68
Figura 5.3 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo	70
Figura 5.4 - Gráfico comparativo de resistência do mês do cimento CPV ARI.....	72
Figura 5.5 - Curva de distribuição granulométrica do CPV ARI	72
Figura 5.6 - Termograma do cimento CPV ARI	73
Figura 5.7 - Difratograma de raios X do Cimento Portland CPV ARI	74
Figura 5.8 - Curva de distribuição granulométrica do resíduo da lama de marmoraria	76
Figura 5.9 - Distribuição granulométrica do resíduo de lama de marmoraria.....	77
Figura 5.10 - Curva da distribuição granulométrica do resíduo.....	79
Figura 5.11 - Termograma do resíduo da lama de marmoraria	81
Figura 5.12 - Difratograma de raios X do resíduo de lama de marmoraria coletado no primeiro semestre do ano de 2018.....	82
Figura 5.13 - Difratograma de raios X do resíduo de lama de marmoraria coletado no segundo semestre do ano de 2018	82

Figura 5.14 - Resultados de abatimento do concreto (<i>slump test</i>) no estado fresco	86
Figura 5.15 - Resultados médio do ensaio de resistência à compressão axial	88
Figura 5.16 - Resultados médio do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias	90
Figura 5.17 - Resultados médio do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos concretos nas idades 28 e 60 dias.....	92
Figura 5.18 - Correlação: resistência à compressão axial x resistência à tração por compressão diametral aos 28 e 60 dias nas misturas TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs	94
Figura 5.19 - Resultados médio do ensaio de resistividade elétrica superficial dos concretos em CP's (10 x 20) cm.....	96
Figura 5.20 - Resultados médio do ensaio de resistividade elétrica superficial dos concretos aos 7, 14 e 28 dias em CP's (15 x 30) cm	98
Figura 5.21 - Correlação: resistência à compressão axial x resistividade elétrica superficial dos concretos aos 28 e 180 dias para as misturas TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs em CP's (10 x 20) cm.....	100
Figura 5.22 - Correlação do ensaio de resistência à compressão axial x resistividade elétrica superficial dos concretos aos 28 dias para as misturas TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs em CP's (15 x 30) cm	101
Figura 5.23 - Resultados médio do ensaio de resistividade elétrica volumétrica dos concretos em CP's (10 x 20) cm.....	103
Figura 5.24 - Resultados médio de resistividade elétrica volumétrica dos concretos aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias em CP's (15 x 30) cm.....	104
Figura 5.25 - Correlação: resistência à compressão axial x resistividade elétrica superficial aos 28 e 180 dias em CP's (10 x 20) cm	106
Figura 5.26 - Correlação: resistência à compressão axial x resistividade elétrica superficial dos concretos aos 28 dias em CP's (10 x 20) cm e (15 x 30) cm	107
Figura 5.27 - Comparação: resistividade elétrica superficial x volumétrica dos concretos TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs aos 7, 14 e 28 dias em CP's (10 x 20) cm.....	108
Figura 5.28 - Comparação: resistividade elétrica superficial x volumétrica dos concretos TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs aos 7, 14 e 28 dias em CP's (15 x 30) cm.....	109
Figura 5.29 - Resultados médio entre a resistência à compressão axial e módulo de elasticidade estático aos 28 dias.....	110

Figura 5.30 - Resultados médio do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico dos concretos aos 3, 7, 14, 21, 28, 60, 91, 120 e 180 dias em CP's (10 x 20) cm.....	112
Figura 5.31 - Correlação: resistência à compressão axial x módulo de elasticidade dinâmico e estático das misturas TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs aos 28 dias.....	114
Figura 5.32 - Correlação: resistência à compressão axial x módulo de elasticidade dinâmico das misturas TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs nas idades 28 e 180 dias.	115
Figura 5.33 - Resultados médio do ensaio de absorção por imersão e índice de vazios aos 60 dias em CP's (10 x 20) cm	116
Figura 5.34 - Resultados das massas específicas saturada, seca e real aos 60 dias....	118
Figura 5.35 - Correlação: resistência à compressão x absorção de água por imersão em 72 horas aos 60 dias	119
Figura 5.36 - Resultados médio do ensaio de absorção de água por capilaridade	120
Figura 5.37 - Correlação: resistência à compressão axial x absorção de água por capilaridade em 72 horas aos 60 dias	122
Figura 5.38 - Desenho esquemático do processo de fabricação de pavers.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Probabilidade de corrosão em função da resistividade	28
Tabela 4.1 - Dimensionamento de dosagens	42
Tabela 4.2 - Parâmetro dos ensaios.....	43
Tabela 5.1 - Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo.....	66
Tabela 5.2 - Propriedades físicas do agregado miúdo.....	68
Tabela 5.3 - Determinação da composição granulométrica do agregado graúdo	69
Tabela 5.4 - Propriedades físicas do agregado graúdo	70
Tabela 5.5 - Características do cimento CPV ARI da Marca CAUÊ - InterCement	71
Tabela 5.6 - Composição química do Cimento Portland CPV ARI - InterCement	71
Tabela 5.7 - Determinação da composição granulométrica do resíduo	76
Tabela 5.8 - Características física do resíduo (lama de marmoraria).....	77
Tabela 5.9 - Diâmetros da amostra do resíduo da lama de marmoraria (em pó).....	78
Tabela 5.10 - Análise química semiquantitativa da amostra via fluorescência de raios X	80
Tabela 5.11 - Resultados do ensaio de pozolanicidade.....	84
Tabela 5.12 - Valores do ensaio de abatimento do concreto no estado fresco	85
Tabela 5.13 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial	88
Tabela 5.14 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias em CP's (15 x 30) cm	90
Tabela 5.15 - Média dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 e 60 dias em CP's (10 x 20) cm	92
Tabela 5.16 - Média dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (a) e 60 dias (b)	93
Tabela 5.17 - Média dos resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial nas idades 3, 7, 14, 28, 42, 60, 91, 120 e 180 dias em CP's (10 x 20) cm	95
Tabela 5.18 - Média dos resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial	97
Tabela 5.19 - Média dos resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial em classificação dos concretos quanto a risco de corrosão em CP's (15x30) cm	99

Tabela 5.20 - Média dos resultados da resistência à compressão axial e	99
Tabela 5.21 - Média dos resultados da resistência à compressão axial e resistividade elétrica superficial aos 28 dias em CP's (15 x 30) cm.....	100
Tabela 5.22 - Média dos resultados de resistividade elétrica volumétrica CP's (10 x 20) cm	102
Tabela 5.23 - Média dos resultados de resistividade elétrica volumétrica CP's (15 x 30) cm	104
Tabela 5.24 - Média dos resultados de resistência à compressão axial e resistividade elétrica volumétrica nas idades de 28 dias (a) e 180 dias (b) em CP's (10 x 20) cm	105
Tabela 5.25 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial e resistividade elétrica volumétrica aos 28 dias em CP's (10 x 20) cm e (15 x 30) cm	106
Tabela 5.26 - Média dos resultados de resistividade elétrica superficial (a) e resistividade elétrica volumétrica (b) aos 7, 14 e 28 dias em CP's (10 x 20) cm	108
Tabela 5.27 - Média dos resultados de resistividade elétrica superficial (a) e resistividade elétrica volumétrica (b) aos 7, 14 e 28 dias em CP's (15 x 30) cm	109
Tabela 5.28 - Média dos resultados do ensaio do módulo de elasticidade estático aos 28d	110
Tabela 5.29 - Média dos resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico em CP's (10 x 20) cm	112
Tabela 5.30 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias (a) e 180 dias (b).	114
Tabela 5.31 - Média dos resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 60 dias em CP's (10 x 20) cm	116
Tabela 5.32 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão e absorção de água por imersão em 72 horas aos 60 dias.....	118
Tabela 5.33 - Média dos resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade..	120
Tabela 5.34 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade por 72 horas aos 60 dias	122
Tabela 5.35 - Especificações de norma para avaliação mecânica de pavers	124
Tabela A.0.1 - Análise elementar ou CHN para amostras de lama.....	145
Tabela A.0.2 - Análise elementar ou CHN para amostras de lama de marmoraria	145

LISTA DE SÍMBOLOS

A	ampère
A	Área da seção transversal
cm	centímetro
cm ²	centímetro quadrado
cm ² /g	centímetro quadrado por grama
cm ³ /g	centímetro cúbico por grama
g	grama
g/cm ²	grama por centímetro quadrado
g/cm ³	grama por centímetro cúbico
h	hora
H	Altura
Hz	Hertz
I	Corrente elétrica
kg	quilograma
kg/m ³	quilograma por metro cúbico
kN	quilonewton
kPa	quilopascal
kΩ.m	quiloohms centímetro
l	comprimento
m ²	metro quadrado
m ³	metro cúbico
μ	micro
m	metro
min	minuto
ml	milílitro
mm	milímetro
MPa	mega pascal
N	Newton
°C	graus Celsius
R	resistência elétrica
ε	resistividade elétrica

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASTHO	American Association of State Highway and Transportation Official
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	Concreto Armado
CP V ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CP's	Corpos de prova
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DRX	Difratometria de raios X
FEAM	Federação Estadual do Meio Ambiente
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PF	Perda ao fogo
SINROCHAS/MG	Sindicato Intermunicipal da Indústria de Beneficiamento de Rochas Ornamentais no Estado de Minas Gerais
TGA	Termogravimetria
TRf	Traço de referência
T10%Cs	Traço com substituição de 10% do cimento pelo resíduo
T20%Cs	Traço com substituição de 20% do cimento pelo resíduo
T30%Cs	Traço com substituição de 30% do cimento pelo resíduo
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
<	menor
>	maior
#	malha de peneira
a/c	Relação água/cimento
ν	coeficiente de poisson
σ	Condutividade elétrica
ρ	Densidade do corpo de prova
V	Diferença de potencial
Cl-	Íon Cloreto
C ₂ S	Silicato de cálcio
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₂ S	Silicato de cálcio
C ₃ S	Silicato tricálcico
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio ou cal hidratada
CaCl ₂	Cloreto de cálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CH	Hidróxido de cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
D ₁₀	Diâmetro em que 10% da amostra é passante (em massa)
D ₅₀	Diâmetro em que 50% da amostra é passante (em massa)
D ₉₀	Diâmetro em que 90% da amostra é passante (em massa)
e-	Elétron
E _d	Módulo de elasticidade dinâmico

E_s	Módulo de elasticidade secante
Fe	Ferro
MgO	Óxido de magnésio
SiO ₂	Sílica
T	Temperatura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO.....	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	Resíduo de Rochas Ornamentais.....	5
3.1.1	Conceito e suas Aplicações.....	5
3.1.2	Panorama da Indústria de Rochas Ornamentais	6
3.1.3	Geração do resíduo de marmoraria e a possibilidade de reciclagem	9
3.1.4	Processo do beneficiamento de rochas ornamentais e tratamento da lama na empresa de marmoraria	13
3.1.5	Classificação do resíduo	17
3.2	Adições Minerais	17
3.2.1	Influência das adições minerais no estado fresco e endurecido e nas características de durabilidade do concreto	21
3.2.2	Influência das adições nas propriedades do concreto e aplicação	22
3.2.2.1	Trabalhabilidade	23
3.2.2.2	Resistência à compressão.....	24
3.2.2.3	Módulo de elasticidade	27
3.2.2.4	Resistividade elétrica	28
3.2.2.5	Absorção de água do concreto	32
3.2.3	Influência das adições minerais para o desenvolvimento sustentável	34
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	35
4.1	Fluxograma do Procedimento Experimental.....	35
4.2	Caracterização dos Materiais Utilizados.....	36
4.2.1	Agregado miúdo	37
4.2.2	Agregado graúdo	37
4.2.3	Cimento Portland	38
4.2.4	Água potável.....	38
4.2.5	Adição mineral (Resíduo de lama de marmoraria)	38
4.3	Preparação e moldagem dos corpos de prova	41
4.3.1	Dosagem dos concretos e preparação dos corpos de prova.....	41
4.3.2	Moldagem e cura dos corpos de prova de concreto	43
4.3.3	Ciclo de mistura	45
4.4	Método dos Ensaios	45
4.4.1	Caracterização do resíduo: Lama de marmoraria.....	45
4.4.2	Avaliação da propriedade do concreto no estado fresco	53

4.4.3	Avaliação das propriedades mecânicas e físicas dos concretos no estado endurecido	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1	Caracterização dos Materiais	66
5.1.1	Agregado miúdo	66
5.1.2	Agregado graúdo	68
5.1.3	Cimento Portland	70
5.1.4	Caracterização do resíduo: Lama de marmoraria.....	74
5.1.4.1	Análise física.....	75
5.1.4.2	Análise química	80
5.1.4.3	Análise termogravimétrica (TGA).....	80
5.1.4.4	Análise mineralógica.....	81
5.1.4.5	Análise de pozolanicidade	84
5.2	Avaliação da Propriedade do Concreto no Estado Fresco	85
5.2.1	Trabalhabilidade	85
5.3	Avaliação das Propriedades Mecânicas e Físicas dos Concretos no Estado Endurecido	87
5.3.1	Resistência à compressão axial	88
5.3.2	Resistência à tração por compressão diametral	91
5.3.3	Resistividade elétrica superficial.....	95
5.3.4	Resistividade elétrica volumétrica.....	102
5.3.5	Módulo de elasticidade estático e Módulo de elasticidade dinâmico	110
5.3.6	Absorção de água por imersão.....	116
5.3.7	Absorção de água por capilaridade	120
5.3.8	Comparação dos resultados do estudo com especificações das normas de peças de concreto de pavimentação.....	123
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
7	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	129
	REFERÊNCIAS NORMATIVAS	130
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
	Anexo A – Análise elementar do cimento Portland e resíduo da lama de marmoraria	144

1 INTRODUÇÃO

Uma das dificuldades preocupantes nos municípios brasileiros atualmente é o gerenciamento e a destinação final dos resíduos sólidos. Além disso, a produção de resíduos aumentou consideravelmente nos últimos anos, sendo gerado por alguns fatores como o crescimento populacional, processos produtivos e diversas atividades industriais e urbanas expostas na sociedade.

A falta de gerenciamento e a deposição correta dos resíduos é uma situação que requer dedicação e comprometimento de todos, pois a maioria deles constitui, de alguma forma, efeitos negativos no meio ambiente (GHORBANI *et al.*, 2018).

Um setor que merece atenção, são as empresas de rochas ornamentais que possuem uma grande importância econômica para o país, tanto em atender o mercado interno (PIRES *et al.*, 2014) quanto ao mercado de exportações (MASHALY *et al.*, 2016) visando o setor da construção civil.

Entretanto, diversas etapas do processo do beneficiamento de rochas ornamentais acarretam vários impactos ambientais, e o alto volume da produção dessas rochas, provocam uma quantidade considerável de resíduos, muitas vezes desperdiçado nos próprios processos (GAZI *et al.*, 2012), desde a fase inicial partindo da extração do mineral, originando os blocos até a fase final de acabamento, passando pelo corte e polimento das peças (HEBHOUB *et al.*, 2011; MELO, 2016; REIS, 2008).

A etapa em destaque e estudada neste trabalho acontece nas empresas de marmoraria. Na fase do processamento do corte e polimento de rochas ornamentais, ocorre uma perda de material tanto de retalhos quanto do pó em conjunto com água para a refrigeração das máquinas, onde são gerados uma grande quantidade de resíduos em formato de lama, que muitas vezes são descartados sem nenhum tratamento ou de forma inadequada (HANIEH *et al.*, 2014; LANGSCH *et al.*, 2009; SANTOS, 2010), e muitas das vezes sendo depositados em aterros sanitários, causando rápido esgotamento de capacidades limitadas, especialmente em áreas densamente povoadas, encontrando

dificuldades para novos locais para aterros, tornando assim um passivo ambiental das indústrias (LI *et al.*, 2019).

Em municípios menores, esse resíduo da lama de marmoraria ou lama abrasiva vem preocupando o setor de rochas ornamentais e órgãos ambientais, pois apresentam sérios problemas como a falta de gestão sustentável dos recursos, por não possuir um Centro de Treinamento de Resíduos (CTR) ou mesmo espaço para aterro sanitário.

E diante disso, muitas vezes esses resíduos encontram-se descartados de forma irregular ou em lugares clandestinos, ou lançados em lagoas de decantação, desconfigurando paisagens, contaminando corpos hídricos e solos (MOTHÉ FILHO *et al.*, 2005; SANTOS *et al.*, 2010) tornando perigosos, pois a medida que são secos se transformam em um pó fino que provocam danos à saúde humana (ALMEIDA *et al.*; 2007; GAZI *et al.*, 2012; SINGH *et al.*, 2016).

Muitas empresas de pequeno e médio porte encontram ainda dificuldades e não tem conhecimento da correta importância da destinação final de resíduos em consonância com a responsabilidade ambiental, e nesse sentido, descartam seus resíduos em caçambas misturados com outros tipos de materiais.

Sob outra perspectiva, baseado no desenvolvimento sustentável e nos impactos ambientais gerados pelas atividades desenvolvidas do setor de rochas, algumas empresas encontram-se preocupadas em desempenhar seu papel ambiental, e procuram agir dentro da legislação (SANTOS *et al.*, 2010), pois deparam com órgãos de fiscalização ambiental mais comprometidos e eficientes, entretanto, a deposição correta de resíduos vem provocando um custo elevado para os empresários (NBR ISO 14001, 2004).

Por outro lado, a reciclagem e a reutilização desses resíduos industriais, especificamente, o uso do pó da lama de marmoraria na produção do concreto, podem gerar contribuições ambientais e viabilidade econômica significativa, pois os resíduos podem ser reaproveitados, reduzindo assim custos com descartes e aterros sanitários, aplicado em novos materiais, trazendo uma alternativa benéfica para a sociedade, favorecendo através da reciclagem um produto sustentável no mercado da construção civil (FARIAS, 2017; GHORBANI *et al.*, 2018; GONÇALVES *et al.*, 2002; LI *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2010; SINGH *et al.*, 2017).

Dado que a produção do cimento, sendo o principal componente do concreto, é uma das causas da poluição atmosférica devido às emissões de CO₂, a aplicação do uso do resíduo de marmoraria como substituição parcial do cimento pode levar a uma redução significativa destas emissões de efeito estufa e esgotamento dos recursos naturais na produção do concreto (AREL, 2016; ARUNTAS *et al.*, 2010; ERGÜN, 2011; GESOĞLU *et al.*; 2012; GHORBANI *et al.*, 2018; RANA *et al.*, 2015; SINGH *et al.*, 2019).

Dessa forma, inúmeros estudos têm investigado a incorporação do resíduo de rochas ornamentais de diferentes processos em diversos aspectos para aplicações no concreto, e isto tem motivado a busca de alternativas viáveis para o destino final dos resíduos, podendo assim apresentar benefícios como ganhos de desempenho nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos concretos, com objetivo de aplicar como insumo na construção civil (AREL, 2016; ARUNTAS *et al.*, 2010; GAMEIRO *et al.*, 2014; GHORBANI *et al.*, 2018; HOPPE, 2005; KHODABAKHSHIAN *et al.*, 2018; MASHALY *et al.*, 2016; RANA *et al.*, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2010; SINGH *et al.*, 2017; SINGH *et al.*, 2019; VARDHAN *et al.*, 2015).

Visando contribuir com o tema, esse trabalho buscou avaliar a influência do pó da lama de marmoraria na produção do concreto, como substituição de 10%, 20% e 30% do peso do cimento *Portland* pelo resíduo, sendo verificado o desempenho nas propriedades mecânicas e os parâmetros de durabilidade do concreto.

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência do uso do resíduo de lama de marmoraria, em pó, proveniente do processamento úmido de rochas ornamentais nos parâmetros da durabilidade e nas propriedades mecânicas do concreto em diferentes idades.

Os objetivos específicos do estudo são:

- Avaliar a influência do teor do resíduo da lama de marmoraria no desempenho do concreto;
- Avaliar a influência da heterogeneidade do resíduo no desempenho do concreto;
- Avaliar o mecanismo de ações do resíduo da lama de marmoraria em pó quando usados em substituição parcial do peso do cimento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo aborda os principais aspectos relacionados ao resíduo de rochas ornamentais, onde apresenta um panorama da indústria do beneficiamento dessas rochas processadas, suas aplicações e a geração destes resíduos, destacando o tratamento da lama de marmoraria.

Além disso, são apresentadas importantes informações diretamente relacionadas com o tema conforme literatura, destacando os conceitos de adições minerais e a influência do resíduo nas propriedades do concreto em seus estados fresco e endurecido e nas propriedades mecânicas, físicas e parâmetros relacionados com a durabilidade.

3.1 Resíduo de Rochas Ornamentais

3.1.1 Conceito e suas Aplicações

De acordo com a NBR 15012 (ABNT, 2003), rocha ornamental é definida como uma substância rochosa natural, submetido a diferentes tipos de beneficiamento, podendo ser utilizado como funções estéticas na construção civil.

Do ponto de vista de Bastos (2014) e Moraes (2006), rochas ornamentais ou pedras naturais são materiais geológicos extraídos da natureza em forma de blocos de maciços rochosos e matacões transformados em placas ou chapas, cortadas de diferentes formas e beneficiadas pelo meio dos processos de desdobramento, e polidas conforme a necessidade de aplicação.

Frasca (2003) refere que os principais campos de aplicações dos tipos de rochas são os mais diversos, tanto em materiais de construção como revestimentos verticais (paredes e fachadas), horizontais (pisos), interiores e exteriores de edificações e elementos estruturais (colunas e pilares), quanto em trabalhos artísticos em esculturas, peças decorativas e arte funerária.

Estas rochas são classificadas em termos da sua composição como: a) rochas silicáticas que são os granitos e similares; b) rochas silicosas que são os

quartzitos, cherts e similares; Estas rochas que englobam os granitos e quartzitos são constituídas de feldspato, quartzo, mica e minerais portadores de ferro, apresentando uma estrutura de sílica cristalizada; c) rochas carbonáticas formadas por mármore, travertinos e calcários cuja composição é principalmente de calcita e dolomita; d) rochas síltico-argilosas foliadas que são as ardósias; e) rochas ultramáficas formadas por serpentinitos, pedra talco e pedra sabão (ABIROCHAS, 2009). O granito e o mármore são os mais conhecidos no mercado, economicamente mais importantes e difundidos pela utilização em peças ornamentais e em revestimentos.

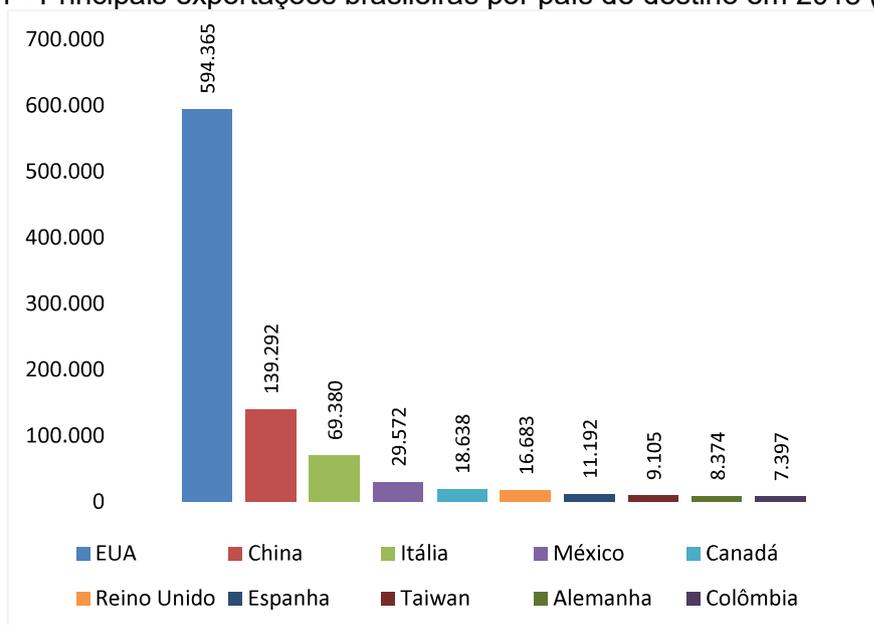
3.1.2 Panorama da Indústria de Rochas Ornamentais

Os setores de atividades mais importantes ligados ao de rochas ornamentais é a construção civil. Estima-se que no Brasil são produzidos 500 tipos de variedades de rochas constituído de 60% de granitos, 20% de mármore e travertinos e cerca de 8% de ardósias. Existem cerca de 10.000 empresas no setor de rochas ornamentais, dentre as quais em torno de 400 empresas exportadoras regulares fazem parte da cadeia produtiva, correspondendo por 120 mil empregos diretos e 360 mil indiretos. A Região Sudeste contribui com mais de 60% dessa produção, formado por micro e pequenas empresas de marmorarias, destacando a produção capixaba e a mineira (ABIROCHAS, 2018).

O Brasil tem uma importante participação no mercado internacional e enquadra no grupo de grandes produtores e exportadores mundiais de rochas ornamentais e de revestimentos.

As exportações no ano de 2018 apresentaram uma pequena queda de 2,93% comparado com o ano de 2017 que fecharam em torno de 80,45%, e exportou rochas ornamentais para 120 países nesse período, dando destaque para EUA, China e Itália, conforme demonstrado na Figura 3.1 (ABIROCHAS, 2018).

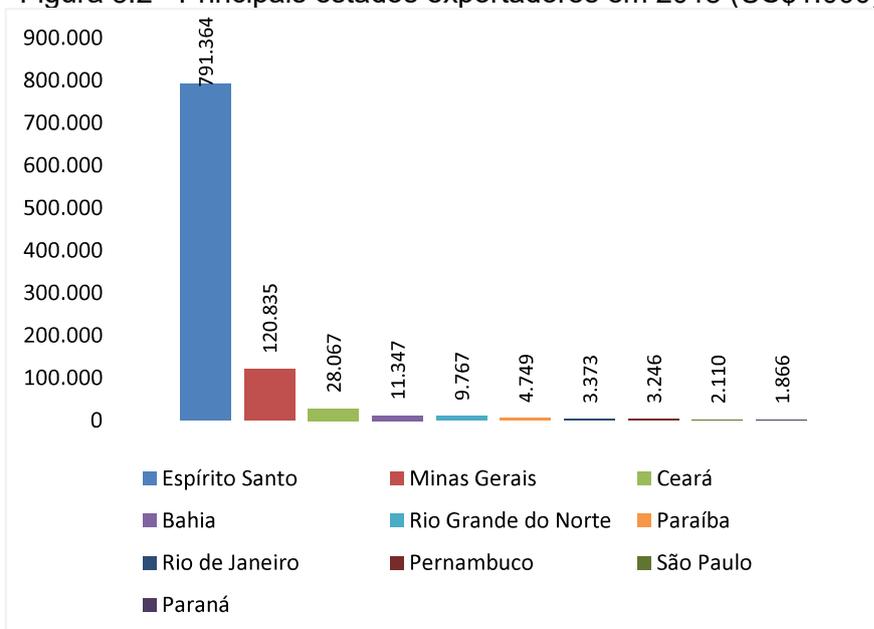
Figura 3.1 - Principais exportações brasileiras por país de destino em 2018 (US\$1.000)



Fonte: Adaptado da Abirochas (Informe 01/2018)

Segundo dados da ABIROCHAS (2018), as exportações de rochas ornamentais foram representadas por 16 estados brasileiros em 2018, sendo apresentado na Figura 3.2 os 10 primeiros estados principais.

Figura 3.2 - Principais estados exportadores em 2018 (US\$1.000)



Fonte: Adaptado da Abirochas (Informe 01/2018)

Minas Gerais é o segundo maior produtor de rochas ornamentais, se destacou com maior variedade de rochas extraídas representando US\$120,835 milhões, cerca de 12,2% do total do faturamento das exportações brasileiras e 16,7% do total do volume físico, perdendo apenas para o Espírito Santo, o maior estado de polo de rochas ornamentais, com US\$ 791,364 milhões, atingindo um faturamento de 79,7%, apresentando 71,5% do total do volume físico das exportações no mercado nacional. O estado do Ceará evidencia uma tendência de crescimento, conforme demonstrado na Figura 3.2.

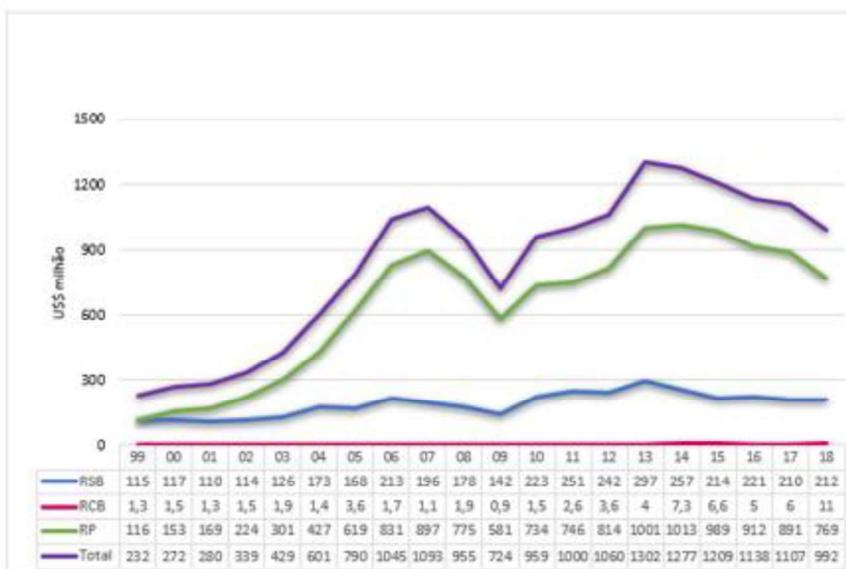
Cabe destacar, de acordo com dados informativos da FEAM (2015), que Minas Gerais possui mais de 1500 empresas de marmorarias de pequeno e médio porte voltada ao consumidor final. As perdas de produção são estimadas em aproximadamente 18%, ocasionando grande geração de rejeitos no beneficiamento final em um elevado número de municípios.

Como o segmento de rochas ornamentais promove ganhos econômicos e sociais, e a comercialização apresenta forças no cenário nacional e internacional, as indústrias nacionais são valorizadas e desenvolvem suas atividades para o fornecimento das peças. Porém, quanto maior a quantidade de rochas processadas nos municípios, maior o volume de resíduos gerados e conseqüentemente, a dificuldade de gerenciar o manuseio e a destinação correta desses resíduos vem apresentando crescimento (ABIROCHAS, 2018; ALYAMAÇ e AYDIN, 2015).

Conforme apresentado na Figura 3.3, baseado em informações setoriais, estima-se que a produção brasileira de rochas ornamentais tenha recuado 1% frente a 2016, e para o ano de 2018, recuou 2,6% frente a 2017, abrangendo um total de 9 milhões de toneladas.

Entretanto, destaca-se que, tomando por base os números de exportações, importações e produção brasileira, estima-se que o consumo interno de rochas ornamentais tenha atingido 3,66 milhões t em 2018, contra 3,63 milhões t em 2017, em troca de 3,60 milhões t em 2016 (ABIROCHAS, 2018).

Figura 3.3 - Evolução anual do faturamento das exportações brasileiras de rochas ornamentais 1999 a 2018
(RSB: blocos de granito; RCB: blocos de mármore; RP: rochas processadas)



Fonte: Adaptado da Abirochas (Informe 01/2018)

Diante desse cenário, na busca de alcançar e minimizar os impactos causados com a disposição inadequada dos resíduos, estudos e pesquisas se tornam necessários na busca por alternativas viáveis que visam a sustentabilidade do setor da construção civil, aproveitando assim os resíduos gerados no processamento de rochas ornamentais.

3.1.3 Geração do resíduo de marmoraria e a possibilidade de reciclagem

A disposição de resíduos industriais provenientes das empresas, seja de pequeno, médio e grande porte, vem sendo um processo de aprendizado e de grandes desafios no século XXI.

Segundo Almeida *et al.* (2007), o processo de corte, polimento e acabamento geram diferentes tipos de resíduos (sólido, líquido e em pó), representados por cacos/aparas e lama de marmoraria, resultante dos mais diversificados tipos de rochas como mármore, granito, ardósias, pedra sabão, e outros, sendo descarregados em aterros sanitários ou descartados de forma irregular, podendo trazer implicações ambientais presentes e futuras.

Mothé Filho *et al.* (2005) enfoca que esse rejeito pode ocasionar impactos ambientais negativos quando descartados de forma inadequada. Para Alyamaç e Aydin (2015); Galetakis e Soultana (2016), o descarte e o manuseio destes resíduos apresentam graves problemas ambientais, pois contribuem para contaminação dos recursos hídricos e descaracterização da paisagem.

Rana *et al.* (2015) e Sadek *et al.* (2016) esclarecem que essa lama quando destinada em aterros e quando seca acarreta em um pó, podendo poluir tanto o ar quanto a água, resultando em consequências negativas à saúde das pessoas, provocando uma redução na fertilidade do solo, diminuindo a porosidade e permeabilidade, prejudicando a produção de plantas e a segurança do meio ambiente (ARSHAD *et al.*, 2014; ALGIN *et al.*, 2008; ALMEIDA *et al.*, 2007; BARBOSA *et al.*, 2013).

O que torna um grande desafio é a disposição final desta lama, pois são lançadas muitas vezes no ecossistema sem nenhum tratamento prévio, tornando um problema ambiental pela quantidade produzida e acumulada (ALMEIDA *et al.*, 2007; ABU HANIEH *et al.*, 2014; REIS, 2008). Várias empresas de marmoraria encaminham ainda seus resíduos para lugares impróprios de forma irregular, sejam em lixões e aterros, e muitas vezes utilizando caminhões da própria empresa.

Dessa forma, é necessário a busca pelo gerenciamento, desde as etapas do acondicionamento até a destinação final, escolhendo e adequando ao uso de tecnologias ou recursos de reutilização e reciclagem (MAGACHO *et al.*, 2006).

As Figuras 3.4 e 3.5 mostram-se a lama depositada no terreno próxima a indústria contaminando o solo passando a ser um passivo ambiental preocupante.

Figura 3.4 - Lama de marmoraria próxima a indústria



Fonte: Lima (2010)

Figura 3.5 - Lama de marmoraria exposta ao meio ambiente



Fonte: Amaral e Sichieri (2013)

Os resíduos de rochas ornamentais, segundo Almeida *et al.* (2007) e Marras *et al.* (2017) dividem-se em duas categorias principais: resíduos provenientes de atividades de extração e resíduos derivados de plantas de processamento.

Aliabdo *et al.* (2014) ressalta que dependendo do tipo de atividade e do processamento utilizado, o lodo gerado é cerca de 20% a 30% do peso da pedra trabalhada. Essa lama de serraria se trata de um resíduo gerado em grande quantidade, sendo proveniente da serragem dos blocos de rochas, após sua extração.

Durante o processamento, estima-se uma perda de 10% a 20% de rochas ornamentais e se torna um resíduo devido a sua forma irregular ou dimensões inadequadas, de baixo valor comercial, depositados em caçambas no próprio pátio da empresa. No caso de placas semiprocessadas, a quantidade de resíduos chega a ser de 2% a 5% (SINGH *et al.*, 2017).

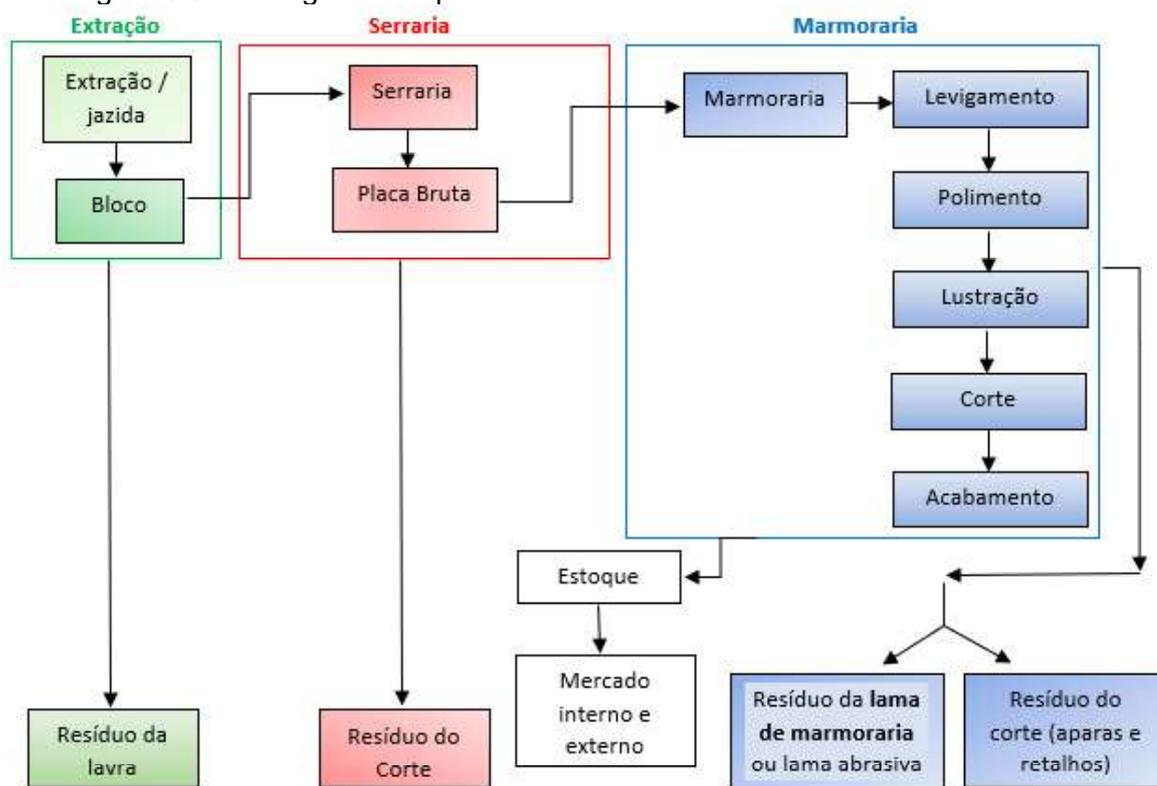
Gonçalves (2000) apresenta o fluxograma (Figura 3.6), descrevendo o processo completo do beneficiamento das rochas ornamentais, em que ocorrem a geração do resíduo em três fases distintas.

- *Primeira fase*: o resíduo da lavra acontece na extração dos blocos na jazida e é nessa fase que representa a caracterização da jazida onde são estabelecidas as condições da rocha a ser explorada.

- *Segunda fase*: ocorre o resíduo do corte do mármore, granito e outros, gerado no desdobramento dos blocos em placas. Esses blocos são transportados para as serrarias, onde ocorre a fragmentação originando as placas.

- *Terceira e última fase*: é gerado dois tipos de resíduos, o primeiro, é o resíduo do corte, onde surgem as rebarbas e cacos em grandes quantidades irregulares sendo denominado de aparas e o segundo, denominado de resíduo do polimento ou lama de marmoraria ou lama abrasiva, que advém da refrigeração da máquina com a mistura do pó, originando a lama, tema de estudo.

Figura 3.6 - Fluxograma do processo do beneficiamento de rochas ornamentais



Fonte: Adaptado de Gonçalves (2000)

De acordo com a Resolução CONAMA nº 307/2002, todos os geradores, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos de construção civil, deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Conforme esclarecimento da FEAM (2015), o gerenciamento adequado e correto dos resíduos gerados nos empreendimentos é de responsabilidade dos geradores, dessa forma, um armazenamento bem conduzido, facilita o manuseamento do resíduo, e assim, os impactos ambientais tende a diminuir e consequentemente os gastos econômicos no gerenciamento também (ALGIN *et al.*, 2008; GALETAKIS e SOULTANA, 2016; SOARES e VIEIRA, 2016).

Vale salientar que os custos de deposição de resíduos e/ou rejeitos de forma ecologicamente correta são elevados e leis de controle ambiental se tornaram mais severas e órgãos de fiscalização ambiental mais eficientes, com isso, os empresários de marmoraria vem procurando alternativas tecnologicamente viáveis para a deposição de resíduos industriais (BASTOS, 2014; SANTOS *et al.*, 2010).

Contudo, é notório identificar que as empresas de marmoraria encontram dificuldades de adequar aos procedimentos, tão pouco as legislações ambientais (SOARES e VIEIRA, 2016), como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), do qual estabelece implícito no artigo 20 da Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que os geradores industriais devem elaborar o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) relatando os procedimentos adotados para cada etapa de gerenciamento, como a minimização, classificação, segregação, acondicionamento, identificação, armazenamento temporário, transporte e destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2012).

Na mesma lei, fica claro os conceitos de reciclagem, podendo ser compreendida como a transformação de resíduos sólidos em insumos para a construção de novos produtos, podendo ser aplicável no setor da construção civil (BRASIL, 2012; SILVEIRA, 2017).

Diante disso, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas sobre reciclagem e o reaproveitamento de resíduos de rochas ornamentais, pois o resíduo como insumo pode gerar um novo produto, conseqüentemente diminuir a extração da matéria prima e reduzir o volume de resíduos descartados em aterros sanitários ou lugares clandestinos, podendo apresentar uma grande contribuição ambiental (FARIAS, 2017; SANTOS *et al.*, 2010; SILVEIRA, 2017; SOARES e VIEIRA, 2016).

Com o aproveitamento do resíduo da lama de marmoraria (em pó) poderá, além de trazer benefícios ambientais e sociais, gerar lucratividade para as empresas de marmoraria em vários municípios, pois poderão reduzir os custos destinados ao armazenamento e transporte final do resíduo e oferecer uma nova alternativa de reciclagem, promovendo assim uma ação para contribuir no desenvolvimento sustentável (ARUNTAS *et al.*, 2010; FARIAS, 2017; GHORBANI *et al.*, 2018; PATEL *et al.*, 2013; SINGH *et al.*, 2017a; SOARES e VIEIRA, 2016).

3.1.4 Processo do beneficiamento de rochas ornamentais e tratamento da lama na empresa de marmoraria

As empresas de marmorarias consistem no tratamento final da rocha com a moldagem das placas e atuam para atender à crescente demanda do consumidor

final no mercado nacional e internacional, especialmente para o setor da construção civil. Segundo Soares e Vieira (2016), o método de produção das marmorarias é baseado pelos processos de corte, polimento e acabamento. Esses produtos finais são peças elaboradas, de acordo com especificações de projetos. Para isso, dentro das marmorarias, para vencer as transformações, as rochas ornamentais precisam passar por algumas etapas e seguir os processos de: levigamento, polimento, lustração, corte e acabamento (FEAM, 2015).

As Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 apresentam uma parte da exposição de estocagem das placas e dos equipamentos utilizados para o processo do produto final de rochas ornamentais.

Figura 3.7 - Local de estocagem das placas



Figura 3.8 - (a) Máquinas no processo de levigamento; (b) polimento e lustração da peça



(a)



(b)

Figura 3.9 - (a) Máquina de corte automático; (b) Máquina de corte com disco diamantado



(a)



(b)

Uma parcela das empresas de marmoraria contribui com o tratamento da lama que é constituído por duas etapas, processo de decantação ou sedimentação e a redução da umidade do resíduo.

Através do beneficiamento da lama de marmoraria, os efluentes líquidos constituídos pela indústria, passam pelo sistema de decantação de fluxo vertical ou sedimentação primário de fluxo horizontal (compartimento de concreto armado) e por meio da estação de tratamento da água, são distribuídos agentes químicos flocculantes que tem a função de acelerar todo o processo. Com isso, a água consegue ser reaproveitada, contribuindo para o processo industrial.

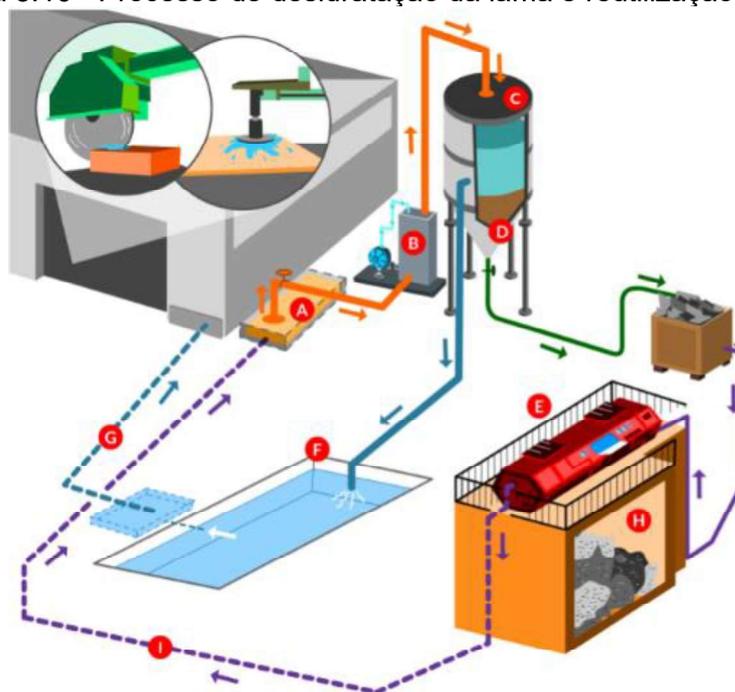
Os resíduos depositados no tanque da empresa, obtém uma redução de umidade da lama, que representa uma grande quantidade de mistura de água, pó de rocha e restos de elementos abrasivos empregados devido a refrigeração das máquinas decorrente dos processos de corte e polimento das peças (MELO, 2016; SOUSA, 2007), e com isso, permite um transporte do volume significativamente menor de rejeito para a destinação final (SILVA, 2011).

Em algumas empresas de marmorarias localizadas nos centros urbanos brasileiros, o resíduo gerado em aspecto de lama de marmoraria (Classe II A), assim também uma quantidade de cacos ou aparas (Classe II B) ocorridos ao longo do processo (AMARAL; SICHIERI, 2013), são retirados através de caçambas e descartados em diferentes lugares ou em aterros de resíduos industriais licenciado pelo IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente.

Para Alyamaç e Aydin (2015); Soares; Vieira (2016), essa quantidade de resíduos gerados pode trazer consequências negativas se despejado no meio ambiente, tanto em sua forma inicial ou após a desidratação em estação de tratamento.

A Figura 3.10 apresenta um esquema adaptado do CEFET-ES e demonstra um modo adequado de tratamento da lama aplicando o reaproveitamento da água.

Figura 3.10 - Processo de desidratação da lama e reutilização da água



Fonte: Adaptado do CEFET-ES, Sousa (2007).

Baseado na Figura 3.10, o processo de desidratação da lama consiste nos seguintes passos:

- A) No processo de sedimentação permite tratar o efluente a partir do adensamento da lama, ou seja, é captada a lama dos reservatórios (tanques);
- B) Geralmente é adicionado floculante por meio do dosador para a agregação das partículas em suspensão;
- C) A lama é levada para o decantador suspenso com formato de funil;
- D) Através da gravidade e por ação do floculante, a lama é depositada no fundo do decantador e levada para um duto até o filtro prensa (E);
- E) O filtro prensa tem a função de separar a fase sólida da líquida através da compressão de placas, onde a lama fica retida nas telas formando o bolo de filtração. Ao final do ciclo de filtração, as placas abrem-se e são descarregadas as tortas/blocos de lama desidratada;
- F) A água vinda do decantador é conduzida a um tanque de água tratada retornando as máquinas para serem reutilizadas;

- H) Os blocos de lama desidratados são armazenados nos tanques para serem destinados aos aterros. A lama compactada apresenta volumes significativamente menores para serem transportados para o destino final;
- I) O resultado da água nessa fase, mesmo com uma pequena quantidade de lama, retorna ao tanque de captação e novamente inicia o ciclo (G). Conforme Silva (2011), esse processo permite o reaproveitamento da água na fase do beneficiamento e garante a umidade da lama inferior a 30%.

3.1.5 Classificação do resíduo

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos quanto aos seus riscos potenciais tanto ao meio ambiente e à saúde pública, indicando o manuseio e destino dos resíduos, para assim gerenciar corretamente.

A lama de marmoraria é considerada um resíduo de origem industrial, e se encaixa na classificação dessa norma. Entretanto, para a classificação desse resíduo, os ensaios de solubilização e de lixiviação devem ser realizados.

Estudos de Amaral; Sichieri (2013); Bastos (2014); Gonçalves (2000); Manhães; de Holanda (2008); Santos (2010) classificam o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais como Resíduo Classe IIA – Não Inerte para os parâmetros Al e Fe, ressaltando a lama proveniente de tratamento de água, podendo ser utilizado como um subproduto da construção civil.

3.2 Adições Minerais

Diversos subprodutos industriais vêm sendo adaptado na transformação de adições minerais para produção de concretos com objetivo na busca de benefícios positivos, tanto ambientais como econômicos (DIETRICH, 2015). Destinar esses resíduos industriais em aterros ou utilizá-los apenas como agregados demonstra um desperdício das suas potencialidades.

As adições minerais são silicosas, contém granulometria fina a pulverulenta e algumas das vantagens é aprimorar propriedades específicas, melhorar o

desempenho do compósito cimentício e favorecer o concreto para alguma finalidade a ser desempenhada.

Silveira (1996) salienta que o uso de adições minerais em matrizes cimentícias adquire uma solução eficiente e benéfica no desenvolvimento das propriedades relacionadas com a durabilidade, uma vez que esses materiais atuam como preenchimento de vazios, diminuindo a permeabilidade da pasta e alterando sua microestrutura.

Por representar uma alta finura, podendo essas partículas possuir diâmetro médio similar ou menor que o cimento (MOLIN, 1995), as adições minerais incorporadas no concreto reduzem o tamanho e o volume de vazios, podendo trazer uma melhoria na coesão, diminuindo a segregação e a exsudação (KIHARA, 1981), melhoria da trabalhabilidade, fortalecimento da zona de transição entre agregado e argamassa, aumento da resistência à compressão pelo refinamento dos poros da argamassa, resistência à expansão álcali-agregado, à fissuração térmica e ao ataque por sulfatos (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

As adições minerais estão presentes nos cimentos comercializados, sendo acrescentados durante sua produção. Por sua vez, podem ser adicionadas durante a execução do concreto, podendo causar alterações nas propriedades físicas e químicas dos compostos cimentícios. Quando adicionadas ao concreto, essas adições influenciam na interligação dos poros, na interface pasta e agregado e na zona de transição, tendo a função de reduzir a ação de agentes químicos e físicos, atuando de maneira significativa na matriz cimentícia (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Conforme Molin (2011) a literatura demonstra que as adições minerais conforme sua ação físico-química são classificadas em três grupos: material cimentante, material pozolânico e efeito fíler. Neste trabalho o foco serão as adições minerais com efeito fíler.

a) *Material cimentante*: para formação de produtos cimentantes como o C-S-H, o hidróxido de cálcio não é necessário estar presente no cimento Portland. Apesar disso, sua auto-hidratação é usualmente lenta e para fins estruturais sua quantidade de produtos cimentantes desenvolvidos se torna insuficientemente.

Porém, quando usado como adição ou substituição em cimento *Portland*, a presença de hidróxido de cálcio e gipsita acelera sua hidratação.

b) *Material pozolânico*: são materiais silicosos ou silicoaluminosos que praticamente possuem pouca ou quase nenhuma atividade aglomerante (cimentante). Mas em contato com a água e finamente divididos, há uma reação quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades aglomerantes (cimentante). As adições pozolanas podem ser naturais (através de rochas ou minerais), ou artificiais, desempenhadas por resíduos de produção industrial (MOLIN, 2011).

c) *Fíler*: refere a uma adição mineral finamente dividida sem desempenho químico. Seu papel se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e promove ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (MOLIN, 2011). Vários podem ser os efeitos fíler gerados pelas adições minerais no concreto, conforme descrito a seguir:

- **Efeito Microfíler**: compreende a um aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios em razão das partículas finas das adições, refinando a estrutura dos poros (ANDRADE e TUTIKIAN, 2011), e o diâmetro médio do fíler é similar ao do cimento *Portland* e através da ação física, algumas propriedades do concreto tende a melhorar nos teores menores que 15% em relação a massa do cimento, tais como a massa específica, trabalhabilidade, exsudação, densidade, permeabilidade, capilaridade e tendência à fissura (NEVILLE e BROOKS, 2013; SILVA, 2010).

Molin (2011) aborda que ocorre uma maior densificação da zona de transição com a incorporação de adições de alta finura inseridas no concreto, pois a adição diminui os espaços nos quais os produtos de hidratação tendem a crescer, gerando uma quantidade de pequenos cristais, que ocorrerá não somente a partir da superfície dos grãos de cimento, mas através dos poros ocupados pela adição e pela água, interferindo na aceleração das reações e influenciando os tipos de produtos de hidratação. Dessa forma, observa uma melhora da zona de transição atribuindo ao aumento de desempenho do concreto em relação a durabilidade e a propriedade mecânica.

• **Refinamento da estrutura dos poros e dos produtos de hidratação do cimento:** a quantidade de material empregado interfere na ocorrência da nucleação. A menor parcela do cimento utilizada representa menos produtos de hidratação formados e conseqüentemente menor calor de hidratação. Para Schutter (2011) o efeito fíler sobre as propriedades da pasta de cimento pode atingir diferentes níveis: o efeito químico, o efeito físico e o efeito de enchimento. Segundo Andrade e Tutikian (2011); Raisdorfer (2015), o efeito físico compreende a um aumento da densidade do concreto em função do preenchimento dos vazios em razão das partículas finas das adições, refinando a estrutura dos poros.

De acordo com Moosberg-Bustnes (2004), o fíler exerce diferentes efeitos na pasta do cimento, diante da sua forma e tamanho e em conformidade com essas características, o fíler pode interagir com cimento, melhorando o empacotamento das partículas e oferecendo melhorias em algumas propriedades do concreto, e além do mais reduzindo a quantidade de cimento sem perda de resistência.

Schutter (2011) ressalta que a velocidade das reações de hidratação do cimento se dá pelo meio do material fino que aloja nos poros dos cristais de clínquer aumentando a superfície de contato deste com o meio aquoso. Conforme Lawrence *et al.* (2003), quanto mais partículas de adição mineral permanecer na mistura, maior será a chance destas ficarem próximas das partículas de cimento. O mesmo autor complementa ainda que outro fator que tende a interferir é a natureza do mineral e sua afinidade com os hidratos de cimento. A durabilidade dos concretos é extremamente dependente da estrutura e da distribuição de poros gerados durante o processo da hidratação do cimento (RIBEIRO JÚNIOR, 2015).

• **Alteração da microestrutura da zona de transição:** A incorporação de adições minerais de alta finura no concreto interfere na movimentação das partículas de água em relação aos agregados.

Segundo Andrade e Tutikian (2011), além de contribuir e diminuir a espessura da zona de transição passa a ser menor em decorrência da redução da exsudação, pois a adição pode preencher os vazios deixados pelas partículas de cimento que estão próximas à superfície do agregado (efeito *microfíler*), isto é, diminuindo ou eliminando o acúmulo de água que encontra retida nos agregados graúdos, interferindo no crescimento dos cristais, restringindo seus tamanhos e reduzindo os

graus de orientação dos cristais de hidróxido de cálcio junto ao agregado (partículas de adição agindo como pontos de nucleação) e reduzindo a concentração de Ca(OH)_2 .

Lawrence *et al.* (2003) retratam que o efeito fíler, o empacotamento granulométrico, tem a finalidade de fazer a mistura do concreto apresentar uma maior consistência em decorrência da presença de finos, ou seja, altera a porosidade inicial da mistura. A diluição refere a um efeito semelhante ao aumento da quantidade de água ou relação água/cimento, provocado pela substituição parcial do cimento pela adição mineral.

3.2.1 Influência das adições minerais no estado fresco e endurecido e nas características de durabilidade do concreto

A incorporação das adições minerais possibilita a produção de materiais cimentícios visando melhoria em algumas características técnicas, pois geram mudanças na estrutura interna da pasta do cimento hidratada. Uma das principais vantagens dessas adições é a redução na porosidade capilar do concreto e a fissuras posto a diminuição do calor de hidratação (MOLIN, 2011).

Segundo Molin (1995), as adições tem o papel de influenciar na movimentação das partículas de água no concreto fresco, passando a reduzir ou eliminar a água livre presente que tende a ficar retida sob o agregado. A alta finura da adição contribui com o aumento da resistência mecânica, em razão do preenchimento dos vazios deixados pelo cimento em contato próximo com os agregados intercedendo no crescimento e na disposição dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição, intensificando essa região.

Importante ressaltar que as propriedades do concreto em seu estado fresco influenciam totalmente o seu comportamento no estado endurecido, especialmente em relação à sua resistência e durabilidade. Para tanto, o controle de trabalhabilidade, exsudação, tempo de pega, dentre outros, se torna essencial para assegurar um concreto de qualidade e que atenda aos requisitos desejados conforme projetado.

Em relação a presença de finos de adições minerais na mistura, as características reológicas podem sofrer alteração, devido ao aumento do volume de sólidos para o volume de água produz uma pasta com maior coesão e plasticidade. Em razão disso, os efeitos de segregação e exsudação são reduzidos em relação a presença do volume de finos e do menor consumo de água necessário para cada trabalhabilidade (FONSECA, 2010).

Diante da diversidade de adições minerais existentes, comportamentos distintos podem ser encontrados, e mediante a finura do material a ser adicionado no concreto, um aumento no consumo de água pode ser necessário.

Em relação a substituição do cimento pelas adições minerais, o calor de hidratação realizado sofre redução, devido a diminuição da quantidade de clínquer, resultando assim em menor liberação de calor durante as reações químicas de hidratação (MOLIN, 2011).

Assim, o uso das adições minerais pode afetar positivamente ou negativamente as várias propriedades mecânicas, físicas e durabilidade do concreto, tanto no seu estado fresco quanto endurecido. Tal comportamento do concreto com adições minerais pode variar em função da quantidade incorporada e das condições de cura, da mesma maneira que as características de granulometria, química e mineralógica.

3.2.2 Influência das adições nas propriedades do concreto e aplicação

Importante ressaltar que cada trabalho realizado utilizando o resíduo foi de diferentes tipos de processo, como da diversidade de rochas em cada região.

Em alguns casos foi utilizado a lama seja através do corte tanto do mármore quanto do granito ou os dois tipos de rochas juntos, em outros casos, apenas as rochas trituradas e outros proveniente de rochas ornamentais não identificando o tipo de rochas, apenas retratando a lama em geral.

Muitos dos estudos foram publicados utilizando a eficiência do resíduo visando o desenvolvimento do setor da construção civil, seja através da adição em concretos (GONÇALVES, 2000; ABD ELMOATY, 2013), como na substituição

parcial do cimento (ABUKERSH *et al.*, 2011; AL-AKHRAS *et al.*, 2010; ARUNTAS, *et al.*, 2010; KHODABAKHSHIAN *et al.*, 2018; Mittri *et al.* 2018, RANA *et al.*, 2015; SINGH *et al.*, 2017), ou como substituto parcial dos agregados miúdos (ELMOATY, 2013; CORINALDESI *et al.*, 2010; SINGH *et al.*, 2016; VIJAYALAKSHMI *et al.*, 2013), dentre outras empregabilidades.

Diante de diferentes aplicabilidades, a caracterização física e química é essencial para entendimento do comportamento do material e a influência no desempenho do produto que possa ser gerado. Destaca ainda, que a distribuição do tamanho das partículas e sua finura, dentre outras características, afetam o desempenho na pasta de cimento (TOPÇU *et al.*, 2009).

Mediante trabalhos analisados de Aliabdo *et al.* (2014); Mashaly *et al.* (2018); Ramos *et al.* (2013); Rana *et al.* (2015), em relação ao tamanho das partículas e diferença de finura foram encontradas com base em divergências de lugares de coleta do material, podendo abranger o tipo de rocha, tipo de tear e até mesmo o desdobramento do bloco, etc.

Almeida *et al.* (2007); Molin (1995); Singh *et al.* (2017) evidenciam que a dimensão do resíduo sendo menor que a do cimento favorece o preenchimento da zona de transição e dos poros capilares, passando o resíduo a atuar como um microfíler.

Destaca ainda que a baixa granulometria e a área específica se tornam propriedades importantes para a aplicação em matrizes cimentícias na medida que o resíduo atua como fíler, adicionado ou como substituição ao cimento, pois preenchem poros e com efeitos de nucleação podem melhorar o desempenho mecânico do material (ALYAMAÇ; INCE, 2009; BASTOS, 2014; LAWRENCE *et al.*, 2003; MOLIN, 2011; SCHUTTER, 2011; TOPÇU *et al.*, 2009).

3.2.2.1 Trabalhabilidade

Mehta e Monteiro (2014) definem trabalhabilidade como a propriedade que acarreta no esforço exigido para manusear uma quantidade de concreto fresco, com a perda mínima de homogeneidade, ou seja, a facilidade com que os compósitos no estado fresco podem ser misturados, transportados e aplicados. Os

dois autores relatam que essa propriedade é composta por dois elementos fundamentais: coesão (relacionado a resistência à exsudação e à segregação) e fluidez (relacionado a mobilidade).

Nas literaturas estudadas, notou-se uma grande influência do resíduo na trabalhabilidade das matrizes cimentícias. Nos estudos em que o resíduo foi utilizado como fíler, sendo incorporado à mistura em diferentes porcentagens em relação à massa do cimento, a fluidez necessária foi atingida (ALIABDO *et al.*, 2014; KHODABAKHSHIAN *et al.*, 2018a; KOU *et al.*, 2011; MITTRI *et al.*, 2018). Para Alyamaç; Ince (2009), os mesmos resíduos de diferentes tipos de rochas, não influenciaram a fluidez do concreto.

Vardhan *et al.* (2015) em suas análises de mistura de argamassa de cimento em substituição parcial com pó de mármore de 0 a 50% t em peso, foi evidenciada uma melhor trabalhabilidade. Porém, os resultados indicam que o benefício máximo para atingir uma melhor fluidez foi atingido até adição de 10% aplicando o pó de mármore. Nota-se também um resultado similar nos trabalhos de Singh *et al.* (2017), onde destaca que o valor de solidez aumenta à medida que aumenta a porcentagem do pó da lama de marmoraria, partindo do princípio do teor de magnésio presente na lama, apresentando um valor elevado em comparação com o cimento. Para Dietrich *et al.* (2017), os resultados de abatimento de tronco de cone apresenta uma tendência de perda de abatimento, demonstrando uma consistência menos fluida à medida que aumenta o percentual de lama.

3.2.2.2 Resistência à compressão

A introdução de adições minerais no concreto pode levar a uma melhora na resistência à compressão, pois está diretamente associado com o aumento da resistência da matriz na zona de transição, mediante ao processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento (GONÇALVES *et al.*, 2002; MOLIN, 2011).

Gayarre *et al.* (2014); Molin (2011); Solís *et al.* (2012) retratam que a resistência final do concreto que contém adições minerais mediante as idades, dependem de vários fatores desde a quantidade e característica da adição mineral

como tamanho das partículas e quantidades de SiO_2 em forma amorfa, relação água/cimento, condições de cura, superplastificante presente e proporção do concreto como o tipo e consumo do cimento, hidratação do cimento em decorrência do tempo de cura, porosidade da matriz, idade da amostra, adensamento, características dos agregados, interação química entre agregados e pasta do cimento, teor de ar incorporado, quantidade de água, temperatura e umidade e utilização de aditivos e adições.

ROSA *et al.* (2014) complementam que os índices de vazios podem refletir na vida útil das estruturas, uma vez mais poroso, maiores as possibilidades de permitir a atuação de agentes agressivos à estrutura e influenciar diretamente na característica da resistividade do concreto.

Porém, quando introduzido um teor de porcentagem maior de resíduo, os valores sofrem uma redução ao comparar com os corpos de prova de concreto de referência. Türker *et al.* (2002) salientam que a resistência a compressão do concreto tende a diminuir ao substituir parcialmente o cimento pelo pó do mármore, partindo do princípio que essa resistência reduzida pode ser atribuída a diluição de C_2S e C_3S , elementos esses, que geram o C-S-H no processo de hidratação.

Neville e Brooks (2013) acrescentam ainda que os compostos como os dois silicatos de cálcio (C_2S e C_3S) são responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada, bem como o C_2S tem influência no ganho da resistência posterior, enquanto que o papel do C_3S contribui basicamente para o desenvolvimento da resistência durante as primeiras quatro semanas.

Petry *et al.* (2017) retratam que a utilização de adições minerais no concreto interfere no estado fresco quanto endurecido, e utilizando o material como características de fíler, os vazios existentes tendem a ser preenchidos, principalmente na zona de transição do qual torna-se responsável pela fratura, diminuindo ou aumentando a resistência dos concretos.

Nos trabalhos cujo resíduo foi utilizado como substituto parcial do cimento observou-se uma queda da resistência, porém os valores de resistência se mantiveram dentro do exigido por norma em substituição de até 10% (ARUNTAS, *et al.*, 2010).

Rana *et al.* (2015) analisam o uso da lama de marmoraria em seis misturas contendo de 0% até 25% e os resultados de resistência à compressão apresentaram uma queda com o aumento da taxa de substituição do resíduo.

Rodrigues *et al.* (2015), utilizando o resíduo de lodo de mármore, concluíram que a resistência mecânica diminuía à medida em que a relação de substituição do cimento aumentava. Resultados satisfatórios de até 10% de substituição do cimento pelo resíduo, porém, a partir de 20%, apresentou um aumento da redução na resistência.

Na visão de Arel (2016), a introdução do resíduo de mármore processado na produção do concreto gera benefícios significativos a economia e ao meio ambiente e a substituição de 5% a 10% do pó do mármore pelo cimento, tende a melhorar o comportamento mecânico do concreto, reduzindo assim as emissões de CO₂ na produção do cimento em 12%.

Por outro lado, Mashaly *et al.* (2016) incorporaram lodo de mármore em compósitos de cimento e blocos de pavimentação de concreto em até 40%, e os testes de ensaios nas idades 3, 7 e 28 dias mostraram que o uso de 20% do lodo de mármore melhorou o desempenho mecânico e físico, mas os resultados mostraram que a porosidade aparente e absorção de água nas misturas contendo a porcentagem do resíduo aumentaram com o aumento do teor do mesmo devido a sua alta área superficial.

Singh *et al.* (2017) demonstram que a aplicação da lama de mármore pode ser uma boa fonte para uso como substituição parcial do cimento no concreto, pois ajudaria no crescimento sustentável e na deposição dos resíduos no meio ambiente. Os resultados mostraram que a incorporação da lama de mármore apresenta alta resistência com a amostra de 15% de substituição em comparação com a amostra padrão (sem resíduo), mas a partir de 20%, apresenta uma queda da resistência.

Khodabakhshian *et al.* (2018a) em seus estudos, analisaram a incorporação dos resíduos de mármore em pó e sílica ativa em substituição parcial do cimento. Para as amostras com o uso do pó de mármore, foram medidos 0%, 5%, 10% e 20% com uma relação a/c de 0,45. Resultados mostraram que a resistência tende

a diminuir para as taxas acima de 10% de substituição e para taxas menores que 10%, melhores resultados de durabilidade e resistência foram alcançados.

3.2.2.3 Módulo de elasticidade

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o valor do módulo de elasticidade demonstra a medida da rigidez do material, ou seja, quanto maior o valor do módulo, menos deformável é o material. Os mesmos autores abordam que o módulo dinâmico de deformação corresponde a uma deformação muito pequena, geralmente de 20% a 40% maior em relação ao módulo estático para concretos de alta resistência ($f_{ck} \geq 40\text{MPa}$), média ($20 < f_{ck} < 40\text{MPa}$) e baixa resistência ($f_{ck} \leq 20\text{MPa}$), respectivamente.

Segundo Mehta e Monteiro (2014); Neville e Brooks (2013), a cura do concreto tem a tarefa de proporcionar a hidratação do cimento, aumentando assim a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Por sua vez, fatores como a relação a/c e o grau de hidratação do cimento afetam diretamente o módulo de elasticidade do concreto, pois são fatores que controlam a porosidade da matriz da pasta de cimento. Os mesmos autores de forma geral, retratam ainda que as microfissuras, vazios capilares e cristais orientados de hidróxido de cálcio são mais comuns na zona de transição do que na pasta de cimento, e dessa forma, contribui nos resultados do módulo de elasticidade do concreto.

Bacarji *et al.* (2013) concluíram que o módulo de elasticidade diminuiu com o aumento do percentual do resíduo de mármore aplicado como substituição do cimento nas proporções 0%, 5%, 10% e 20% com duas relações água/cimento distintas.

Rodrigues *et al.* (2015) mostraram em seus resultados que o módulo de elasticidade diminuiu à medida que a substituição de lama de marmoraria aumentava. Retratam ainda que altos valores de correlação confirmam que as propriedades de módulo de elasticidade e resistência à compressão estão relacionadas. O módulo de elasticidade do concreto tende a diminuir com o aumento da relação água/cimento.

3.2.2.4 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica do concreto refere a uma propriedade que determina a sua capacidade em resistir à passagem da corrente elétrica. Raisdorfer (2015) especifica como um parâmetro encarregado por indicar o grau de dificuldade da passagem da corrente elétrica pelo material, sendo o inverso da condutibilidade.

Ghods *et al.* (2007) destacam que a resistividade elétrica tem o poder de influenciar diretamente na velocidade ou taxa de corrosão das armaduras do concreto, sendo um dos principais processos de deterioração das estruturas. Quando a corrosão aparece no compósito cimentício, o ensaio de resistividade identificará a umidade presente na estrutura (GHODDOUSI e SAADABADI, 2017).

Diante da redução da permeabilidade motivada através do refinamento dos poros e do aumento da densidade na matriz do concreto, algumas das adições minerais podem contribuir para minimizar a penetração de cloretos e a entrada de umidade no interior do concreto, aumentando assim a sua resistividade e conduzindo na prevenção contra a corrosão das armaduras (FONSECA, 2010).

Ghods *et al.* (2007) e Neville (2015) mencionam a influência da resistividade elétrica sobre o avanço da corrosão do aço, relatando que a alta taxa de corrosão no interior do concreto tende a influenciar significativamente na queda da resistividade elétrica do concreto.

Polder (2001) apresenta uma análise da possibilidade de corrosão em função dos valores da resistividade, conforme demonstrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Probabilidade de corrosão em função da resistividade

Resistividade do concreto (Ohm.m)	Indicação da probabilidade de corrosão
< 50	Muito alta
50 - 100	Alta
100 - 200	Baixa
> 200	Desprezível

Fonte: Adaptado de Polder (2001).

Para Andrade, e D'Andréa (2011); Polder (2001); Vijayalakshmi *et al.* (2013), o ensaio de resistividade vem sendo utilizado como parâmetro para a previsão da vida útil da estrutura, podendo ser avaliada a durabilidade do concreto e está associada com a permeabilidade, com a resistência do concreto à penetração dos agentes agressivos no interior do concreto, efeitos de condições de cura da microestrutura do concreto e o processo de desenvolvimento da hidratação de matrizes cimentícias com adições minerais (LENCIONI *et al.*, 2010; MCCARTER *et al.*, 2015).

Polder (2001) retrata ainda que quanto maior é a penetração da água, maior é o grau de umidade do concreto e menor será a sua resistividade elétrica, tornando mais fácil o fluxo da corrente elétrica.

Ghosh e Tran (2015); Mehta e Monteiro (2014) complementam que a resistividade do concreto é influenciada pelas características microestruturais da matriz do concreto e a influência está ligada diretamente nos aspectos de durabilidade do concreto por diversos fatores, tais como a porosidade e o índice de vazios podendo influenciar tanto na resistência à compressão quanto na resistividade elétrica. Outros fatores como a composição e concentração da água livre, relação a/c, cura e grau de hidratação do cimento, o tipo e quantidade de agregados, parâmetros geométricos, carbonatação, temperatura, umidade, adições minerais, consumo de cimento, aditivos, características ambientais, como a temperatura e a umidade do concreto que está submetido. Segundo Hornbostel (2013), a permeabilidade da estrutura depende do meio entre os poros capilares e não apenas do volume total de vazios no concreto.

A corrente elétrica que penetra no concreto é conduzida pela solução aquosa dos poros que tende a diminuir de volume em relação a redução do teor de umidade. Dessa forma, a passagem de corrente elétrica diminui e a resistividade elétrica apresenta aumento (HOPPE, 2005).

Dessa forma, o concreto que contém adições minerais apresenta maior resistividade elétrica quando comparado com o concreto sem adição. Essa densificação da matriz e o aumento da quantidade de poros de menores diâmetros dificultam a condução da corrente através do concreto, resultando assim no aumento da resistividade elétrica (SANTOS, 2006).

Nos estudos de Andrade e D'Andréa (2011); Lübeck *et al.* (2012); Medeiros-Junior *et al.* (2014); Rosa (2005) destacam a correlação entre os ensaios de resistência à compressão e resistividade elétrica superficial, proporcionando tanto o controle da qualidade como a verificação da taxa de agressividade do concreto. Os resultados demonstram que a resistividade aumenta conforme o crescimento da resistência mecânica à compressão, podendo ocorrer devido ao progresso da hidratação da pasta. Concluindo assim, que quanto menor a relação a/c maior será a resistência e a resistividade.

Por outro lado, Medeiros-Junior e Gans (2017) relatam em seus estudos que ao misturar adições minerais ao clínquer, mudanças acontecem na matriz do concreto e isso se dá a reação química entre os elementos do cimento e a água, podendo impactar nas propriedades elétricas do concreto.

Resistividade elétrica superficial e Resistividade elétrica volumétrica

A resistividade elétrica pode ser dividida em duas modalidades: Resistividade elétrica superficial (aparente) e a resistividade elétrica volumétrica. E se diferem por apresentar valores de resistividade distintos para um mesmo elemento de concreto, pois a resistividade elétrica superficial abrange uma área mais superficial, correspondente à região de cobrimento da armadura, e que sofre ciclos permanentes de molhagem e secagem. Já a resistividade elétrica volumétrica abrange uma área interna, onde a umidade é mais estável (ROSA, 2005).

O ensaio para determinar a resistividade elétrica superficial, consiste no posicionamento de quatro eletrodos alinhados e de espaçamento padrão de 50mm, em contato com a superfície do concreto, sendo a resistividade medida através da leitura da corrente elétrica gerada por uma diferença de potencial aplicada entre eletrodos internos e externos, também conhecido como método de Wenner, sendo uma técnica de fácil aplicação no concreto, podendo ser empregada tanto no laboratório quanto in loco (LÜBECK *et al.*, 2012; MCCARTER *et al.*, 2015).

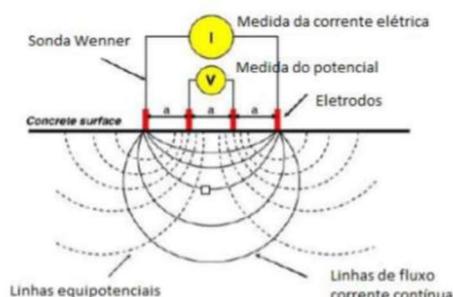
A realização de locais se distingue também entre os dois procedimentos, pois o ensaio volumétrico exige a extração de corpos de prova de uma estrutura já edificada ou a coleta de amostras do concreto (RAISDORFER, 2015).

Para determinar a resistividade elétrica volumétrica, o ensaio consiste na aplicação da corrente elétrica em um ponto do material, que tende a penetrar pela estrutura porosa, e conseqüentemente analisar a diferença de potencial ocorrido (CHEN *et al.*, 2014; KHODABAKHSHIAN *et al.*, 2018a; LENCIONI e LIMA, 2010). O método consiste na passagem de um fluxo de corrente contínua por meio do concreto e determina a diferença de cargas entre as duas placas de cobre. Esta análise está relacionada a durabilidade do concreto (MCCARTER *et al.*, 2015).

Sendo pouco conhecido na literatura por sua aplicação, o ensaio de resistividade elétrica volumétrica do concreto é normatizado no Brasil, de acordo com a NBR 9204 (ABNT, 2012), e emprega 3 eletrodos (sendo dois blindados e um não blindado), e uma fonte de alimentação contínua estabilizada de $50\text{ V} \pm 0,5\text{ V}$ e um miliamperímetro que permite uma leitura de 0,15 mA a 200 mA, obtendo uma precisão de $\pm 1\%$, é empregado o uso mercúrio para uma melhor aderência e área de contato entre as placas e o concreto. No entanto, por ser um produto considerado tóxico, e requer muito cuidado durante a aplicação no ensaio, foi optado para este trabalho o uso de esponjas de aço úmida para um melhor contato entre o concreto e as placas de cobre.

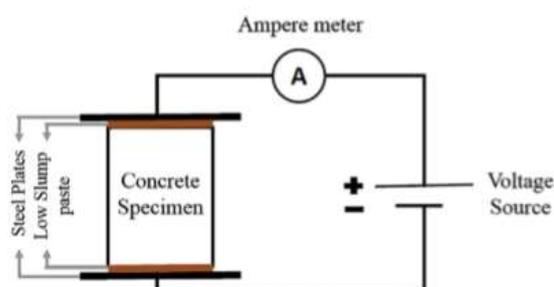
As Figuras 3.11 e 3.12 apresentam desenhos esquemáticos da resistividade elétrica superficial e volumétrica.

Figura 3.11 - Desenho esquemático de sonda Wenner de 4 eletrodos



Fonte: Beushausen, 2015.

Figura 3.12 - Desenho esquemático de resistividade elétrica volumétrica



Fonte: Khodabakhshian *et al.*, 2018a.

3.2.2.5 Absorção de água do concreto

A durabilidade do material pode ser influenciada por um dos fatores como o índice de absorção de água do concreto. Segundo Kalla *et al.* (2013), o presente fato do concreto ser mais ou menos permeável está ligado com a interconectividade dos poros, ou seja, poros capilares interligados influenciam na velocidade a qual a água e agentes agressivos penetram nos poros do concreto.

As adições minerais agem no intuito de formar um concreto com maior possibilidade de impedir a passagem de água em seus poros capilares. Ao reagirem com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, resultam em compostos resistentes, causando redução na absorção do concreto. Vale destacar que a diminuição da absorção da matriz, pode ser devido a influência dos materiais finamente moídos agindo no preenchimento dos poros das matrizes cimentícias, modificando a estrutura e provocando a formação do efeito filer.

Por outro lado, segundo Coutinho (1994 *apud* Gonçalves, 2000), um aumento de porcentagem de adição de resíduos, isento de atividade química, pode contribuir e aumentar a absorção capilar.

Andrade e Tutikian (2011) salientam que o efeito físico representa um aumento da densidade do concreto em função do preenchimento dos vazios pelas partículas das adições que geralmente são finas, que intensificam a estrutura dos poros. Almeida *et al.* (2007) destacam a melhora na absorção está relacionada ao efeito microfíler do resíduo, cujas partículas complementam a zona de transição e o preenchimento dos polos capilares, diminuindo o espaço da água livre.

Segundo Andrade e Tutikian (2011), a pasta endurecida microestruturalmente na questão visual é composta essencialmente por três etapas: sólida (silicato de cálcio hidratado [C-S-H] e hidróxido de cálcio); líquida (a água em diferentes formatos no interior) e os vazios (ar incorporado, ar aprisionado, pelos vazios capilares e pelo interlamelar do C-S-H).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), índice de vazios refere a uma relação entre os volumes de poros permeáveis, isto é, aqueles aos quais a água tem acesso ao volume total do concreto. Todavia, quanto maior o índice de vazios, menor a resistência à compressão.

Dessa forma, a porosidade consiste no volume total de vazios presente no concreto, e a resistência está propriamente relacionada a ela. Contudo, quanto maior a porosidade, menor a resistência do concreto (NEVILLE, 2015).

Do ponto de vista de Neville (2015), a relação água/cimento e adensamento interfere no resultado da resistência à compressão e na porosidade. Sendo assim, quanto menor a relação água/cimento e melhor o adensamento do concreto, maior será a resistência à compressão e menor será a porosidade da pasta de cimento.

Na visão de Andrade e Tutikian (2011), a porosidade total do concreto tem uma influência dos mais diferentes fatores: interface pasta-agregados, características da pasta do cimento (relação a/c, idade e cura), uso de adições e aditivos, exsudação, tamanho e porosidade dos agregados.

Almeida *et al.* (2007) em seus resultados encontraram uma redução de aproximadamente 15% da absorção de água com uso do resíduo. Colangelo *et al.* (2010) observaram melhores resultados nos concretos com resíduos em relação ao de referência em substituição ao agregado. Porém, em substituição parcial do cimento, os resultados encontrados de coeficientes de capilaridade foram semelhantes ou maiores que o concreto de referência. Do mesmo modo, resultados de porosidade e absorção nos trabalhos de Topçu *et al.* (2009) foram maiores com o aumento do uso do resíduo, porém relatam que até 30% de substituição essa diferença não foi significativa.

Para Bacarji *et al.* (2013), quando o resíduo de rochas ornamentais inerte é utilizado em substituição parcial ao cimento, costuma ocorrer um aumento de quantidade de água absorvida na produção dos concretos.

Nos estudos de Dietrich *et al.* (2017), foram encontradas duas hipóteses, onde identificou maior absorção à medida que cresce o teor de adição para uma menor relação a/c. Enquanto para maiores relações a/c apresentou uma redução da quantidade de água absorvida à medida que o percentual de resíduo aumentou.

Conforme verificado por Singh *et al.* (2016), os resultados mostraram que com 50% de substituição, a ação de ligação das partículas de corte de granito deixou de ser viável e funcional, pois sua microestrutura resultou ser mais fraca e porosa na matriz do concreto. Destaca-se também que houve perda de resistência à compressão para a relação a/c de 0,4 para 0,3, podendo ser atribuído ao fato de

que a porosidade do corpo de prova de concreto aumenta com o aumento da relação a/c , isso é notável através do estado de matriz do concreto por apresentar com mais vazios, falhas e microfissuras internas. Ressalta ainda que à medida que a porosidade da matriz do concreto aumenta, a probabilidade de intrusão de ácido torna-se elevada.

3.2.3 Influência das adições minerais para o desenvolvimento sustentável

Devido ao volume do resíduo gerado, inúmeros estudos vêm sendo realizados em incorporar o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em concretos para aplicação de produtos na construção civil, com a finalidade de encontrar um destino para o resíduo, minimizando assim o impacto ambiental.

O acúmulo destes resíduos de rochas ornamentais em aterros ou próximos as indústrias representam a perda de material para a realização de produtos como também a uma geração de diversos problemas ambientais.

A aplicação do uso do resíduo de rochas ornamentais como produção de concretos, sendo substituído parcialmente pelo peso do cimento, reduz a quantidade do material a ser despejado em aterros e diminuição nas emissões de CO_2 , fatores esses que geram impacto no meio ambiente.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados e descritos os materiais e métodos utilizados no presente trabalho, sendo empregadas as principais recomendações normativas nacionais e internacionais vigentes.

Algumas informações relevantes são apontadas, como os parâmetros e procedimentos adotados, as caracterizações dos materiais utilizados no concreto, bem como os métodos de ensaio aplicados na pesquisa.

4.1 Fluxograma do Procedimento Experimental

Buscando gerenciar melhor o projeto de pesquisa, e alcançar os objetivos estabelecidos, foi montado um programa experimental subdividido em três áreas principais que consistem em: caracterização dos materiais, definição dos traços com a preparação e moldagem dos corpos de prova e realização dos ensaios do concreto fresco e endurecido.

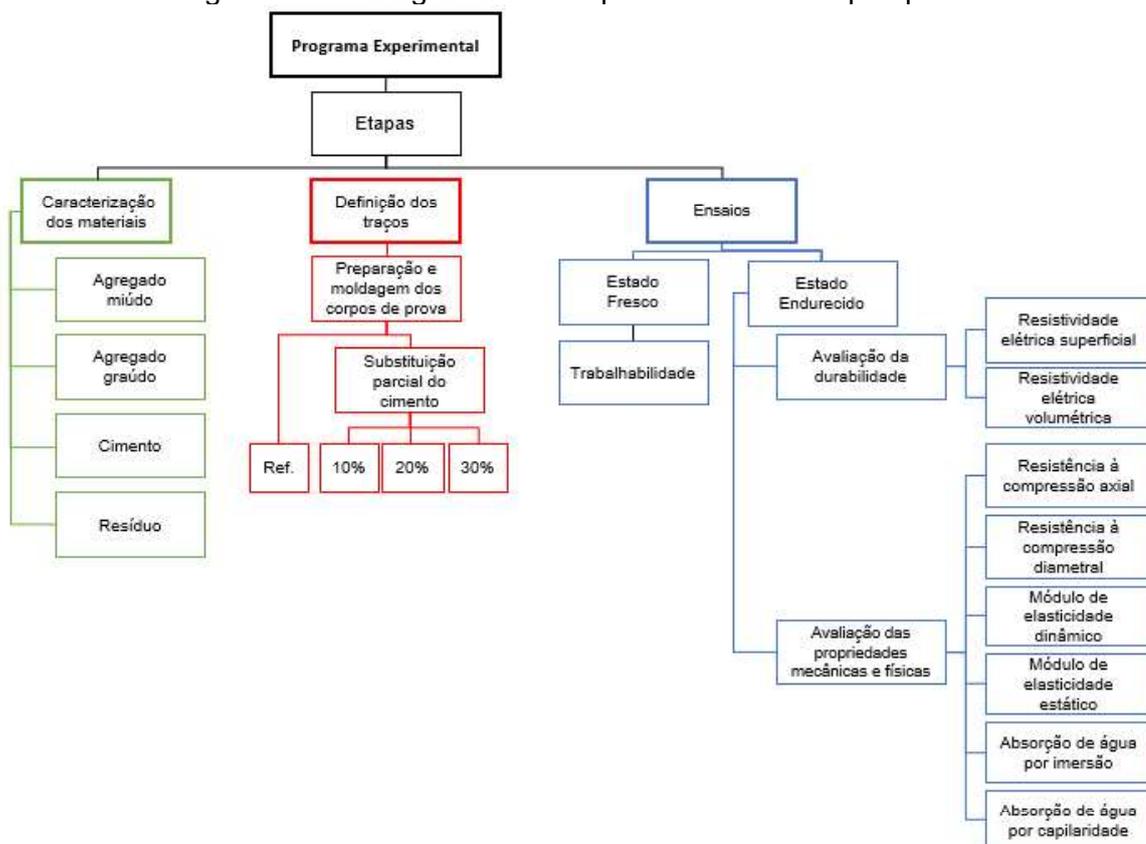
A Figura 4.1 apresenta-se o fluxograma de etapas do programa experimental, onde foram realizadas as caracterizações dos materiais (agregado miúdo, agregado graúdo, cimento e resíduo da lama de marmoraria ou lama abrasiva), sendo este resíduo desidratado, proveniente de diferentes tipos de rochas ornamentais (em pó), água e restos de elementos abrasivos.

Posteriormente, foi utilizado o traço de referência de uma empresa que fabrica peças de bloquete. A partir do traço padrão (sem resíduo), foram determinados mais 3 diferentes traços onde a única variável foi a substituição parcial do peso do cimento pelo resíduo na mesma proporção (10%, 20% e 30%).

A lama coletada em estado sólido e após passar pelo processo térmico resultando em pó fino, foi incorporada na produção do concreto, sendo moldados dois diferentes tipos de corpos de prova (10 x 20) cm e (15 x 30) cm.

Finalmente, foram realizados os ensaios no estado fresco e endurecido através das propriedades mecânicas, físicas e parâmetros de durabilidade para verificar o comportamento e a influência do resíduo no concreto.

Figura 4.1 - Fluxograma das etapas de ensaios da pesquisa



4.2 Caracterização dos Materiais Utilizados

Um dos primeiros passos deste estudo envolveu a coleta da lama de marmoraria e a caracterização de todos os materiais a serem empregados na produção do concreto, e posteriormente a realização da dosagem e definição do traço de referência.

Foram preparadas 4 dosagens distintas para a produção do concreto, obtendo entre elas uma dosagem de referência. As 3 dosagens consistiram em substituir parcialmente o peso do cimento pelo resíduo do pó da lama na mesma proporção (10%, 20% e 30%), para uma mesma relação água cimento.

O estudo da influência do pó de resíduo de lama de marmoraria proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais do processamento à úmido ocorreu em 2 fases distintas onde foram coletadas duas amostras de resíduos da lama desidratada no estado sólido em semestres diferentes (fevereiro e outubro) no ano de 2018, no município de Belo Horizonte.

A seleção dos materiais utilizados para os ensaios foi adquirida em empresas de Belo Horizonte, Contagem e Pedro Leopoldo e de fácil disponibilidade no mercado, levando em conta a produção do material processado e o volume de resíduos decorrentes nos últimos anos, e a acessibilidade e cooperação dos proprietários em explicar o processo.

Os materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova foram o pó do resíduo de lama de marmoraria, cimento *Portland* CPV Ari, agregado miúdo de gnaiss (areia média artificial), agregado graúdo de gnaiss (brita nº 1) e água potável.

4.2.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a produção dos corpos de prova foi areia artificial de gnaiss (areia média) obtida por processo de britagem industrial, sendo comercializada na região metropolitana de Belo Horizonte/MG. Passou por um processo de secagem ao ar em ambiente protegido de intempéries para a remoção de umidade, possuindo uma dimensão máxima de 4,80 mm.

A Figura 4.2 mostra-se a separação do agregado miúdo.

Figura 4.2 - Caracterização do agregado miúdo



4.2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado no concreto foi de origem de rochas basálticas da região de Contagem/MG, sendo um material bastante limpo e com pouquíssima presença de partículas na forma de pó. O agregado graúdo foi colocado para

secagem ao ar em ambiente protegido de intempéries para a remoção de umidade, obtendo uma característica de dimensão máxima de 19,00 mm.

A Figura 4.3 mostra a separação do agregado graúdo.

Figura 4.3 - Caracterização do agregado graúdo



4.2.3 Cimento Portland

O cimento empregado na preparação dos concretos foi do tipo Portland de alta resistência inicial - CPV Ari e escolhido por atingir altas resistências nos primeiros dias da aplicação e por possuir menor teor de adições, possibilitando uma melhor avaliação do efeito da incorporação do resíduo.

Os sacos de cimento de 40kg cada foram produzidos e entregue uma semana antes da concretagem. Foram armazenados sobre pallets em local com temperatura e umidade controlados, mantendo assim suas propriedades físicas e químicas.

4.2.4 Água potável

A água potável utilizada é a que abastece as residências mineiras, proveniente da rede de abastecimento público.

4.2.5 Adição mineral (Resíduo de lama de marmoraria)

Foram realizadas visitas nas marmorarias em alguns bairros do município de Belo Horizonte e Lagoa Santa. O resíduo utilizado neste estudo foi disponibilizado pela empresa de marmoraria de médio a grande porte localizada na região da Pampulha em Belo Horizonte/MG.

Esse resíduo, denominado de lama de marmoraria ou lama abrasiva passou por um tratamento através do processo de caixas de decantação e do uso do equipamento de filtro prensa que tem como objetivo reduzir a quantidade de água e minimizar o volume para ser transportado e depositado no local adequado.

As amostras coletadas e caracterizadas, correspondem ao resíduo de lama gerado proveniente do beneficiamento de diferentes tipos de rochas ornamentais através do processamento à úmido nas fases do corte, polimento e acabamento final de chapas brutas e processadas

Na fase principalmente do polimento, o uso da quantidade de água pode ser maior para lustrar a peça que chega rugosa e áspera, podendo proporcionar uma perda de aproximadamente 1cm de espessura na peça, logo, esse resíduo coletado em formato de torta, encontrou-se armazenado no tanque resultante de uma massa de partículas finas com uma porcentagem de água bem reduzida. Dependendo do período de tratamento da lama, o material pode apresentar mais úmido e pesado ou uma lama mais seca e leve.

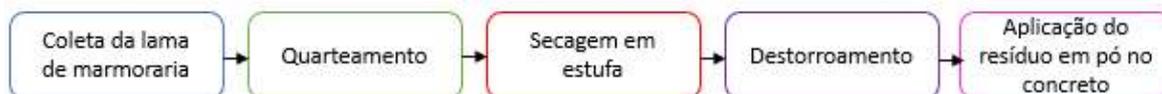
A Figura 4.4 apresenta-se a lama armazenada no tanque após seu tratamento pelo processo de desidratação executado pelo equipamento de filtro prensa e assim que o tanque chega a capacidade total, esse material é transportado pela empresa contratada e encaminhado para o destino final.

Figura 4.4 - Lama armazenada no tanque após tratamento



Antes de ser inserida na massa do concreto, a lama passou por alguns procedimentos e preparos, conforme apresentado na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Processo de preparação do resíduo para aplicação na pesquisa



Esse resíduo, após passar pelo tratamento, concebido em forma de torta de lama, foi retirado do tanque da empresa de marmoraria e colocado no recipiente com destino ao laboratório de Concreto e Argamassa da UFMG.

Passou por um processo de quarteamento, onde o material foi despejado em um balcão limpo de superfície lisa e plana, e dividido em quatro partes, sendo descartadas as duas partes opostas.

As partes que não foram descartadas, foram misturadas novamente. Esse processo ocorreu algumas vezes até chegar no volume desejado do material, de acordo com NBR 10007 (ABNT, 2004).

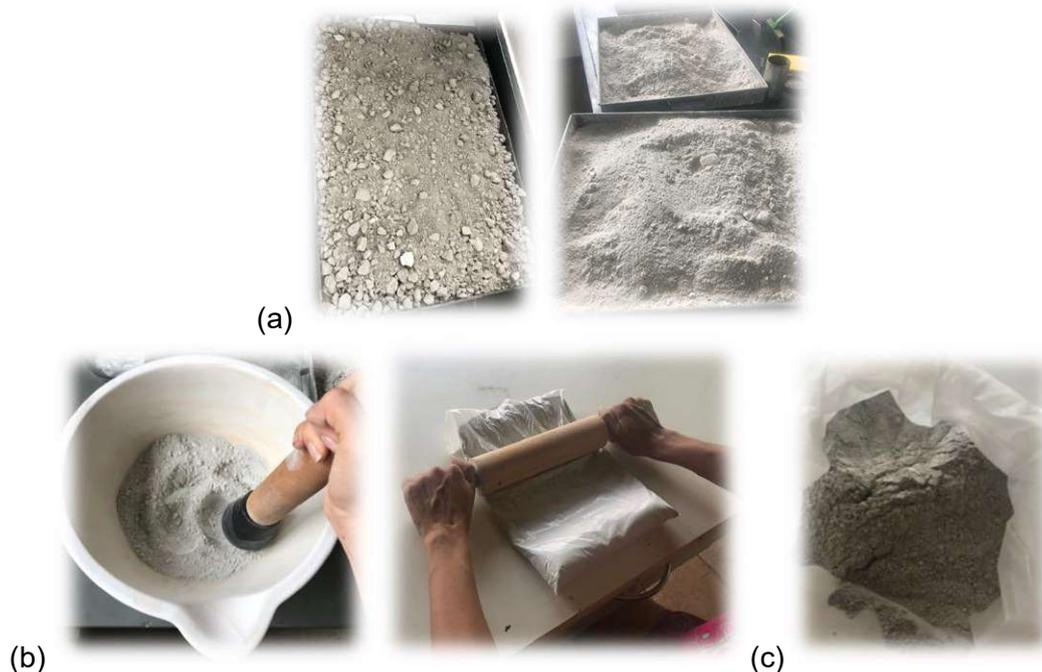
Para secar totalmente a lama que encontrava no estado sólido (Figura 4.4), foi colocada em pequenas partes no tabuleiro a amostra, fragmentada e armazenada na estufa à temperatura de $(100 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por 24 horas.

Após a secagem, o material foi resfriado naturalmente e em seguida, executado o processo do destorroamento manual, e algumas vezes utilizado também um rolo de macarrão para desagregar o resíduo.

Posteriormente, os resíduos foram acondicionados em sacos plásticos em local fresco e protegidos do sol e longe da umidade até o momento da sua utilização, aguardando a data para ser aplicado na massa do concreto referente a cada traço determinado. O resultado é um resíduo em pó altamente fino da cor cinza claro com uma granulometria semelhante a do cimento.

Na Figura 4.6 apresenta-se a preparação do resíduo.

Figura 4.6 - (a) Resíduo após passar pela secagem em estufa no laboratório; (b) Destorroamento manual do resíduo; (c) Resíduo de lama em pó e ensacado



4.3 Preparação e moldagem dos corpos de prova

4.3.1 Dosagem dos concretos e preparação dos corpos de prova

O traço aplicado na pesquisa já é utilizado na fabricação de bloquetes para calçamentos e pavimentos, sendo um traço padrão de 1: 2,04: 2,34, com relação água cimento de 0,53 proposto para o programa experimental, para uma resistência característica de 25 MPa aos 28 dias, no qual pretendeu variar o peso do cimento substituindo parcialmente pelas porcentagens do resíduo da lama de marmoraria em pó. Para compor o traço foi realizado o ensaio de caracterização dos agregados e do resíduo.

A partir do traço de referência, as denominações dadas para os três tipos de traços se diferem em relação a substituição da porcentagem de apenas um elemento (cimento *Portland*) pelo resíduo da lama de marmoraria, sem nenhuma alteração nas proporções dos outros materiais. Dessa forma, foi estabelecido um procedimento que o percentual de adição do resíduo fosse a única variável contida

no concreto para facilitar a influência do pó da lama de marmoraria no desempenho final dos concretos analisados.

Os corpos de prova foram referenciados nesta pesquisa respectivamente, como TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs.

Na Tabela 4.1 apresenta-se os 4 traços utilizados neste estudo.

Tabela 4.1 - Dimensionamento de dosagens

Descrição	Nomenclatura na pesquisa	Resíduo	Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	a/c
Referência	TRf		1,00	2,04	2,34	0,53
Substituição de 10% do cimento	T10%Cs	0,10	0,90	2,04	2,34	0,53
Substituição de 20% do cimento	T20%Cs	0,20	0,80	2,04	2,34	0,53
Substituição de 30% do cimento	T30%Cs	0,30	0,70	2,04	2,34	0,53

Quanto ao abatimento de tronco de cone sabe-se que o *slump* diminuirá progressivamente à medida que aumenta o percentual de adição do resíduo (pó da lama de marmoraria). Porém, para manter o abatimento na faixa que foi adotado (100 ± 20) mm, seria necessário aumentar a relação a/c ou usar algum aditivo químico, uma vez que todas essas possibilidades foram descartadas para evitar a inclusão de mais uma variável, visando analisar somente a influência da adição do resíduo em pó nas propriedades do concreto.

Conforme demonstrado na Tabela 4.1, o primeiro traço é de referência, e os demais consistem na substituição de 10%, 20% e 30% do peso do cimento pela mesma porcentagem adicionando o resíduo de lama de marmoraria em pó. Em cada fase foram determinadas as propriedades mecânicas e físicas e os parâmetros de durabilidade, sendo realizados os ensaios de resistência mecânica, resistividade elétrica pelos métodos de análise superficial e volumétrica, módulo de elasticidade dinâmico e estático, absorção de água por imersão e capilaridade. Para um melhor conhecimento do resíduo a ser utilizado, foram realizadas as análises química, física, termogravimétrica, mineralógica e de pozolanicidade.

Foram utilizados dois diferentes tipos de corpos de prova cilíndricos de (10 x 20) cm e (15 x 30) cm para a concretagem e após a confecção, foram identificados

e retificados, e em seguida, armazenados em câmara úmida sob condições de 95% de umidade e temperatura de $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$, sendo preparados para os ensaios tecnológicos que foram realizados nas idades de 3, 7, 14, 28, 60, 91, 120 e 180 dias.

A Tabela 4.2 apresenta-se os parâmetros dos ensaios e seus respectivos corpos de prova confeccionados.

Tabela 4.2 - Parâmetro dos ensaios

Ensaio	Tipo de CP	Dimensão do CP (cm)	Idade (dias)	Total do nº de traço	Total do ensaio		
Resistência à compressão axial	Cilíndrico	10x20	3/7/14/28/60/100/120/180	4	96		
		15x30	28		8		
Resistência à compressão diametral		10x20	28/60		16		
Resistividade elétrica superficial		10x20	3/7/14/28/60/100/120/180		28		
		15x30	3/7/14/21/28		12		
Resistividade elétrica volumétrica		10x20	3/7/14/28/60/100/120/180		28		
		15x30	3/7/14/21/28		12		
Módulo de elasticidade dinâmico		10x20	3/7/14/28/60/100/120/180		16		
Módulo de elasticidade estático		10x20	28		12		
		15x30			12		
Absorção por imersão		10x20	60		12		
Absorção por capilaridade		10x20	60		12		
<i>Total de confecção de corpos de prova (10x20) cm</i>					192		
<i>Total de confecção de corpos de prova (15x30) cm</i>					12		

4.3.2 Moldagem e cura dos corpos de prova de concreto

A moldagem e cura dos corpos de prova seguiram os procedimentos previstos na NBR 5738 (ABNT, 2015). Foram utilizados dois tipos de moldes cilíndricos, sendo diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm e de 15 cm e altura de 30 cm com tolerância para as medidas diametraes de 1%, e para altura de 2%. O preparo das amostras de concreto fresco seguiu os padrões para a realização dos ensaios, baseado na norma (ABNT NM 33, 1998).

Primeiramente à etapa da produção dos concretos, os agregados miúdos foram secos ao ar e armazenados em recipientes plásticos apropriados. Os

agregados graúdos foram lavados, secos ao ar e armazenados da mesma forma que os agregados miúdos.

A produção do concreto e a moldagem dos corpos de prova se deu em quatro etapas, sendo uma para cada um dos traços de concreto proposto no trabalho. Foram moldados 48 corpos de prova para cada traço, sendo o primeiro a ser executado foi o traço de referência (sem adição do resíduo), totalizando 192 corpos de prova de (10 x 20) cm. Para os corpos de prova de (15 x 30) cm, foram moldados 3 de cada traço, totalizando 12 amostras.

A Figura 4.7 apresenta-se os corpos de prova moldados no laboratório.

Figura 4.7 - Corpos de prova de (10 x 20) cm e (15 x 30) cm moldados



Os moldes foram revestidos internamente com desmoldante (óleo mineral) para facilitar a desforma, onde foram apoiados sobre uma superfície fixa e horizontal, com uma concha e preenchido com concreto em duas camadas, cada camada adensada manualmente com uma haste metálica no qual foram aplicados 12 golpes.

Concluídas as moldagens, os corpos de prova foram etiquetados. A cura foi realizada ao ar nas primeiras 24 horas. Passado esse período, os corpos de prova foram desmoldados e retificados.

Em seguida, parte dos corpos de prova foram armazenados em câmara úmida para os ensaios de módulo de elasticidade estático, resistência à compressão e absorção de água por imersão e capilaridade.

Os restantes foram armazenados para os ensaios específicos nas idades 3, 7, 14, 28, 60, 91, 120 e 180 dias, da qual uma parte dos corpos de prova foram

submetidos à cura saturada em recipiente com água à temperatura ambiente para os ensaios de resistividade elétrica. Os demais corpos de prova foram armazenados em uma mesa do laboratório a temperatura ambiente para a realização dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico.

4.3.3 Ciclo de mistura

A sequência da mistura foi realizada colocando inicialmente o agregado graúdo e metade da água, depois adicionado o cimento e por fim, a areia, o resíduo e o restante da água.

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, retificados, etiquetados e armazenados uma parte a cura úmida, a outra parte, submetidos a cura saturada em água potável e o restante a temperatura ambiente. A condição de cura saturada se manteve até as idades previstas para os ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica.

4.4 Método dos Ensaios

São apontados nesta seção, os procedimentos experimentais seguidos dos instrumentos e equipamentos utilizados no desenvolvimento dos ensaios previstos no planejamento experimental, utilizando as principais recomendações normativas vigentes.

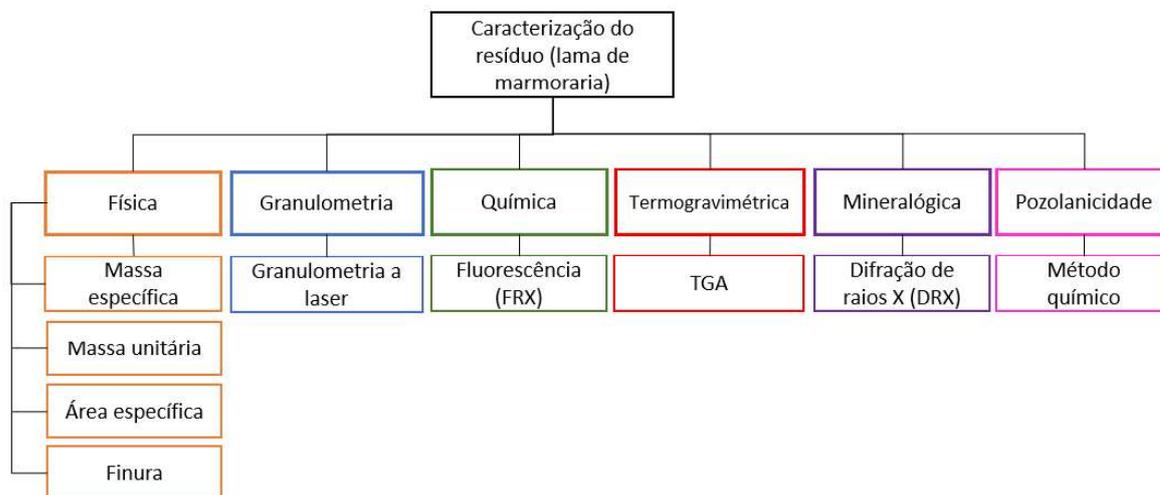
4.4.1 Caracterização do resíduo: Lama de marmoraria

Afim de caracterizar o resíduo (lama de marmoraria) para posterior aproveitamento no concreto, foram realizadas as análises química, física, mineralógica e atividade pozolânica.

A lama de marmoraria foi tratada termicamente em estufa durante 24 horas na temperatura de (100 ± 5) °C. Posteriormente, foi realizado um procedimento de “destorroamento manual” para a preparação do material na mistura do concreto.

A Figura 4.8 apresenta-se o fluxograma de caracterização do resíduo de lama de marmoraria (em pó).

Figura 4.8 - Fluxograma de caracterização do resíduo da lama de marmoraria



a) **Análise física**

Massa específica

O ensaio da massa específica de materiais granulares, se dá pela relação entre massa de uma determinada quantidade de material e o volume por ela ocupado, conforme prescrito no método de ensaio da ABIFA/CEMP 137 (2015) e NBR NM23 (ABNT, 2017).

O método foi determinado através da técnica do uso do frasco volumétrico de “*Le Chatelier*”. Essa técnica determina aplicar a quantidade de material através da quantidade pré-estabelecida de um líquido e a diferença do deslocamento do mesmo após a introdução da amostra.

Foram utilizados dois procedimentos. O primeiro foi colocado uma quantidade da amostra do resíduo da lama de marmoraria no recipiente do equipamento de analisador de densidade real, conforme Figura 4.9.

Outro procedimento adotado foi pesar o pó da lama em torno de 35g, sendo a amostra colocada dentro do frasco, com auxílio de um funil. Em seguida, foram realizadas novas leituras de volume do frasco e calculada a variação do volume de água contida no recipiente, ficando o frasco imerso em água destilada por um período de 30 minutos, conforme mostrado na Figura 4.9. O frasco volumétrico foi

submergido no banho termostático até que atingiu o equilíbrio. Diante disso, foi anotada a leitura final. A massa específica foi obtida através da Equação 4.1 abaixo:

$$d = \frac{M}{V} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

d = massa específica (g/cm³);

M = massa da quantidade do material (g);

V = volume da amostra obtida por (V_f – V_i);

Figura 4.9 - Equipamento de analisador de densidade real



Figura 4.10 - Frasco volumétrico submergido no banho termostático



Análise granulométrica

Para a granulometria dos resíduos foi utilizada as técnicas de sedimentação e peneiramento, através dos procedimentos de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2018), baseada na Lei de Stokes, que induz a ação da gravidade em uma partícula em um meio fluido. O objetivo do ensaio é conhecer o tamanho dos grãos e suas respectivas porcentagens, sendo representado através de uma curva. A Figura 4.11 apresenta a caracterização e análise granulométrica do resíduo da lama de marmoraria em pó.

Após a coleta dos resíduos no tanque da empresa e armazenados no recipiente, foram transportados para o laboratório de Concreto e Argamassa da UFMG e inicialmente, o material por apresentar forma pastosa, porém sólido, foi colocado no tabuleiro em pequenos fragmentos e seco em estufa à temperatura de $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ por 24 horas, resultando em um pó muito fino. Posteriormente, para as análises subsequentes fossem realizadas, o material foi preparado conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016). Para isso, o resíduo passou pelo processo de destorroamento, e em seguida, foi submetido à peneira na malha de 0,074 mm.

O material foi submetido a imersão em água destilada com desfloculante por um período de 12 horas. Em seguida, a dispersão foi realizada com uso de aparelho dispersor por 15 min, favorecendo a suspensão das partículas.

Em seguida, as amostras foram transferidas para uma proveta que passou a realizar as leituras por meio de um densímetro. Os resultados medidos em percentual sedimentadas foram adquiridos pela Equação 4.2 e dos diâmetros por meio da Equação 4.3.

$$P_{sed} = \frac{(\rho_s \times L_c)}{(\rho_s \times \rho_{disp}) \times M_{sed}} \times N \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$d = \sqrt{\frac{1800 \times \mu \times Z}{(\rho_s \times \rho_{disp}) \times t}} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Onde:

P_{sed} = porcentagem do resíduo em suspensão, no instante da leitura;

ρ_s = massa específica dos grãos, em g/cm^3 ;

ρ_{disp} = massa específica do meio dispersor (água), em g/cm^3 , à temperatura do ensaio;

$L_c = L_i + R$ = leitura corrigida;

L_i = leitura do densímetro;

R = valor de correção;

N = % que passa peneira # 200 mm;

$M_{s, sed}$ = massa seca utilizada na sedimentação;

d = diâmetro máximo das partículas (mm);

μ = coeficiente de viscosidade do meio dispersor (água), à temperatura do ensaio $\text{g.s}/\text{cm}^2$;

Z = altura de queda das partículas (distância entre o centro do densímetro e as leituras da haste do mesmo) em (cm), obtida da curva de calibração do densímetro;
t = tempo de sedimentação em (s);

Figura 4.11 - Caracterização e granulometria do resíduo



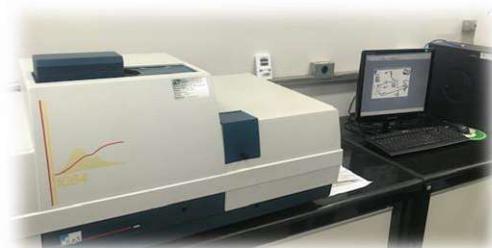
Análise de distribuição de tamanho de partículas por espalhamento dinâmico de luz (Granulometria a laser)

A análise granulométrica do material foi baseada no ensaio que consiste na determinação das dimensões das partículas que fazem parte da amostra, sendo aplicado em soluções líquidas com uma pequena porção do material para ser observado e analisado em suspensão e homogeneizado com dispersante hexametáfosfato com uma quantidade da massa total da amostra em torno de 0,5%.

Para não prejudicar o resultado das dimensões das partículas, a solução foi agitada e espalhada no recipiente com o objetivo de separar todas as partículas que encontravam aglomeradas umas as outras.

Esta análise foi resultado da ajuda de um equipamento denominado granulômetro a laser, da marca CILAS (Figura 4.12), realizado no laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG.

Figura 4.12 - Equipamento granulômetro a laser (Marca Cilas)



Com auxílio de um programa de computador, interligado ao equipamento simultaneamente, foi processada a contagem das partículas, sendo o tempo de medida total inferior a três minutos e a faixa de leitura do equipamento com uma variação de 0,5 a 500 μm , permitindo uma leitura de partículas mais precisa, como a amostra do resíduo que possui grãos finos, até menores que 0,075mm.

Os resultados são demonstrados em formas de curvas de porcentagem acumulada de partículas (%) versus diâmetro das partículas (μm) e tabelas dos diâmetros D10, D50, D90.

a) Análise Química

Espectrometria de Fluorescência de raios X (FRX)

A caracterização química do resíduo de lama de marmoraria foi realizada por meio da técnica de espectrometria por fluorescência de raios X (FRX) no Laboratório de Caracterização de Minérios e Materiais no Departamento de Engenharia de Minas da UFMG. O instrumento utilizado é o Espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX) sequencial PHILIPS (PANALYTICAL) modelo PW 2400, aderindo ao método de análise química semiquantitativa.

A técnica do ensaio permite que a absorção dos raios lançados provoca a excitação dos átomos da amostra estudada, sendo produzida uma radiação conhecida por fluorescência. Através da radiação, cada componente químico passa a ser identificado a partir da função do comprimento de onda dos raios emitidos (DIETRICH, 2015).

b) Análise Termogravimétrica

TGA

O ensaio da análise termogravimétrica é uma medida quantitativa de uma mudança de peso de um sólido, uma vez que é aquecido a uma taxa de controle. O TGA registra uma mudança na massa de desidratação, decomposição e oxidação da amostra com variações de temperatura e tempo. Essas variações são

consequências das modificações químicas e estruturais do material. O ensaio foi realizado no Laboratório de Química da UFMG.

c) Análise Mineralógica

Difração de raios X (DRX)

Para a caracterização mineralógica do resíduo de lama de marmoraria foi aplicado o ensaio de difração de raios X (DRX), que permite analisar qualitativamente as fases cristalinas presentes na amostra. O ensaio se dá através de um feixe de raios X de alta intensidade que reflete na pastilha compactada do material estudado.

A análise mineralógica qualitativa da amostra de resíduo de lama de marmoraria foi realizada no Laboratório de Química da UFMG e o equipamento utilizado é o X-ray diffratogram (Shimadzu) em tubo de Cu, voltagem 30,0 kV, corrente 30,0 mA, faixa de varredura entre 10° e 70° e velocidade de varredura 4°.min⁻¹.

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. A Figura 4.13 mostra o equipamento de difratograma de raios X.

Figura 4.13 - Equipamento de difratograma de raios X



d) Análise de Pozolanicidade

Atividade pozolânica – Método químico

Para determinar o ensaio da atividade pozolânica foi utilizado o método do Chapelle Modificado, de acordo com NBR 15895 (ABNT, 2010). Esse método avalia

a capacidade do material em fixar o hidróxido de cálcio na presença de uma solução aquosa com óxido de cálcio, que indica a atividade pozolânica dos materiais. Pozolanas são considerados materiais com bom desempenho que promovem melhoria das propriedades de uma matriz cimentícia (MITTRI *et al.*, 2018).

A definição de pozolanas, conforme NBR 12653 (ABNT, 2014) refere a um material silicoso ou sílico-aluminoso que sozinho possui pouco ou nenhuma propriedade cimentícia. Entretanto, na presença de umidade e em temperatura ambiente, a reação pode ocorrer com o hidróxido de cálcio constituindo compostos com propriedades cimentícias (BASTOS, 2014; DIETRICH, 2015).

Para realizar o ensaio, foi utilizado 1g de material pozolânico (resíduos), 2g de CaO e 250g de água isenta de CO₂ aquecidas em banho-maria a 90°C em agitação mecânica durante 16 horas. Outro recipiente é utilizado contendo 2g de CaO puro em 250ml de água isenta de CO₂ apontado como ensaio em branco.

Em seguida, os recipientes foram resfriados até a temperatura ambiente e após passar o período, foi adicionada as misturas uma solução de sacarose. O material analisado pode ou não reagir com a solução utilizada no ensaio.

Posto isto, o teor de CaO livre é medido pela titulação de solução com HCL 0,1 mol/l e fenolftaleína (1g/l). Após o ensaio finalizado, é analisado quanto de CaO livre resta na solução. Para identificar se o material é ou não pozolânico, é analisado a ocorrência das reações na mistura com auxílio de uma isoterma de solubilidade de Ca(OH)₂. E com base na norma, a pozolanicidade do material será maior, quanto mais elevado o índice de atividade pozolânica, dado pelo teor de óxido de cálcio fixado.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Especiais no Departamento de Materiais da UFMG e com base na norma foi aplicada a Equação 4.4. A Figura 4.14 demonstra o ensaio de pozolanicidade.

$$I_{Ca(OH)_2} = \frac{28 \cdot (V_3 - V_2) \cdot Fc}{m_2} \cdot 1,32 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Onde:

$I_{Ca(OH)_2}$ - índice de atividade pozolânica corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado, em (mg) de Ca(OH)₂ em grama 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

m₂ – massa do material pozolânico (g)

1,32 – relação molecular Ca(OH)₂/CaO

Figura 4.14 - Ensaio de pozolanicidade



4.4.2 Avaliação da propriedade do concreto no estado fresco

Trabalhabilidade

A fim de verificar a influência do resíduo na consistência e trabalhabilidade dos concretos foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone conforme a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Após a mistura dos materiais na betoneira de cada traço determinado, foram retiradas as amostras do concreto para os ensaios de índice de consistência e especificado o abatimento adotado de (100 ± 20) mm para que a mistura tivesse trabalhabilidade adequada para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos.

A determinação da trabalhabilidade visou avaliar a influência do fator água/cimento de 0,53, em diferentes porcentagens de resíduos a cada dosagem realizada, a fim de verificar o abatimento e a performance do concreto, proporcionando assegurar uma hidratação e homogeneização da pasta. O ensaio foi executado pelo mesmo método para todos os traços de concreto produzidos (TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs).

A Figura 4.15 demonstra o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco do cone em um dos traços.

Figura 4.15 - Ensaio de consistência por abatimento do tronco de cone (*slump test*)



4.4.3 Avaliação das propriedades mecânicas e físicas dos concretos no estado endurecido

Ensaio de Resistência à compressão axial

O ensaio de compressão axial refere a um ensaio destrutivo, bastante utilizado na engenharia para controle de obra, com objetivo de avaliar a resistência à compressão suportada pelo concreto, averiguando o dimensionamento do mesmo.

O procedimento para o ensaio é determinado através da aplicação de uma força axial aplicada ao corpo de prova na posição vertical fixado entre os eixos da prensa, conforme prescreve a norma NBR 5739 (ABNT, 2018).

A cada data de rompimento nas idades 3, 7, 14, 28, 60, 91, 120 e 180 dias, foram rompidos 3 corpos de prova para cada fase da mistura, sendo 96 corpos de prova submetidos ao rompimento por compressão axial.

Previamente, os corpos de prova cilíndrico de (10 x 20) cm tiveram suas faces retificadas, conforme prescrito na NBR 5738 (ABNT, 2015) e ficaram armazenados em câmara úmida.

Os corpos de prova foram rompidos com utilização de prensa eletro-hidráulica marca Viatest VC 751 para 2000 kN, apresentada na Figura 4.16. Sendo o carregamento aplicado continuamente e sem choques, com a velocidade de

aplicação da carga mantida constante na ordem de $(0,45 \pm 0,15)$ e o carregamento interrompido após a queda da força observada e a prensa paralisada, indicando a ruptura do corpo de prova.

Com isso, a resistência à compressão foi calculada a partir da Equação 4.5:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \cdot D^2} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Onde:

f_c = resistência à compressão (MPa);

F = força máxima alcançada (N);

D = diâmetro do corpo de prova (mm).

Figura 4.16 - Prensa hidráulica e posicionamento do corpo de prova após ruptura



Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral

Para a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), o corpo de prova cilíndrico de (10 x 20) cm foi colocado no eixo horizontal entre os pratos da prensa, sendo aplicada uma força até a sua ruptura por tração indireta.

O ensaio consiste em comprimir longitudinalmente o corpo de prova em direção do seu diâmetro. O equipamento refere a uma prensa eletro-hidráulica da marca Viatest VC 751 para 2000 kN, apresentada na Figura 4.17. Para facilitar o procedimento dos CP's na máquina, um dispositivo metálico foi utilizado para auxiliar. Primeiramente, foi medido o diâmetro para a determinação do eixo do corpo de prova e posição correta no equipamento.

Para cada mistura foram ensaiados 2 corpos de prova com idade de 28 e 60 dias de cada traço, onde foram retirados da câmara úmida.

A prensa foi ajustada e obtida uma compressão em que o corpo de prova manteve-se fixo na posição. A carga foi aplicada continuamente, com crescimento constante da tensão de tração, a uma velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s, fazendo a leitura de carga e deslocamento até a ruptura do corpo de prova, observando a ruptura com a separação das duas metades do corpo de prova, ao longo do plano diametral, conforme prescrito na NBR 7222 (ABNT, 2011).

A expressão aplicada a resistência à tração por compressão diametral foi calculada a partir da Equação 4.6.

$$f_{t,D} = \frac{2.F}{\pi.D.L} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Onde:

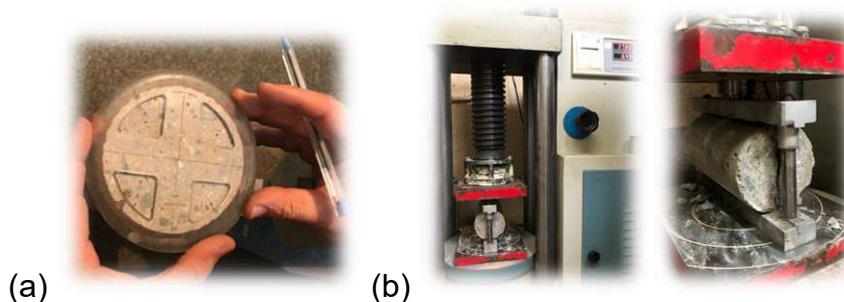
$f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa), com aproximação de 0,05MPa;

F = força máxima obtida no ensaio (N);

D = diâmetro do corpo de prova (mm);

L = comprimento do corpo de prova (mm).

Figura 4.17 - (a) Determinação do eixo do corpo de prova e (b) Prensa hidráulica do ensaio de resistência à compressão diametral



Ensaio de Resistividade elétrica superficial

Em relação ao ensaio de resistividade elétrica superficial, optou-se pelo não destrutivo baseado no método dos quatro eletrodos, onde a resistividade é medida através da leitura da corrente alternada entre os dois eletrodos externos a uma frequência entre 100 e 1000 Hz e na medição da diferença de potencial aplicada entre os eletrodos internos, colocados sobre a superfície do concreto, obtendo a medida desejada. O ensaio consiste em quatro posições diametralmente afastadas por 90° , de acordo com recomendações da norma T358-17 (AASHTO, 2017) e

executado em superfície uniforme. A resistência elétrica do material é a relação entre a tensão aplicada e a corrente medida.

Para a realização desse ensaio, foi utilizado o equipamento comercial Resipod da marca Proceq, e os valores obtidos através da leitura, em $K\Omega.cm$, no visor digital do aparelho de sonda, como mostra a Figura 4.18.

O valor da resistividade elétrica do concreto é dado pela Equação 4.7.

$$\rho = \frac{2\pi aV}{I} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Onde:

V = diferença de potencial elétrico (V);

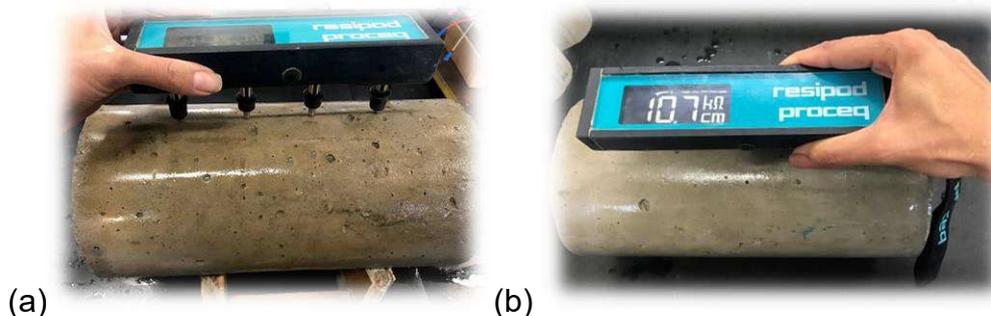
I = intensidade da corrente elétrica (A);

a = distância entre os eletrodos, devendo ser maior que o diâmetro máximo do agregado graúdo, sendo comumente igual a 5 (cm).

As medições de resistividade elétrica foram realizadas nos corpos de prova saturados que encontravam imersos em recipientes dentro do laboratório. Foram utilizados 7 corpos de prova de dimensão (10 x 20) cm para cada dosagem TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs, totalizando 28 amostras e determinados os resultados nas idades 3, 7, 14, 28, 60, 91, 120 e 180 dias.

Os mesmos procedimentos foram adotados para 03 corpos de prova de dimensão (15 x 30) cm para as mesmas misturas, totalizando 12 corpos de prova e ensaiados na idade 3, 7, 14, 21 e 28 dias.

Figura 4.18 - Procedimento de medição de resistividade elétrica superficial dos CP's
(a) posicionamento da sonda nas posições de medida pré-estabelecidas;
(b) leitura direta dos valores de resistividade elétrica superficial do concreto

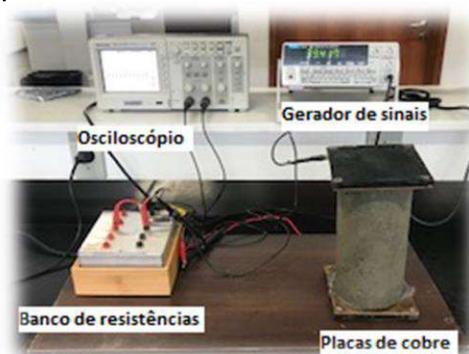


Ressalta-se que a recomendação normativa para corpos de prova (10 x 20) cm pede espaçamento entre eletrodos igual a 38 mm, e neste presente estudo, utilizou-se a sonda com espaçamento entre eletrodos igual a 50 mm, tendo em vista a disponibilidade do instrumento em laboratório, e o intuito meramente comparativo, entre os diferentes tipos de concretos produzidos, pelo qual não deve ser extrapolado para eventual análise externa a esta pesquisa. Evidencia que foram realizadas pesquisas para corpos de prova (15 x 30) mm, conforme especificação da norma.

Ensaio de Resistividade elétrica volumétrica

O ensaio de determinação de resistividade elétrica volumétrica foi realizado baseado na norma NBR 9204 (ABNT, 2012). O procedimento para a realização do ensaio, como apresentado na Figura 4.19, consiste em uma fonte de corrente elétrica contínua, resultante de cada corpo de prova, por uma diferença de potencial aplicada a uma determinada tensão nos dois eletrodos de placa de cobre posicionados nas extremidades da superfície do corpo de prova de concreto, utilizando a esponja de lã de aço úmida para auxiliar no contato e obter uma melhor aderência entre as superfícies retificadas do concreto e as placas.

Figura 4.19 - Equipamento do ensaio de resistividade elétrica volumétrica



Após a aplicação da tensão, a corrente elétrica gerada foi medida e a resistividade calculada pelas Equações 4.8 e 4.9.

$$R = \frac{CH1-CH2}{CH2} . Resistência\ Chant \quad (\text{Eq. 4.8})$$

$$\varepsilon = \frac{(A.R)}{L} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Onde:

R = resistência elétrica (Ω -Ohm);

ε = resistividade elétrica (Ohm);

L = comprimento da amostra (m);

A = área de seção transversal da amostra atravessada pela corrente (m^2).

Os corpos de prova encontram saturados em água potável no recipiente dentro do laboratório. Para a realização do ensaio foram utilizados os mesmos corpos de prova medidos no ensaio de resistividade elétrica superficial.

Foram utilizados 7 corpos de prova saturados de dimensão (10 x 20) cm para cada dosagem TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs, totalizando 28 corpos de prova e determinados os resultados do ensaio de resistividade elétrica volumétrica das amostras para as idades de 3, 7, 14, 28, 60, 91, 120 e 180 dias.

Para as mesmas dosagens, foram utilizados 03 corpos de prova de dimensão de (15 x 30) cm, totalizando 12 corpos de prova e ensaiados nas idades 3, 7, 14, 21 e 28 dias.

Ensaio do Módulo de elasticidade dinâmico e estático

O módulo de elasticidade dinâmico expressa a rigidez do concreto no estado endurecido, e para a realização do ensaio, aplica-se a NBR 8802 (ABNT, 2019), baseado num procedimento não destrutivo. O equipamento utilizado é determinado pelo método de frequência ressonante forçada no modo longitudinal, da marca Erudite MKII Ressonante Frequency Test System, conforme Figura 4.20.

Foram utilizados 04 corpos de prova de dimensão de (10 x 20) cm para cada dosagem TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs, totalizando 16 corpos de prova e ensaiados nas idades 3, 7, 14, 21, 28, 60, 91, 120 e 180 dias. Para o cálculo do módulo foi considerado a frequência de ressonância, massa e dimensões do corpo de prova, conforme Equação 4.10.

$$E_D = 4n^2L^2\rho x 10^{-15} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Onde:

L = comprimento do corpo de prova (mm)

n = frequência do modo fundamental da vibração longitudinal (Hz)

ρ = densidade (Kg/m³)

Figura 4.20 - Equipamento de módulo de elasticidade por frequência ressonante



Baseado na norma NBR 6118 (ABNT, 2014), o módulo de elasticidade estático deve ser realizado segundo o método de ensaio estabelecido na NBR 8522 (ABNT, 2017), sendo considerado nesta norma o módulo de deformação tangencial inicial do concreto (E_{ci}), obtido aos 28 dias de idade.

Primeiramente, determina-se a resistência à compressão do concreto, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018), em dois corpos de prova da mesma mistura, sendo preparados e curados da mesma forma que os demais corpos de prova a serem aplicados para determinar o módulo.

A metodologia aplicada para esta determinação é que os corpos de prova cilíndricos são inicialmente posicionados no centro da prensa, submetidos primeiramente ao processo de escorvação, isto é, três carregamentos e descarregamentos sucessivos até o limite de $0,3 f_c$, mantendo por 60 segundos e descarregar o corpo de prova até uma força zero. Em seguida, são anotadas as medidas de deformação sob a tensão maior.

Posteriormente, os corpos de prova de dimensão (10 x 20) cm e (15 x 30) cm foram carregados até a sua ruptura na idade de 28 dias, em 4 diferentes traços TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs, onde foram aplicadas as expressões conforme as Equações 4.11, 4.12 e 4.13.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} 10^{-3} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

$$E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

$$\alpha_i = 0,8 + \left(0,2 \times \frac{f_{ck}}{80}\right) \leq 1,0 \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Onde:

E_{ci} = módulo de elasticidade tangente inicial (GPa);

σ_a = tensão correspondente à deformação específica de 5×10^{-6} (MPa);

σ_b = tensão maior que corresponde à $0,3f_c$ (MPa);

ε_b = deformação específica média dos corpos de prova sob tensão de $0,3f_c$;

E_{cs} = módulo de elasticidade secante;

α_i = módulo de deformação tangente inicial.

A Figura 4.21 representa-se os corpos de prova no ensaio do módulo de elasticidade estático.

Figura 4.21 - Aparelho de módulo de elasticidade estático



Ensaio de Absorção de água por imersão

O ensaio para a determinação da absorção de água por imersão foi realizado conforme os procedimentos recomendados pela NBR 9778 (ABNT, 2009) e os parâmetros analisados foram a absorção total e o índice de vazios, utilizando as Equações 4.14 e 4.15 respectivamente, e estão associadas ao volume total de poros acessíveis a água.

$$A_a = \frac{(M_{sat} - M_s)}{M_s} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.14})$$

$$I_v = \frac{(M_{sat} - M_s)}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Onde:

A_a = absorção de água por imersão (%);

M_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

M_s = massa da amostra seca em estufa (g).

M_i = massa da amostra saturada imersa em água após a fervura (g);

I_v = índice de vazios;

O ensaio permite também a determinação da massa específica do concreto da matriz no estado endurecido. Para o cálculo da massa específica da amostra seca (ρ_s), massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}) e massa específica real (ρ_r), foram utilizadas, respectivamente, as Equações 4.16, 4.17 e 4.18.

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (\text{Eq. 4.16})$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_s}{M_s - M_i} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

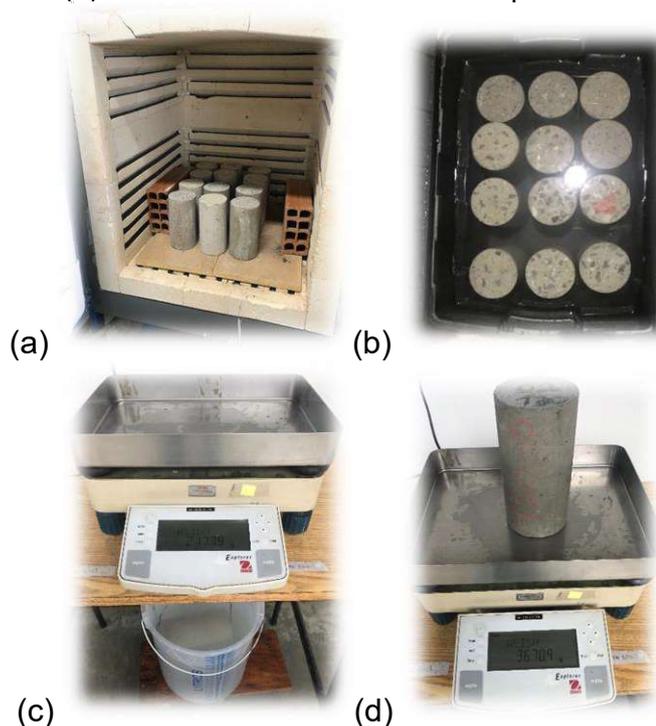
Aos 60 dias, 3 amostras para cada traço, totalizando 12 CP's foram retirados da câmara úmida e os corpos de prova foram secados em estufa por 72 horas a temperatura (105 ± 5) °C.

Os CP's foram resfriados a temperatura ambiente até que conseguisse colocar na balança e suas massas secas (m_s) determinadas. Posteriormente, em um recipiente cheio de água, os corpos de prova foram colocados durante 72 horas com um 1/3 do seu volume imerso nas primeiras 4 horas e 2/3 nas 4 horas, sendo completamente imersos nas 64 horas restantes, e conseqüentemente, medidas as massas saturadas.

Completada a etapa de saturação, os corpos de prova foram colocados em um recipiente com água e levado à ebulição durante 5 horas, mantendo aproximadamente constante o volume de água, como mostrado pela Figura 4.22.

Após completar o período de fervura, as amostras foram pesadas e as massas imersa (m_i) foram determinadas com auxílio da balança hidrostática. Logo após, os corpos de prova foram retirados da água, secos com pano úmido e determinadas as massas na condição saturada superfície seca (m_{sat}).

Figura 4.22 - Ensaio de absorção de água por imersão
(a) CP's na estufa; (b) CP's saturados; (c) CP imerso;
(d) Determinada a massa do CP após 72 h



Ensaio de Absorção de água por capilaridade

Os concretos produzidos em diferentes misturas foram avaliados quanto à absorção de água por ascensão capilar conforme prescrito na NBR 9779 (ABNT, 2012).

Para o ensaio, com idade de 60 dias, foram preparados 3 corpos de prova com dimensão (10 x 20) cm para todos os 4 traços de concreto, totalizando 12 corpos de prova. A massa ao ar do corpo de prova em temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ foi determinada e em seguida levados para estufa por 72 horas a temperatura $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

Os corpos de prova foram resfriados a temperatura ambiente e suas massas secas (M_s) foram obtidas. Em seguida, os 12 corpos de prova foram colocados em

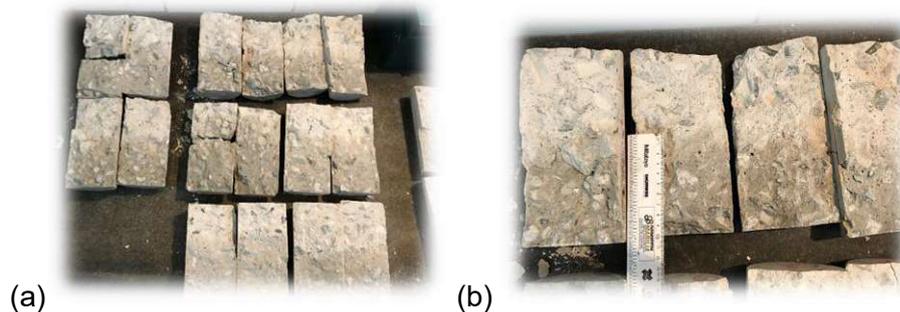
um recipiente com água nivelada, imersos em uma lâmina de água de (5 ± 1) mm acima da face inferior, e após a exposição das amostras na bandeja, as massas saturadas (M_{sat}) foram determinadas em 90min, 3h, 6h, 12h, 24h, 48h e 72h. A temperatura da lâmina d'água foi mantida constante, complementando sempre que necessário. Após 72 horas em contato com a água, é determinada a massa e ocorre o rompimento dos corpos de prova por compressão diametral, conforme ilustra a Figura 4.23.

Figura 4.23 - Ensaio de absorção de água por capilaridade
 (a) Corpos de prova durante o ensaio em recipiente com nível d'água;
 (b) Rompimento do corpo de prova por compressão diametral



Vale abordar que após o rompimento, permite observar a distribuição de água no seu interior, conforme ilustra a Figura 4.24.

Figura 4.24 - (a) Rompimento diametral e (b) medição das alturas de ascensão capilar



A absorção da água por capilaridade foi calculada conforme a Equação 4.18, para cada tempo de medição.

$$A_c = \frac{(M_{sat} - M_s)}{A_e} \quad (\text{Eq. 4.19})$$

Onde:

A_c = absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

M_{sat} = massa do corpo de prova que permanece saturado durante o período de tempo especificado (g);

M_s = massa do corpo de prova seco em estufa (g);

A_e = área da seção transversal do corpo de prova (cm^2).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados separadamente os resultados encontrados, sendo abordadas as características dos materiais, propriedades do concreto avaliadas pelos ensaios no estado fresco, no estado endurecido e suas características de durabilidade.

5.1 Caracterização dos Materiais

5.1.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo empregado neste estudo para a produção dos corpos de prova foi areia artificial de gnaiss (areia média) obtida por processo de britagem industrial.

Para a caracterização do agregado, foi realizado o ensaio de granulometria no laboratório ViaTest e a mesma empresa quando doou o material para a pesquisa forneceu os resultados do ensaio. A distribuição do tamanho das partículas está demonstrada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo

1. Peneiramento das Amostras:									
Peneiras	Abertura em (mm)	1ª Determinação		2ª Determinação		Média		Faixa Granulométrica NBR 7211:2009	
		Material Retido		Material Retido		Material Retido			
		Peso (g)	% Acum.	Peso (g)	% Acum.	Peso (g)	% Acum.		
4"	100								
3"	76								
2.1/2"	64								
2"	50								
1.1/2"	38								
1.1/4"	32	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0		
1"	25	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0		
3/4"	19	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0		
1/2"	12,5	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0		
3/8"	9,5	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0 - 0	
1/4"	6,3	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0 - 7	
4	4,8	0,61	0,1	0,08	0,1	0,35	0,1	0 - 10	
8	2,4	122,00	15,8	15,69	15,8	68,85	15,8	0 - 25	
16	1,2	165,00	37,0	21,22	37,0	93,11	37,0	5 - 50	
30	0,6	121,52	52,6	15,63	52,6	68,58	52,6	15 - 70	
50	0,3	112,34	67,1	14,45	67,1	63,40	67,1	50 - 95	
100	0,150	109,43	81,2	14,08	81,2	61,76	81,2	80 - 100	
200	0,075	66,41	89,7	8,54	89,7	37,48	89,7		
Fundo		80,13	0,2	10,31	100,0	11,50	50,1		
Total		777,44		100,00		438,72			

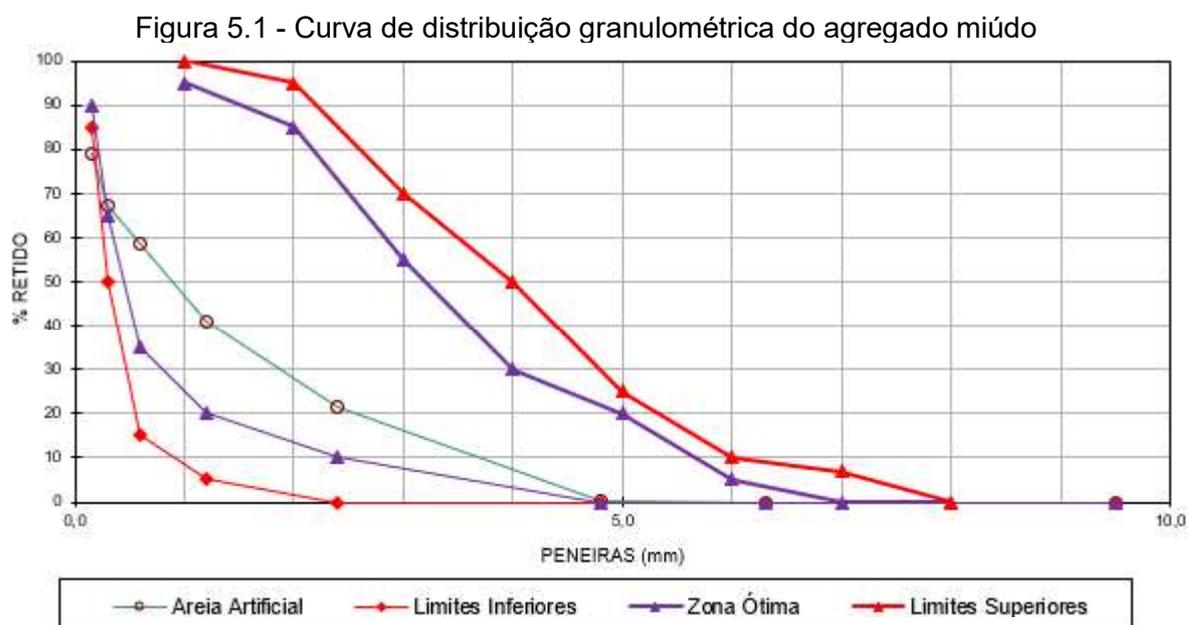
2. Dimensão Máxima Característica: **4,8 mm**

3. Módulo de Finura (MF): **2,54**

4. Zona (MF): ÓTIMA 2,20 a 2,90 - UTILIZÁVEL INFERIOR 1,55 A 2,20 - UTILIZÁVEL SUPERIOR 2,90 A 3,50

5. O material está sendo enquadrado na faixa de areia apenas para visualização de parâmetros

A Figura 5.1 demonstra-se o limite da composição de distribuição granulométrica através do peneiramento do agregado miúdo (areia média artificial), conforme representado pelo gráfico, de acordo com a NBR NM248 (ABNT, 2003).



Como apresentado na Tabela 5.1 e Tabela 5.2, a dimensão máxima da areia artificial é de 4,80 mm, possui módulo de finura de 2,54, de acordo com a NBR NM248 (ABNT, 2003), e as demais características encontram-se na Tabela 5.2, como a massa específica igual a 2,629 g/cm³, conforme NBR NM52 (ABNT, 2009).

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa atende aos requisitos exigidos na norma NBR 7211 (ABNT, 2009). A mesma norma estabelece 7,75 mm como a divisão entre agregados miúdos e agregados graúdos. Considerando agregados graúdos aqueles que ficam retidos na peneira nº 4, sendo maiores de 4,75 mm. Em relação aos agregados miúdos, as partículas contêm uma variação de 75 µm (peneira nº 200). Pode-se observar que a curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo está dentro da zona utilizável (zona ótima), de acordo com o gráfico representado na Figura 5.1.

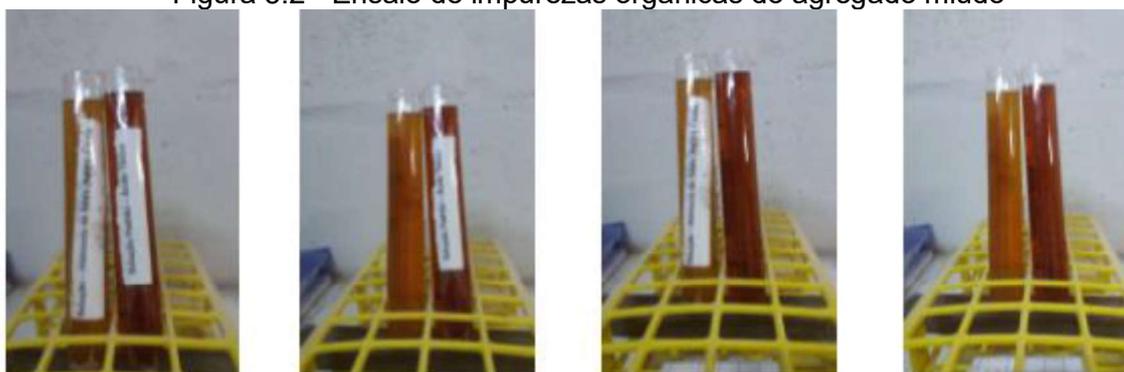
Mehta e Monteiro (2014) salientam que a massa específica pode ser classificada em leves, cuja massa unitária seja menor que 1.120 kg/m³, médios e pesados, os que pesam acima de 2.080 kg/m³.

Tabela 5.2 - Propriedades físicas do agregado miúdo

Características do agregado miúdo	Norma
Módulo de finura = 2,68	NBR 7211 (ABNT, 2009)
Dimensão máxima: 4,80 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa específica = 2,629 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa unitária seca = 1,54 kg/dm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa unitária úmida = 1,20 kg/dm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Peso do material úmido = 792,0 g	
Peso do material seco = 777,4 g	
Umidade do material = 1,87%	NBR 6467 (ABNT, 2009)
Material fino = 10,31%	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Impurezas orgânicas = <300ppm	NBR NM 49 (ABNT, 2001)
Absorção de água = 0,0	NBR NM 30 (ABNT, 2001)
Teor de argila em torrões = 0,20 %	NBR NM 7216 (ABNT, 2009)
Teor de material pulverulento = 4,90 %	NBR NM 7216 (ABNT, 2009)
Teor de umidade = 2,10 %	NBR NM 7211 (ABNT, 2009)
Massa úmida = 7,60 g	
Massa seca = 7,60 g	

Em determinação ao ensaio de impurezas orgânicas, conforme NBR NM49 (ABNT, 2001), verificou-se que a cor da mistura de hidróxido de sódio + areia artificial ficou mais clara do que a mistura ácido tânico + hidróxido de sódio, conforme demonstrado na Figura 5.2. Sendo assim, a areia artificial em análise não possui impurezas orgânicas.

Figura 5.2 - Ensaio de impurezas orgânicas do agregado miúdo



5.1.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado no concreto foi de origem de rochas basálticas da região metropolitana de Belo Horizonte/MG e não apresentou argilas na forma de torrões.

A fim de remover impurezas que pudessem influenciar nas propriedades do concreto, o agregado graúdo foi lavado com auxílio de uma peneira e depois seco ao ar e acondicionado em recipientes plásticos no laboratório.

As características físicas desse material foram executadas no Laboratório ViaTest, e a mesma empresa que doou o material, forneceu também os resultados do ensaio para a pesquisa. Os resultados estão relacionados na Tabela 5.3, conforme as normas NBR 7251 (ABNT, 1982), NBR NM26 (ABNT, 2001).

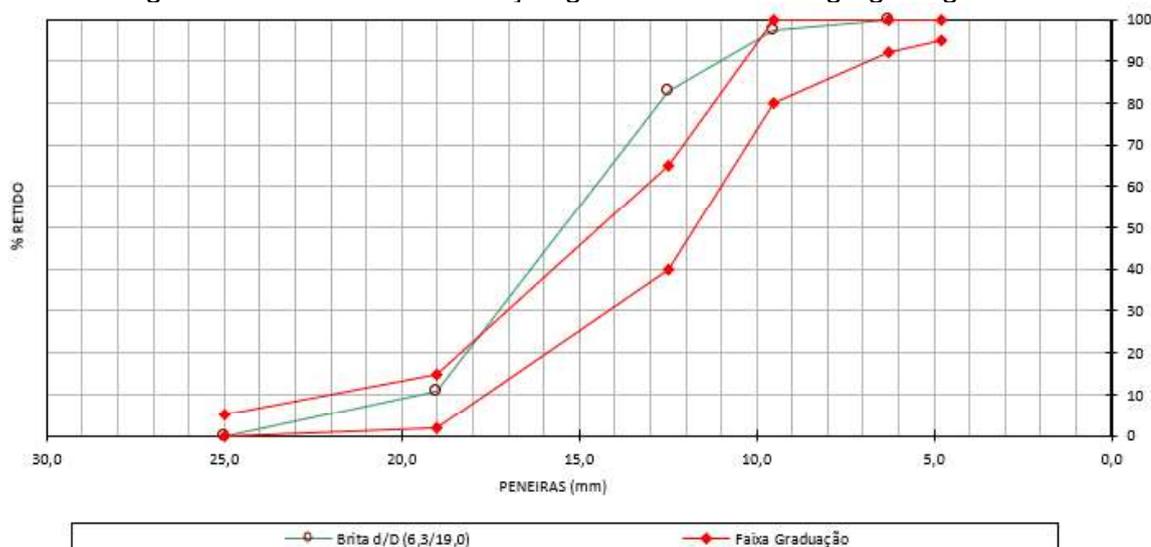
Tabela 5.3 - Determinação da composição granulométrica do agregado graúdo

1. Peneiramento das Amostras:		1ª Determinação		2ª Determinação		Média		Faixa Granulométrica Brita 1 - NBR 7211
Peneiras	Abertura em (mm)	Material Retido		Material Retido		Material Retido		
		Peso (g)	% Acum.	Peso (g)	% Acum.	Peso (g)	% Acum.	
4"	100							
3"	76							
2.1/2"	64							
2"	50							
1.1/2"	38							
1.1/4"	32	0,00		0,00		0,00	0,0	
1"	25	0,00		0,00		0,00	0,0	0_5
3/4"	19	642,00	10,6	659,00	10,8	650,50	10,7	2_15
1/2"	12,5	4404,00	83,0	4381,00	82,8	4392,50	82,9	40_65
3/8"	9,5	864,00	97,3	877,00	97,2	870,50	97,2	80_100
1/4"	6,3	156,00	99,8	160,00	99,8	158,00	99,8	92_100
4	4,8	0,00	99,8	0,00	99,8	0,00	99,8	95_100
8	2,4	0,00	99,8	0,00	99,8	0,00	99,8	
16	1,2	0,00	99,8	0,00	99,8	0,00	99,8	
30	0,6	0,00	99,8	0,00	99,8	0,00	99,8	
50	0,3	0,00	99,8	0,00	99,8	0,00	99,8	
100	0,150	0,00	99,8	0,00	99,8	0,00	99,8	
200	0,075	0,00	99,8	0,00	99,8	0,00	99,8	
Fundo		10,00	100,0	13,00	100,0	11,50	100,0	
Total		6076,00		6090,00		6083,00		
2. d/D:				6,3/25mm				
3. Dimensão Máxima Característica				12,5mm				

A distribuição granulométrica do agregado graúdo atendeu a norma NBR 7211 (ABNT, 2009) e NBR NM248 (ABNT, 2003), apresentando seus limites próximo da zona granulométrica 6,3/25mm.

A Figura 5.3 representa-se o gráfico da curva da distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Figura 5.3 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo



As principais características físicas do agregado graúdo podem ser vistas na Tabela 5.4, correspondendo a dimensão máxima igual a 19 mm, módulo de finura de 6,95 e massa específica de 2,62 g/cm³.

Tabela 5.4 - Propriedades físicas do agregado graúdo

Características do agregado graúdo	Norma
Módulo de finura = 6,95	NBR 7211 (ABNT, 2009)
Dimensão máxima: 19,00 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa específica = 2,62 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Massa unitária seca = 1,37	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa unitária úmida = 0,00	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa unitária média = 1,354 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Peso do material úmido = 1.538,9 g	
Peso do material seco = 1.537,9 g	
Umidade do material = 0,07%	NBR 9939 (ABNT, 2011)
Absorção de água = 0,0	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Material fino = 0,69%	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Impurezas orgânicas = 0,00	NBR NM 49 (ABNT, 2001)
Torrões de argila = sem presença	NBR NM 49 (ABNT, 2001)

5.1.3 Cimento Portland

O cimento utilizado na preparação dos concretos foi do tipo Portland de alta resistência inicial - CPV Ari fornecido da marca CAUÊ pela empresa InterCement.

As principais características físicas e químicas do cimento estão apresentadas na Tabela 5.5 e atendem às especificações contidas na NBR NM18 (ABNT, 2001), NBR NM23 (ABNT, 2017), NBR NM65 (ABNT, 2003), NBR NM76 (ABNT, 1998), NBR 9202 (ABNT, 1985), NBR 7215 (ABNT, 1997), NBR 16697 (ABNT, 2018), NBR 7215 (ABNT, 1997), com aplicação do ensaio pelo método Le Chatelier para determinação da massa específica absoluta realizado no laboratório ViaTest. As demais características foram fornecidas pelo fabricante InterCement.

Tabela 5.5 - Características do cimento CPV ARI da Marca CAUÊ - InterCement

Cimento CP V - ARI		
<u>Exigências Físicas e Mecânicas</u>		
Massa específica		3,09 g/cm ³
Área superficial específica - BET		1,450 m ² /g
Área específica - Blaine		4.906 cm ² /g
Finura	# 200	0,20%
	#325	2,20%
	D ₁₀	1,12 µm
Granulometria a laser	D ₅₀	9,74 µm
	D ₉₀	23,40 µm
	Início de pega	60 min
Fim de pega	196 min	
<u>Exigências Químicas</u>		
MgO (%)		0,80
SO ₃ Média		2,80
Perda ao fogo média (%)		3,00
Resíduo insolúvel (%)		-
<u>Resistência à compressão (MPa)</u>		
	<u>Média</u>	<u>Exigência</u>
1 dia	24,0	>=14
3 dias	37,1	>=24
7 dias	46,6	>=34

Na Tabela 5.6, encontram-se identificada a composição química do cimento, conforme NBR 14656 (ABNT, 2001) e NBR NM15 (ABNT, 2012), obtido através da fluorescência de raios X (FRX), fornecido pelo fabricante InterCement.

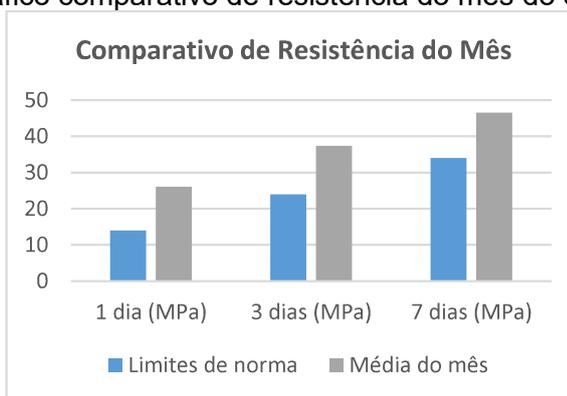
Tabela 5.6 - Composição química do Cimento Portland CPV ARI - InterCement

	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	Perda ao fogo (%)
CPV-ARI	19,08	63,51	1,37	5,79	3,11	0,80	2,68	0,08	3,56

De acordo com dados representados na Tabela 5.6, a composição química indica uma predominância de óxido de cálcio e óxido de silício, provenientes de rochas de mármore e granito, respectivamente.

A Figura 5.4 apresenta-se a comparação de resistência entre os limites das normas e ao mês da sua produção, do qual foi fornecido pela empresa que doou os sacos de cimento.

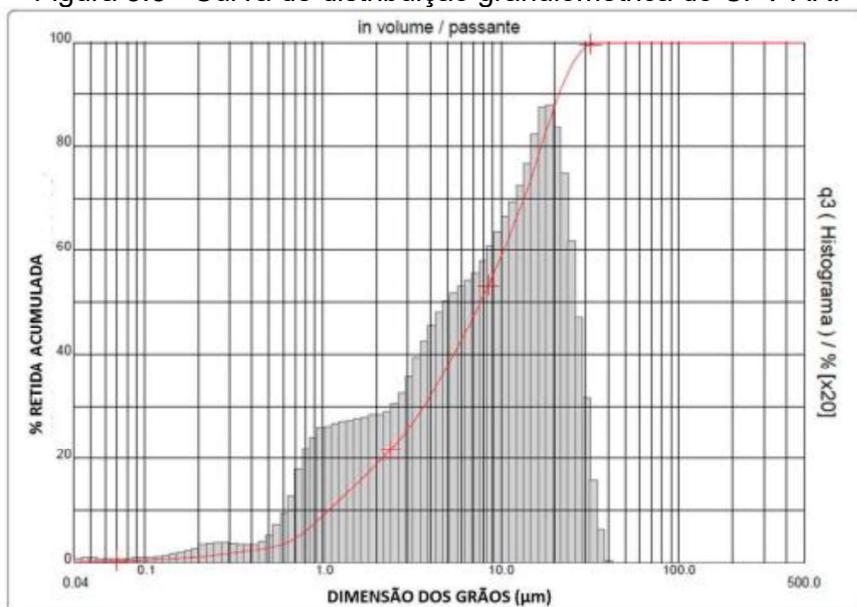
Figura 5.4 - Gráfico comparativo de resistência do mês do cimento CPV ARI



Fonte: Dados fornecidos pela Empresa InterCement, setembro/2018 - Adaptado

A curva de distribuição granulométrica do cimento, demonstrada na Figura 5.5, foi realizada no Laboratório de metalurgia da UFMG, através do equipamento de granulômetro a laser modelo 1064 da marca CILAS, utilizando o método de dispersão líquida e álcool isopropílico.

Figura 5.5 - Curva de distribuição granulométrica do CPV ARI



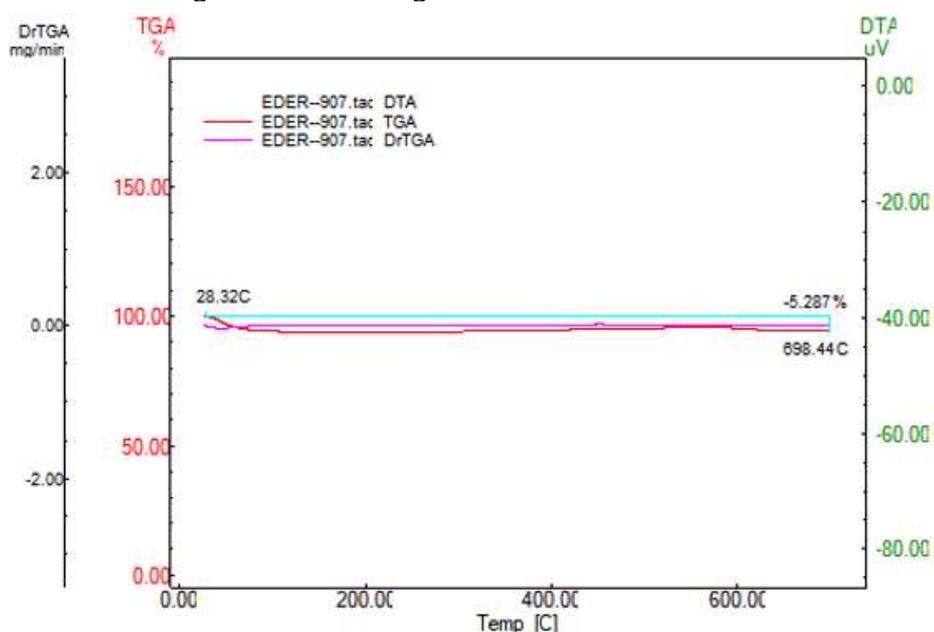
Verifica-se que a dimensão dos grãos do cimento apresenta valores D10 na ordem de 1,09 μm , D50 na faixa dos 9,28 μm e D90 com 22,47 μm , sendo o valor médio para tamanho dos grãos na ordem de 9,74 μm . Pode-se afirmar que 100% dos grãos de cimento apresentaram diâmetro abaixo de 36,00 μm .

A escolha do cimento CPV ARI foi determinante por buscar minimizar fatores que pudessem interferir no processo, assim procurou trabalhar com uma matriz cimentícia mais pura, pois um dos objetivos do trabalho era analisar a influência da incorporação do resíduo de lama de marmoraria nos concretos. Estudos como Dietrich *et al.* (2017) e Mittri *et al.* (2018) fizeram o uso do cimento para a análise do material a ser substituído e a influência do mesmo.

Baseado na Figura 5.6, o comportamento apresentado pelo termograma do cimento demonstra que a temperatura atingida nas análises foi insuficiente para decompor a estrutura do material.

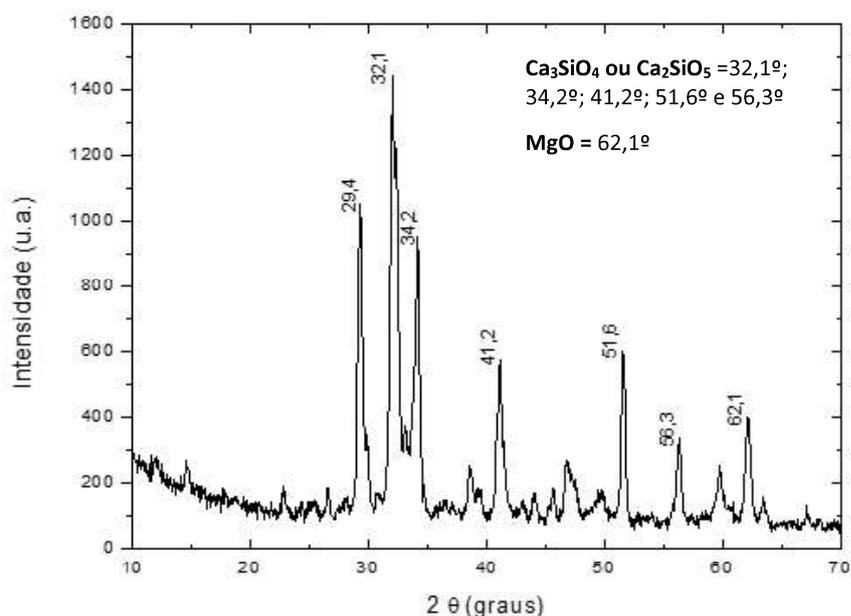
Todavia, o termograma referente a amostra de cimento apresentou perda de 5% em massa na faixa de temperatura de 100°C. Tal comportamento pode ser justificado pela ausência de tratamento térmico nesta amostra. O termograma foi obtido com o uso do equipamento Thermal Analyzer (Shimadzu DTG-60) utilizando atmosfera de N₂ (50 mL.min⁻¹) e com razão de aquecimento de 10°C.min⁻¹.

Figura 5.6 - Termograma do cimento CPV ARI



A Figura 5.7 corresponde ao gráfico de difratograma de raios X do cimento *Portland* CPV ARI, sendo obtido o resultado pelo equipamento X-ray diffractogram (Shimadzu) em tubo de Cu, voltagem 30,0 kV, corrente 30,0 mA, faixa de varredura entre 10° e 70° e velocidade de varredura 4°.min⁻¹.

Figura 5.7 - Difratograma de raios X do Cimento Portland CPV ARI



O cimento *Portland* CPV ARI apresenta picos característicos semelhantes aos definidos experimentalmente por Chatterji e Phatak (1965) em 32,1°; 34,2°; 41,2°; 51,6° e 56,3° os quais são típicos de amostras de silicatos usualmente presentes nos cimentos *Portland* (silicato tricálcico ou Ca₃SiO₄ e o silicato dicálcico ou Ca₂SiO₅), provenientes da formação de fases do clínquer do cimento. O pico em 62,1° é referente a presença de óxido de magnésio (MgO), outro componente tipicamente presente no cimento em questão, porém em menores proporções.

5.1.4 Caracterização do resíduo: Lama de marmoraria

A natureza do resíduo foi avaliada quanto a tipologia do material presente, pois se trata de uma lama com presença de pó fino de diferentes tipos de rochas, água e elementos abrasivos. Os tipos de rochas encontradas conforme

informações da empresa são granito, mármore, ardósia, pedra sabão, pedra são tomé, pedra lagoa santa, porcelanato, cerâmica, etc.

Observa-se uma diversidade de materiais diante da heterogeneidade do resíduo, tornando os resultados encontrados neste trabalho mais amplo, propondo avaliar a influência da lama de marmoraria no desempenho da produção dos concretos em substituição parcial do peso do cimento pelo resíduo em pó.

5.1.4.1 Análise física

Massa específica

O ensaio para caracterizar a massa específica foi realizado pelo método do uso do frasco de Le Chatelier, conforme a norma ABIFA CEMP 137 (2015), aplicando o método do uso do frasco de Le Chatelier. A densidade foi determinada por meio do equipamento Auto density.

A massa específica resultou em $2,62 \text{ g/m}^3$ para a amostra do resíduo, assim como a massa específica do cimento CPV Ari, conforme descrito na Tabela 4, resultou em $3,09 \text{ g/cm}^3$. A densidade resultou em $2,74 \text{ g/cm}^3$. Esses resultados corroboram com dados bem próximos encontrados nos estudos de Rana *et al.*, (2015); Singh *et al.*, (2017) e Uliana *et al.*, (2015).

Neville (2015) retrata que a massa específica do granito varia de $2,6 \text{ g/cm}^3$ a $3,0 \text{ g/cm}^3$, do calcário de $2,5 \text{ g/cm}^3$ a $2,8 \text{ g/cm}^3$ (MÁRMOL *et al.*, 2010).

Sánchez (2009) apresenta a densidade relativa aparente do silestone em torno de $2,38 \text{ g/cm}^3$. No trabalho de Melo (2016), os resultados apontaram que a massa específica da lama de marmoraria indicou um valor mínimo de $2,67 \text{ g/cm}^3$ e máximo de $2,79 \text{ g/cm}^3$. Observa-se assim que os resíduos são mais leves que o cimento.

Análise granulométrica

As características físicas desse material foram executadas no laboratório e a distribuição granulométrica do resíduo da lama de marmoraria atendeu as normas e os resultados estão relacionados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Determinação da composição granulométrica do resíduo (lama de marmoraria)

PENEIRA	Abertura em (mm)	Massa (g)	% Retida	% Acumulada	% Passante
30	600	0,3	0,8219178	0,821917808	99,17808219
50	300	0,4	1,0958904	1,917808219	98,08219178
70	212	0,5	1,369863	3,287671233	96,71232877
100	150	0,8	2,1917808	5,479452055	94,52054795
140	106	1,6	4,3835616	9,863013699	90,1369863
200	75	2,2	6,0273973	15,89041096	84,10958904
270	53	12,2	33,424658	49,31506849	50,68493151
325	45	9,4	25,753425	75,06849315	24,93150685
400	38	9,1	24,931507	100	0
FUNDO		0	0	100	0
	Total	36,5	100		

O gráfico representado na Figura 5.8, mostra o limite da distribuição granulométrica através do peneiramento do resíduo da lama de marmoraria e diante da análise, observa-se a curva de distribuição granulométrica do resíduo abaixo dos limites inferiores. Observa-se por um outro ponto de vista, na Figura 5.9, a curva de distribuição granulométrica do resíduo da lama de marmoraria por apresentar um material bastante fino.

Figura 5.8 - Curva de distribuição granulométrica do resíduo da lama de marmoraria

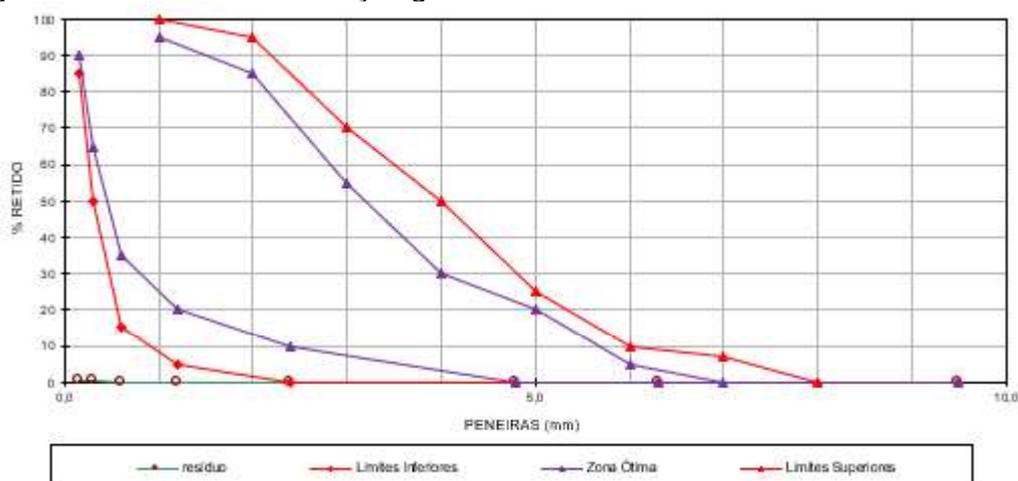
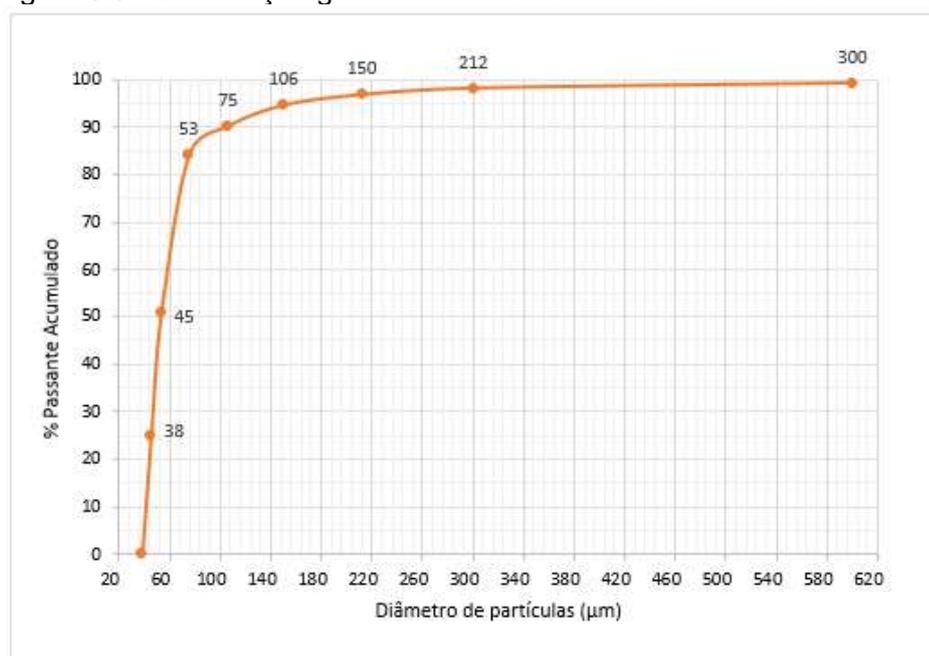


Figura 5.9 - Distribuição granulométrica do resíduo de lama de marmoraria



As principais características físicas da lama de marmoraria estão identificadas na Tabela 5.8, apresentando seus limites próximo da zona granulométrica de 0,53 mm a 0,038 mm (peneira nº400), estabelecendo uma dimensão máxima igual a 0,30 mm e massa específica de 2,62 g/cm³ de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017), material retido na peneira nº 270 de 33,42%, segundo a NBR 11579 (ABNT, 2013) e os demais dados foram obtidos baseados nas normas especificadas.

Tabela 5.8 - Características física do resíduo (lama de marmoraria)

Características do resíduo de lama de marmoraria	Norma
Dimensão máxima: 0,30 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa específica = 2,62 g/cm ³	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Massa unitária = 766,284 g/m ³	NBR 12127 (ABNT, 2017)
Teor de umidade inicial = 33,26 %	NBR NM 24 (ABNT, 2002)
Material retido na peneira nº 200 = 6,02 %	NBR 11579 (ABNT, 2013)
Material retido na peneira nº 270 = 33,42 %	NBR 9202 (ABNT, 1985)
Material retido na peneira nº 325 = 25,75 %	NBR 9202 (ABNT, 1985)
Material retido na peneira nº 400 = 24,93 %	NBR 9202 (ABNT, 1985)
Área específica pelo método de blaine = 5,987 m ² /g	NBR 16372 (ABNT, 2015)

Dietrich (2015); Uliana *et al.* (2015) mencionam em seus estudos que a área específica do beneficiamento de rochas ornamentais é de 6.1793 m²/g, sendo maior que a área do cimento CPV ARI de 4.459 m²/g, o que indica que o resíduo possui

partículas mais finas do que as do cimento (SINGH *et al.*, 2019). Fatos semelhantes ocorreram neste estudo, onde a área específica da lama de marmoraria resultou em 5.987 m²/kg comparado com a área do cimento de 4.906 m²/g, conforme especificado neste trabalho na Tabela 5.5.

Análise de distribuição de tamanho de partículas por espalhamento dinâmico de luz (Granulometria a laser)

Os resultados de análise de distribuição de tamanho de partículas por espalhamento dinâmico de luz (granulometria a laser) apresentaram os diâmetros D10, D50, D90, e o D_{médio} referenciando respectivamente, 10%, 50% e 90% e o total da massa do material analisado possuem partículas com diâmetros inferiores dos valores indicados na Tabela 5.9. A curva de distribuição granulométrica é apresentada pela Figura 5.10.

Tabela 5.9 - Diâmetros da amostra do resíduo da lama de marmoraria (em pó)

Amostra	D ₁₀ μm	D ₅₀ μm	D ₉₀ μm	D _{médio} μm
Lama de marmoraria	1,05	6,40	20,17	8,80

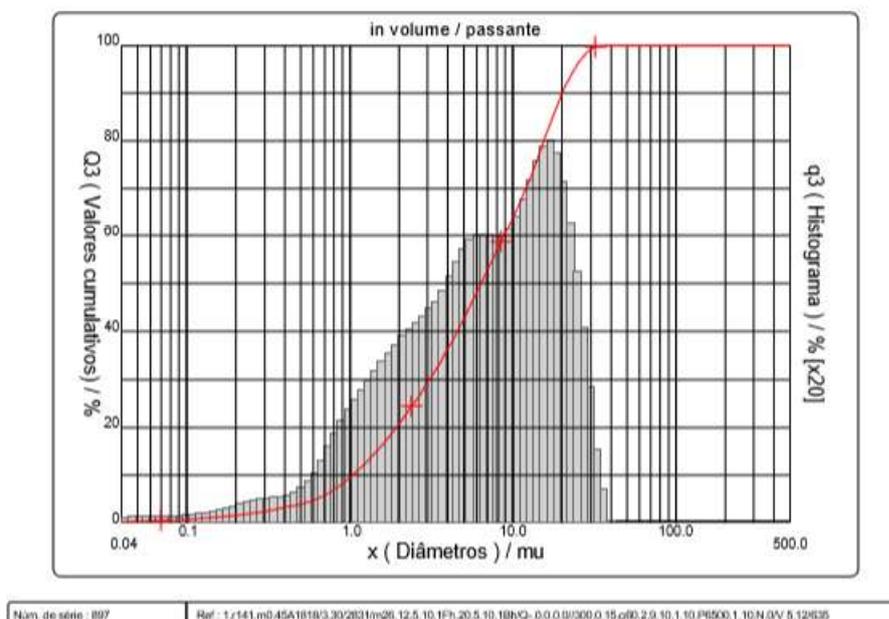
Baseado nos resultados, o material mostrou ser bastante fino, apresentando uma larga distribuição de tamanho de partículas acima de 20 μm, sendo que 90% da massa total da amostra possui partículas com diâmetros inferiores na ordem de 20,17 μm, e com 50% da amostra possuindo partículas inferiores a 6,40 μm e com 10% da amostra possuindo partículas inferiores a 1,05 μm, estabelecendo um D_{médio} na ordem de 8,80 μm, sendo possível preencher a zona de transição, que mede entre 10 μm e 50 μm (MEHTA e MONTEIRO, 2014), com isso o material age como um fíler. Ensaio como estes apresentam similaridades nos trabalhos de (DIETRICH *et al.*, 2017; MITTRI *et al.*, 2018; RANA *et al.*, 2016).

As dimensões das partículas do resíduo possuem uma granulometria similar à do cimento utilizado nos concretos, que possui D50 na ordem de 9,74 μm, conforme demonstrado na Tabela 5.5.

Mittri *et al.* (2018) informa que o cimento tem uma distribuição mais uniforme comparado com o resíduo de rochas ornamentais que possui uma distribuição mais

contínua. Esta distribuição contínua pode contribuir para uma compactação melhor e preenchimento de poros da matriz cimentícia quando adicionado o resíduo.

Figura 5.10 - Curva da distribuição granulométrica do resíduo



Pode-se observar, baseado na Figura 5.10, que a curva de distribuição granulométrica do resíduo apresenta uma variação no tamanho das partículas, principalmente, entre 0,40 e 80 μ m, com uma distribuição bem uniforme dessas partículas.

De acordo com Gonçalves (2000) a adição do resíduo como efeito fíler, possui um diâmetro médio menor que 50 μ m, atuando no preenchimento dos poros em razão da hidratação do cimento. O mesmo autor e Dietrich (2015) acreditam que o resíduo de rochas ornamentais por ser um material pulverulento e mais fino que o cimento, pode ocorrer efeito fíler em matrizes cimentícias.

Gonçalves (2000) destaca ainda que o agregado fino usualmente com diâmetro médio entre 50 e 150 μ m tem a função de preencher os vazios onde o agregado miúdo não penetrou.

Portanto, este resíduo em forma de pó apresenta partículas com morfologia irregular de formato angular, possuindo uma estrutura morfológica que provém do beneficiamento de rochas ornamentais, que passa pelo processo do corte e polimento das placas. Neste fragmento encontram presentes quartzo e feldspatos.

5.1.4.2 Análise química

Fluorescência de raios X (FRX)

Os resultados da análise semiquantitativa do resíduo da lama de marmoraria por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) são mostrados na Tabela 5.10, apresentando elementos presentes como:

Tabela 5.10 - Análise química semiquantitativa da amostra via fluorescência de raios X

Ocorrência	Elemento
Alta	Si, O
Média	Al, Fe, Ca, K, Mg, Na
Baixa	Ti, Cr, Mn, P, S
Traço	Cl, Ni, Cu, Zn, Sr

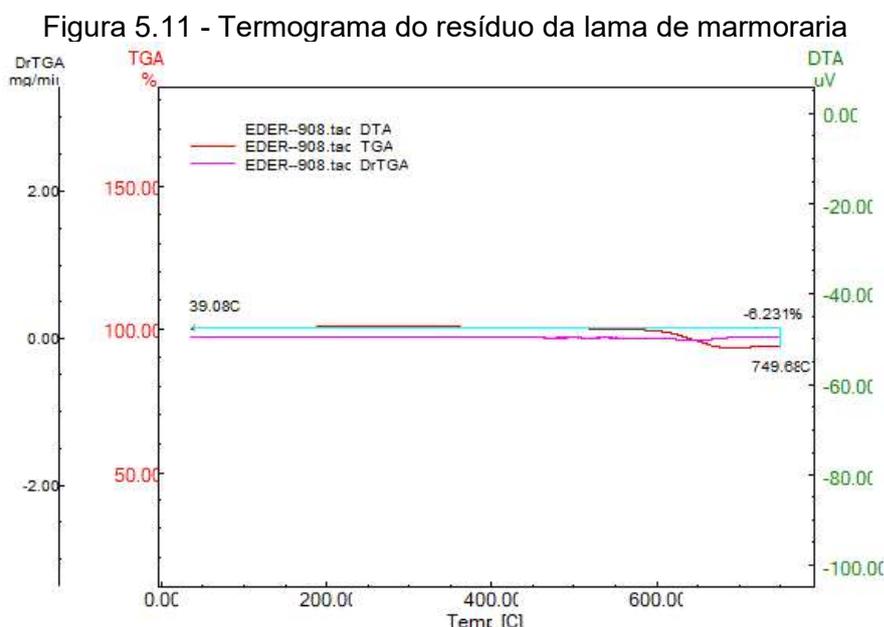
Os resultados do resíduo da lama de marmoraria nos trabalhos de Dietrich *et al.* (2017); Marcon (2015); Singh *et al.* (2019) apresentam composições predominantemente de quartzo sílica (SiO_2) e feldspato alumina (Al_2O_3), considerando assim, um material sílico-aluminoso. Presença de ferro são encontradas, oriundo da granalha e fragmentos de lâmina.

5.1.4.3 Análise termogravimétrica (TGA)

Os resultados do ensaio de TGA é apresentado na Figura 5.11, através do termograma, sendo usado o equipamento Thermal Analyzer (Shimadzu DTG-60) utilizando atmosfera de N_2 ($50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) e com razão de aquecimento de $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$.

A lama de marmoraria foi tratada termicamente em estufa durante 24 horas na temperatura de $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ e após o tratamento térmico, o resíduo passou pelo procedimento do “destorroamento manual”, ou seja, desagregação do resíduo, para a preparação da mistura do concreto.

O comportamento apresentado pelos termogramas tanto do cimento quanto do resíduo demonstra que a temperatura atingida nas análises foi insuficiente para decompor a estrutura do material.



Porém, é possível verificar que o tratamento térmico ao qual o resíduo foi submetido apresentou resultados satisfatórios, pois não há nenhum registro de perda de massa na faixa de temperatura de 100 °C, o que significaria a eliminação de umidade.

Como não foram observados nos termogramas obtidos por TGA eventos de perda de massa entre aproximadamente 150 e 400 graus, pode-se afirmar que as amostras em análise não apresentam matéria orgânica. No caso da presença desses contaminantes essa seria a faixa esperada de degradação e oxidação dos mesmos.

5.1.4.4 Análise mineralógica

Difração de raios X (DRX)

O ensaio de difração de raios X consiste no método analítico que propicia analisar qualitativamente as fases cristalinas da amostra do resíduo da lama de marmoraria em pó.

Nas Figuras 5.12 e 5.13 apresentam-se os difratogramas de raios X do resíduo da lama de marmoraria (em pó), onde foram coletadas duas amostras de resíduos em períodos distintos, sendo em março e outubro do ano de 2018, do qual foram obtidos os difratogramas através do equipamento X-ray diffractogram (Shimadzu) em tubo de Cu, voltagem 30,0 kV, corrente 30,0 mA, faixa de varredura entre 10° e 70° e velocidade de varredura 4°.min⁻¹.

Figura 5.12 - Difratograma de raios X do resíduo de lama de marmoraria coletado no primeiro semestre do ano de 2018

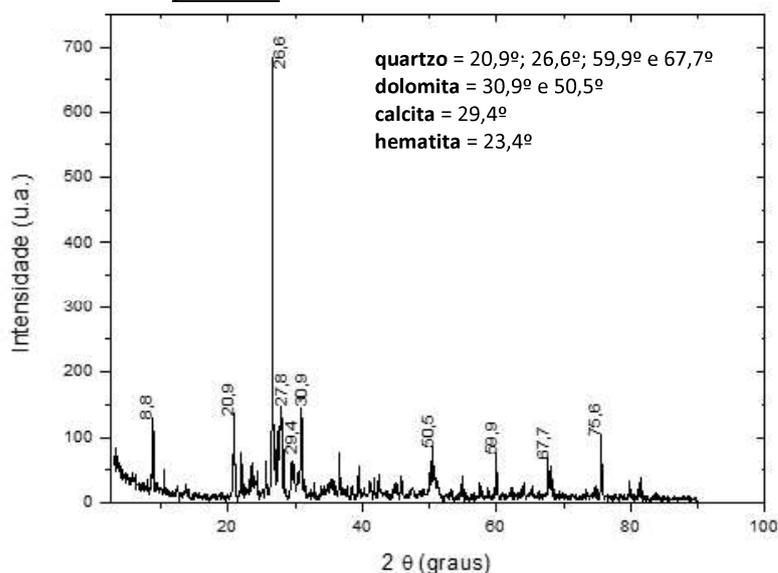
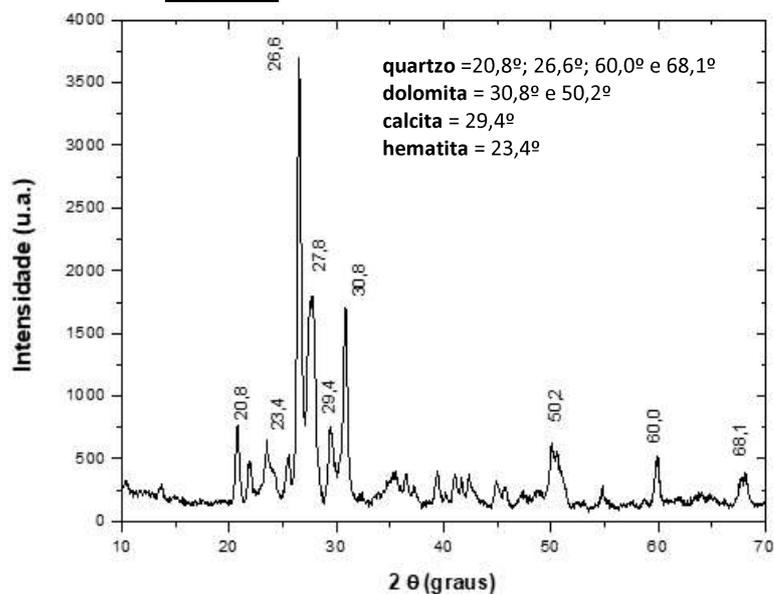


Figura 5.13 - Difratograma de raios X do resíduo de lama de marmoraria coletado no segundo semestre do ano de 2018



Nota-se uma similaridade nos difratogramas. A lama de marmoraria, um resíduo desidratado e sólido coletado no primeiro semestre de 2018 (Figura 5.12) e após passar por um tratamento térmico apresentam picos bem definidos de quartzo nos ângulos 20,9°; 26,6°; 59,9° e 67,7°.

A Figura 5.13, referente ao segundo semestre, apresenta também picos bem definidos de quartzo nos ângulos 20,8°; 26,6°; 60,0° e 68,1°. Tais picos são bem descritos na literatura e estão presentes nos difratogramas de silicatos provenientes de ardósias (CRUZ; GALAN, 2007), granitos (SINGH *et al.*, 2016) e feldspatos (BLATT *et al.*, 2005) os quais são rochas ornamentais comumente utilizadas em uma marmoraria, comprovando a presença dos elementos principais de rochas metamórficas do tipo gnaiss que são ricas em quartzo e feldspatos no material.

Já o pico em 23,4° determina a presença de hematita no resíduo, a qual provavelmente provém dos abrasivos utilizados no corte das rochas da marmoraria (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993). Mármol *et al.* (2010) ressaltam que o ferro contido no resíduo é provindo da própria rocha, porém os diferentes tipos de máquinas de corte do processamento podem ser responsáveis pelo teor de ferro também (BASTOS, 2014).

Os picos presentes nos difratogramas em 29,4° são característicos da presença de calcita (CaCO_3) (VEIGA; GASTALDINI, 2012), que tem relevante abundância no mármore e também na composição do CPV ARI.

Por outro lado, por apresentar similaridade, a Figura 5.12 demonstra-se picos em 30,9° e 50,5° e a Figura 5.13 demonstra-se picos em 30,8° e 50,2° 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) que é um constituinte abundante em rochas de mármore.

Segundo Vazzoler *et al.* (2018), um halo entre os ângulos 15° e 40° é característico de fases com baixa cristalinidade que podem estar presentes no resíduo após tratamentos térmicos específicos.

No entanto, o resíduo apresenta picos bem definidos, o que ocorreu provavelmente devido à baixa temperatura do tratamento térmico que o resíduo foi submetido (100 ± 5) °C em estufa, não sendo formadas fases com baixa cristalinidade. Como observado também nos termogramas obtidos por TGA, essa

temperatura utilizada não foi capaz de diminuir a organização cristalina do material pela formação de novas fases, mas somente eliminar a água presente no resíduo.

5.1.4.5 Análise de pozolanicidade

Para a característica de pozolanicidade, o ensaio do método do Chapelle Modificado foi utilizado e a norma brasileira não estabelece um valor como parâmetro de medida para classificar a atividade pozolânica. O ensaio mostrou que houve um elevado teor de cálcio após um período de reações no qual aconteceu uma alcalinidade bastante alta.

A Tabela 5.11 apresenta o resultado do índice de pozolanicidade conforme a norma brasileira NBR 15985 (ABNT, 2010) e a norma francesa NF (P18-513, 2010) muitas vezes citada na literatura.

Tabela 5.11 - Resultados do ensaio de pozolanicidade

Material	Volume de HCl consumido na titulação (ml)		Fator de correção do HCl (Fc)	Índice de pozolanicidade			
	Amostra	Branco		NBR 15895:2010		Norma francesa NF P18-513	
				Ca(OH) ₂ fixado (mg/g)	CaO fixado (mg/g)	Ca(OH) ₂ fixado (mg/g)	CaO fixado (mg/g)
Lama de marmoraria	57,6	67,2	0,98	347,4	263	377,6	286,0

Os resultados obtidos pelo ensaio realizado demonstram valor inferior a 347,4 mg e 377,6 mg para o hidróxido de cálcio fixado pela norma brasileira e francesa, respectivamente, o que constata uma característica não favorável à atividade pozolânica. Melo (2016) apresentou em sua pesquisa valores inferiores a 330 mg para o hidróxido de cálcio fixado para as amostras de lama de marmoraria.

Nos estudos de Almeida *et al.* (2007); Bacarji *et al.* (2013); Ural *et al.* (2014); Vazzoler *et al.* (2018) o resíduo do processo de rochas ornamentais não apresenta características pozolânicas se usado em base de cimento. E para Alves (2008), pode ser utilizado como efeito fíler ou material cimentante.

Gonçalves (2000) verificou que os resíduos de rochas ornamentais não apresentaram propriedades pozolânicas, entretanto, com a adição do resíduo

obteve um melhor desempenho no concreto, aumentando sua resistência à compressão e à tração com a ação do efeito fíler. Por outro ponto de vista, a caracterização dos resíduos tratados de rochas ornamentais termicamente apresentou atividade pozolânica e a adição de 5% e 10% deste resíduo nas misturas do concreto proporcionou aumento na resistência à compressão e redução da penetração de íons cloreto (MITTRI *et al.*, 2018).

5.2 Avaliação da Propriedade do Concreto no Estado Fresco

Neste subcapítulo é apresentado, observado e discutido os resultados obtidos através do ensaio proposto no plano experimental do concreto no estado fresco.

5.2.1 Trabalhabilidade

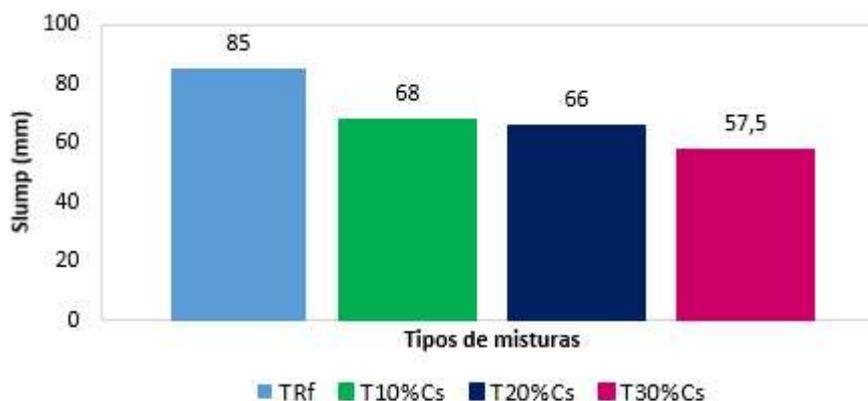
As propriedades do concreto fresco foram avaliadas pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). O concreto no estado fresco foi avaliado quanto a sua consistência por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, obtendo concretos com trabalhabilidade diferenciada e com valores de *slump* considerados adequados para o trabalho realizado.

A influência do resíduo da lama de marmoraria na trabalhabilidade do concreto pode ser vista na Tabela 5.12 e Figura 5.14. Pode-se dizer que a demanda de água para se obter a consistência normal é a mesma para todas as dosagens com relação água/cimento de 0,53.

Tabela 5.12 - Valores do ensaio de abatimento do concreto no estado fresco

Descrição	Nomenclatura na pesquisa	Slump (mm)
Referência	TRf	85
Substituição de 10% do cimento	T10%Cs	68
Substituição de 20% do cimento	T20%Cs	66
Substituição de 30% do cimento	T30%Cs	57,5

Figura 5.14 - Resultados de abatimento do concreto (*slump test*) no estado fresco



Os resultados do ensaio de avaliação de consistência demonstram que mantendo o fator de relação a/c em 53% para os resultados do teste de *slump* dentro dos limites estabelecidos (100 ± 20) mm, as consistências dos concretos produzidos com resíduo não permanecem dentro do intervalo pré-estabelecido na etapa da dosagem e a variabilidade apresenta muito baixa para a característica da trabalhabilidade.

Constata-se que os concretos que contém resíduo de lama de marmoraria apresentam abatimentos menores do que o concreto de referência com mesma relação água/cimento. O valor de *slump* do concreto fresco foi medido usando cone de abate. Pode ser notado pelos resultados de abatimento de tronco de cone uma tendência de perda de abatimento à medida que o percentual do resíduo é incorporado.

Para os corpos de prova T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs, as reduções são apresentadas em torno de 20%, 22% e 32% respectivamente, comparado com o traço de referência para uma mesma relação a/c .

Para todas as misturas, a trabalhabilidade do concreto diminui a medida que aumenta o percentual da taxa de substituição parcial do peso do cimento pelo resíduo da lama de marmoraria, entretanto, os concretos que não conseguiram atingir o abatimento esperado proporcionaram uma consistência menos fluida, aspecto coeso e um efeito insignificante na variação da trabalhabilidade entre as misturas realizadas, apesar disso apresentou apropriado para as moldagens dos corpos de prova (10 x 20) cm e (15 x 30) cm.

Porém, no corpo de prova que contém 30% do resíduo em substituição ao cimento (T30%Cs) comparado com as demais misturas, apresenta uma tendência de perda de abatimento, menor consistência, demonstrando uma massa mais seca, menos fluida, obtendo uma pequena dificuldade na trabalhabilidade.

O motivo da redução da trabalhabilidade é o alto percentual de partículas finas presentes no resíduo da lama de marmoraria que tendem a aumentar a necessidade de água na mistura do concreto para fornecer uma trabalhabilidade necessária, para tornar igualmente viável em comparação com o concreto de referência. Ocorrências similares aconteceram nas pesquisas de Alzboon; Mahasneh (2009); Alves (2008); Dietrich *et al.* (2017); Pedroso (2017) e Singh *et al.*, (2017) a medida que percentuais de resíduos são adicionados.

Aliabdo *et al.* (2014); Khodabakhshian *et al.* (2018a); Kou *et al.* (2011); Mittri *et al.* (2018); Rana *et al.* (2016); Rodrigues *et al.* (2015); Singh *et al.* (2017) e Vijayalakshmi *et al.* (2013) compartilham conclusões semelhantes em seus estudos e salientam que uma superfície elevada de finos demanda uma quantidade maior de água para que a consistência do concreto fresco seja mantida. Outros estudos mostraram que incorporar o resíduo em misturas de concreto melhoraram a trabalhabilidade.

Embora, a trabalhabilidade do concreto tenha diminuído progressivamente na dosagem T30%Cs, uma forma de correção é a quantidade de água ou aditivo para facilitar na hora da moldagem e apresentar uma massa menos seca comparada com as demais misturas. Pode-se dizer também, que mesmo a trabalhabilidade do concreto ter sido reduzida, este pode ser usado em peças sem fins estruturais.

5.3 Avaliação das Propriedades Mecânicas e Físicas dos Concretos no Estado Endurecido

Neste presente subcapítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos em relação aos ensaios propostos no plano experimental de propriedades mecânicas e físicas dos concretos no estado endurecido.

5.3.1 Resistência à compressão axial

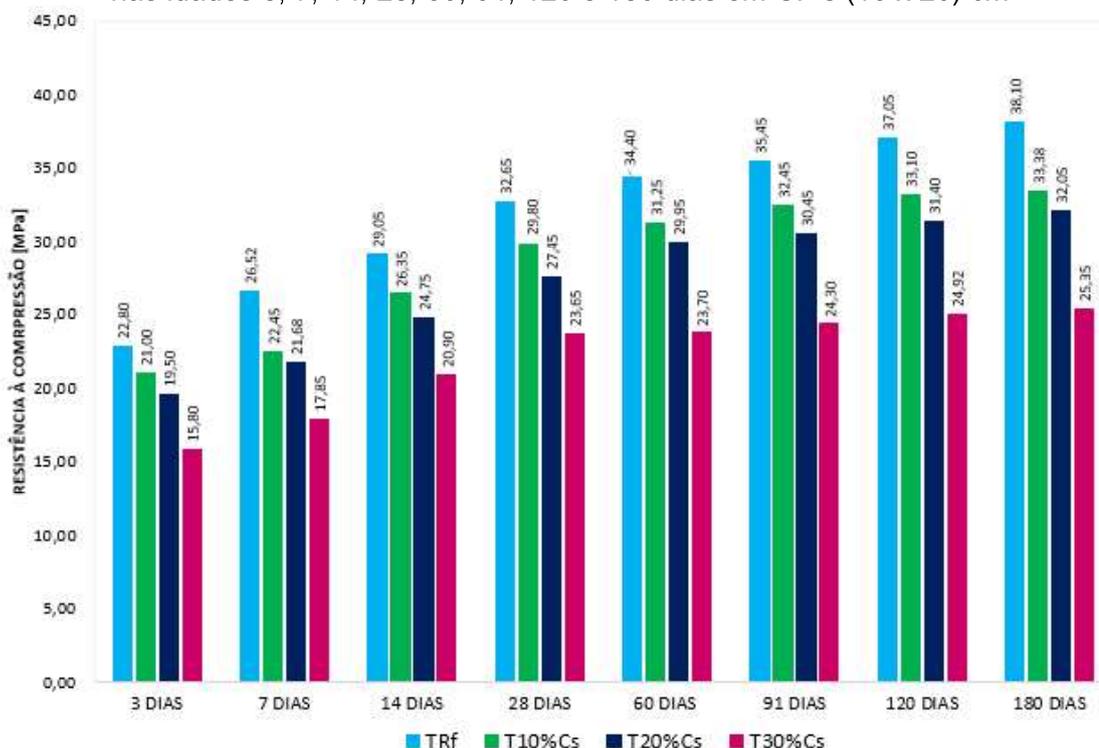
Na Tabela 5.13 apresenta-se os resultados do ensaio de resistência à compressão axial realizado nas 96 amostras de dimensões (10 x 20) cm de concreto para as 4 relações de misturas, ou seja, TRf (concreto de referência) e T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs (substituição do cimento pelo resíduo). Os resultados médio obtidos foram realizados nas idades 3, 7, 14, 28, 60, 91, 120 e 180 dias e rompidos três corpos de prova de cada idade em relação a mistura.

Tabela 5.13 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial

Nomenclatura	3 DIAS [MPa]	7 DIAS [MPa]	14 DIAS [MPa]	28 DIAS [MPa]	60 DIAS [MPa]	91 DIAS [MPa]	120 DIAS [MPa]	180 DIAS [MPa]
TRf	22,80	26,52	29,05	32,65	34,40	35,45	37,05	38,10
T10%Cs	21,00	22,45	26,35	29,80	31,25	32,45	33,10	33,38
T20%Cs	19,50	21,68	24,75	27,45	29,95	30,45	31,40	32,05
T30%Cs	15,80	17,85	20,90	23,65	23,70	24,30	24,92	25,35

O gráfico apresentado na Figura 5.15, demonstra-se os valores médio de resistência à compressão obtido em três amostras de cada traço nas idades 3, 7, 14, 28, 60, 91, 120 e 180 dias em corpos de prova com dimensão (10 x 20) cm.

Figura 5.15 - Resultados médio do ensaio de resistência à compressão axial nas idades 3, 7, 14, 28, 60, 91, 120 e 180 dias em CP's (10 x 20) cm



Conforme observado na Figura 5.15, à medida que aumenta a idade de cura das amostras de concreto, a resistência à compressão aumenta e apresenta uma tendência similar. Por outro lado, apresenta uma queda nos valores de resistência à compressão com o aumento do teor de porcentagem do resíduo da lama de marmoraria na mistura. Ressalta também que ao longo do tempo, a perda de resistência à compressão não aumenta consideravelmente.

Considerando o resíduo da lama de marmoraria na produção do concreto em 10%, 20% e 30% de substituição parcial do peso do cimento, a resistência diminui em cada idade ao longo do período do ensaio à medida que aumenta a porcentagem de substituição comparado com o concreto de referência (sem resíduo). Pode-se dizer que a dosagem T10%Cs apresenta maior resistência à compressão em todas as idades comparado com as dosagens T20%Cs e T30%Cs, no entanto, a mistura com teor de 20% apresenta um resultado próximo a mistura de 10%.

No que refere a idade de 28 dias, o uso do resíduo da lama de marmoraria em pó contribui para a redução da resistência à compressão a medida que o percentual de resíduo aumenta, sendo substituído pela quantidade do cimento. Todavia, este resíduo da lama de marmoraria recolhido no tanque da empresa é formado por diferentes tipos de rochas e apresenta um ganho de resistência acima de 25 MPa aos 28 dias para as misturas com teores de 10% e 20%.

Os resultados médios obtidos aos 28 dias para os corpos de prova T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs apresentam uma queda de resistência aproximadamente de 9%, 16% e 28% respectivamente, comparado ao concreto de referência, entretanto há um ganho de 30% a 33% entre as idades 3 e 28 dias. Entre as idades 28 e 180 dias, os mesmos traços apresentam um ganho, porém menor, de 7% a 14%, atingindo uma resistência de 33,38 MPa, 32,05 MPa e 25,35 MPa aos 180 dias.

Observa-se que a resistência média na idade de 3 dias, obtidas através das amostras com incorporação do resíduo da lama apresenta o valor mínimo de 15,80 MPa, e o valor máximo 21,00 MPa, enquanto o concreto de referência apresenta o valor de 22,80 MPa. Para a idade de 28 dias, as amostras com resíduos registram o valor mínimo de 23,65 MPa e máximo de 29,80 MPa, enquanto que o concreto de referência registra 32,65 MPa. Para a idade de 180 dias, as dosagens com

resíduos registram o valor mínimo de 25,35 MPa e máximo de 33,38 MPa, enquanto que o concreto de referência registra 38,10 MPa.

Resistência à compressão em corpos de prova de dimensão (15 x 30) cm

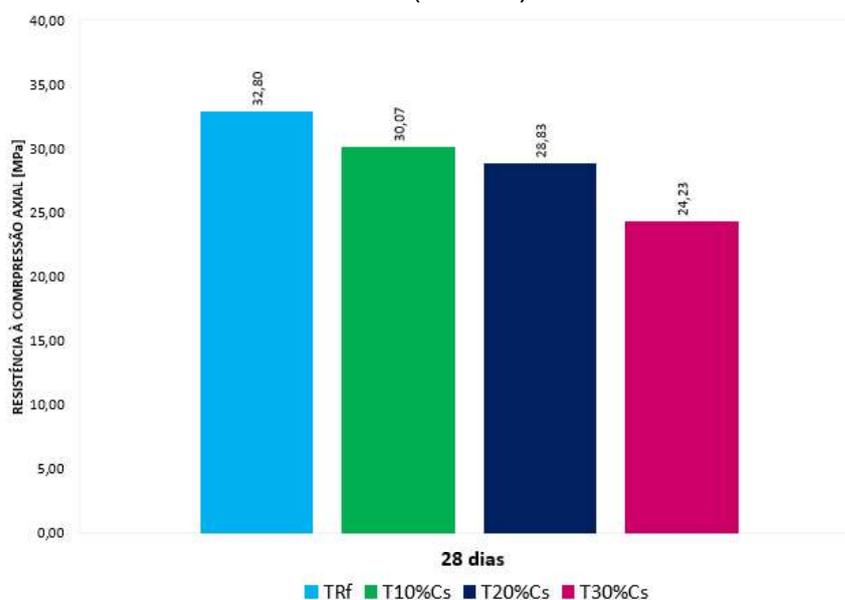
A Tabela 5.14 apresenta-se os resultados médio de resistência à compressão axial em 12 amostras de dimensões (15 x 30) cm de concreto para os 4 traços distintos (TRf, T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs) aos 28 dias.

Tabela 5.14 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias em CP's (15 x 30) cm

Nomenclatura	CP1 [MPa]	CP2 [MPa]	CP3 [MPa]	28 DIAS [MPa]
TRf	31,90	32,90	33,60	32,80
T10%Cs	29,90	29,50	30,80	30,07
T20%Cs	28,60	29,00	28,90	28,83
T30%Cs	23,50	25,10	24,10	24,23

A Figura 5.16 apresenta-se os valores médios de resistência à compressão axial de três amostras de cada traço aos 28 dias em corpos de prova com dimensão (15 x 30) cm.

Figura 5.16 - Resultados médio do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias em CP's (15 x 30) cm



O gráfico demonstrado na Figura 5.16 para os traços T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs apresentam uma redução nos resultados de resistência à compressão em cerca de 8%, 12% e 26% respectivamente, comparado ao concreto de referência aos 28 dias.

Ressalta o mesmo comportamento para corpos de prova com dimensão (10 x 20) cm (Figura 5.15), onde a resistência apresenta redução a medida que aumenta a porcentagem de resíduo do pó da lama em substituição ao peso do cimento comparado ao concreto de referência (sem resíduo).

Baseado na análise dos resultados conforme apresentado nas Figuras 5.15 e 5.16, destaca que o resíduo que não caracteriza atividade pozolânica, como é o caso da lama de marmoraria, de acordo com o resultado do ensaio de Chapelle modificado, não provoca aumento significativo na resistência à compressão axial ao longo do tempo.

Por outro lado, quando aplicado um teor maior de resíduo do pó da lama em substituição ao peso do cimento, os valores sofrem um decréscimo em relação ao concreto de referência. Singh *et al.* (2017) e Türker *et al.* (2002) associam esta perda de resistência à compressão a diluição de C2S e C3S, elementos esses que geram o CSH no processo de hidratação. Para Vardhan *et al.* (2015) o resíduo atua como enchimento e não desempenha papel no processo de hidratação. Rana *et al.* (2015) afirma que 10% do resíduo da lama não afeta significativamente a formação de produtos de hidratação no concreto.

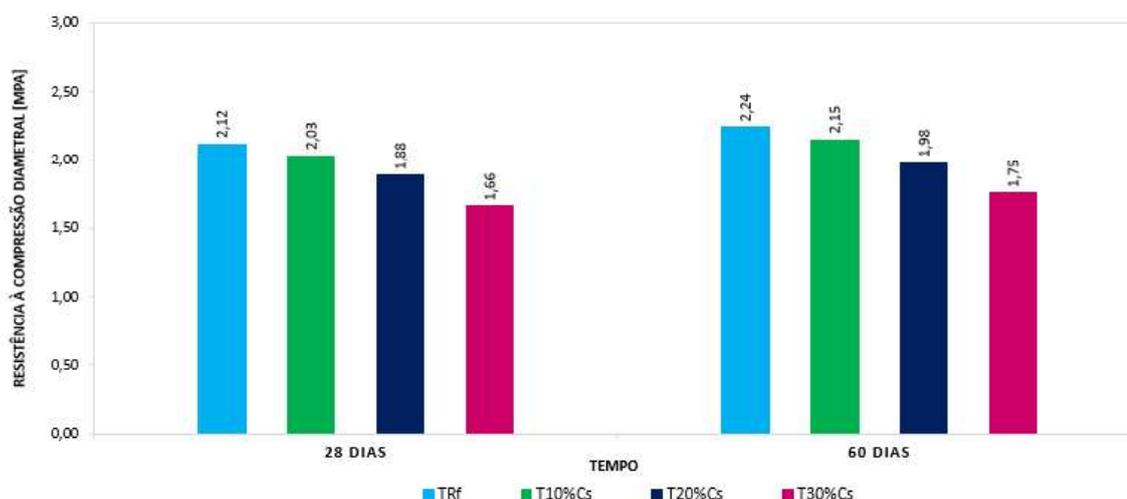
5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os valores médios obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, mostrado na Tabela 5.15 e no gráfico representado na Figura 5.17, foram avaliados nas idades de 28 e 60 dias, sendo utilizado 02 corpos de prova de cada mistura, totalizando 24 corpos de prova.

Tabela 5.15 - Média dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 e 60 dias em CP's (10 x 20) cm

Nomenclatura	28 DIAS		60 DIAS	
	Carga de ruptura [N]	Resistência Ft.d [MPa]	Carga de ruptura [N]	Resistência Ft.d [MPa]
TRf	66,45	2,12	70,35	2,24
T10%Cs	65,46	2,03	67,44	2,15
T20%Cs	59,16	1,88	62,13	1,98
T30%Cs	52,08	1,66	55,07	1,75

Figura 5.17 - Resultados médio do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos concretos nas idades 28 e 60 dias



Analisando o conjunto dos resultados, os concretos apresentam um ganho de resistência ao longo das idades. Nota-se uma interação entre o teor de porcentagem de adição do resíduo e a idade.

Observa-se que com a adição do teor de percentual de resíduo da lama de marmoraria na massa do concreto, a resistência diminui em cada idade das misturas que são substituídas pelo peso do cimento na mesma proporção comparado com o concreto de referência, ou seja, os resultados mostram que há um decréscimo da resistência com a incorporação do resíduo.

Os resultados máximos e mínimos de resistência à tração por compressão diametral em 28 dias para as misturas contendo resíduos em substituição ao peso do cimento são identificados em 2,03 MPa para o traço T10%Cs e 1,66 MPa para T30%Cs. O mesmo ocorre para a idade de 60 dias, obtendo um valor máximo de 2,15 MPa e mínimo de 1,75 MPa, respectivamente.

Observa-se uma queda linear nos resultados obtidos para as misturas, levando em consideração os mesmos comportamentos percentuais tanto para 28 dias e 60 dias, registrando 4% (T10%Cs), 11% (T20%Cs) e 22%(T30%Cs) em relação ao concreto de referência.

No que se refere à interação entre o teor do uso do resíduo e a idade, o traço T10%Cs apresenta um melhor comportamento, proporcionando um aumento na resistência, em média de 6% e as demais misturas proporcionam um aumento aproximadamente de 5% entre as idades.

A partir dos resultados, pode-se observar que o traço T10%Cs apresenta melhor comportamento do que os traços T20%Cs e T30%Cs, ou seja, os concretos com maiores teores de adição do resíduo apresentam um desempenho inferior ao concreto de referência, porém cabe destacar que o traço T20%Cs registra um valor médio de resistência bem próximo ao traço T10%Cs.

Comportamento apresenta similaridade nos resultados da resistência à compressão axial, sendo que a influência do resíduo promove um preenchimento dos vazios por apresentar fases cristalinas e não caracterizar atividade pozolânica. Procedimentos parecidos podem ser vistos nos trabalhos de (MELO, 2016; RANA *et al.*, 2015).

Correlação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 5.16 apresenta-se os valores médios e na Figura 5.18 representa-se a correlação de resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e resistência a tração por compressão diametral.

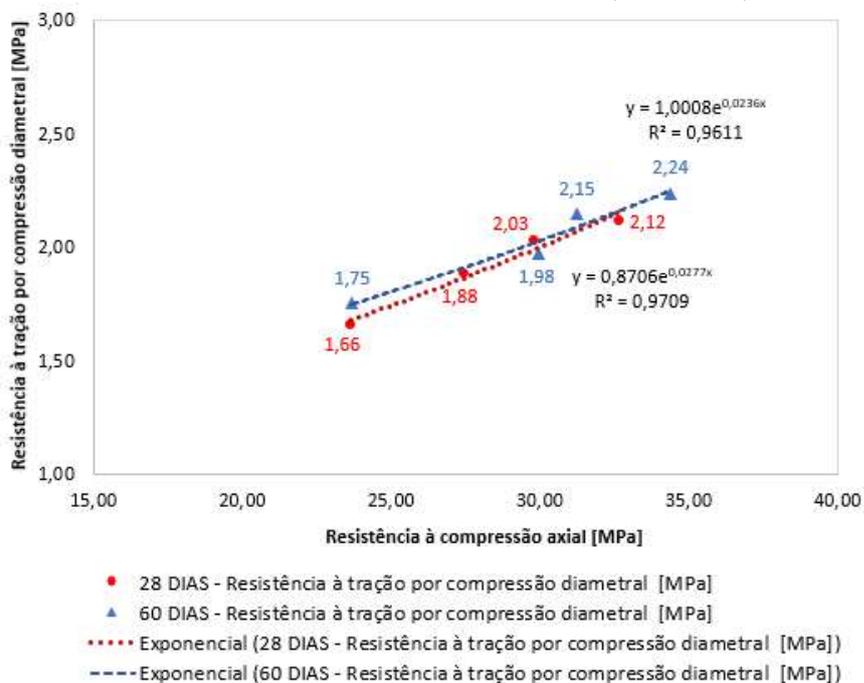
Tabela 5.16 - Média dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (a) e 60 dias (b)

MÉDIA DAS AMOSTRAS - 28 DIAS			MÉDIA DAS AMOSTRAS - 60 DIAS		
Nomenclatura	Resistência à compressão axial [MPa]	Resistência à compressão diametral [MPa]	Nomenclatura	Resistência à compressão axial [MPa]	Resistência à compressão diametral [MPa]
TRf	32,65	2,12	TRf	34,40	2,24
T10%Cs	29,80	2,03	T10%Cs	31,25	2,15
T20%Cs	27,45	1,88	T20%Cs	29,95	1,98
T30%Cs	23,66	1,66	T30%Cs	23,70	1,75

(a)

(b)

Figura 5.18 - Correlação: resistência à compressão axial x resistência à tração por compressão diametral aos 28 e 60 dias nas misturas TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs



Observa-se na Figura 5.18, as correlações de $R^2 = 0,9611$ e $R^2 = 0,9709$ nas idades 28 e 60 dias, respectivamente. A curva de regressão é do tipo exponencial e os valores de R^2 estão ótimo, tendendo a 1. Os resultados apresentam com uma tendência, demonstrando as propriedades estarem relacionadas, indicando uma redução tanto na resistência axial quanto na diametral ao acrescentar o resíduo da lama nas misturas comparando com o concreto de referência. Cabe ressaltar, que o número de corpos de prova para determinação das correlações é pequeno, o que pode apresentar dificuldades nas informações com mais exatidão, conforme os comportamentos dos dados.

Com base nos resultados médio alcançados, é possível identificar que nas idades 28 e 60 dias o valor máximo encontrado em relação aos concretos que contém resíduo da lama de marmoraria é o traço T10%Cs, do qual apresenta o melhor resultado, registrando 29,80 MPa para 28 dias e 31,25 MPa para 60 dias de resistência à compressão axial e 2,03 MPa e 2,15 MPa para a resistência à tração por compressão diametral, o que demonstra uma variação na relação, entre ambos os ensaios, da ordem de grandeza próximo a 5% e 6%. O traço T30%Cs registra o pior resultado, 23,65 MPa e 23,70 MPa para a resistência à compressão axial e

1,66 MPa e 1,75 MPa para a resistência à tração por compressão diametral, apresentando uma variação na relação de aproximadamente 5%.

A resistência à tração por compressão diametral segue o mesmo padrão da resistência a compressão axial para os concretos convencionais, podendo estar relacionadas entre si, porém não apresenta uma proporcionalidade direta. Mehta e Monteiro (2014) afirmam que a medida que a resistência à compressão axial do concreto aumenta, a resistência à tração por compressão diametral também aumenta, porém apresenta uma taxa decrescente.

5.3.3 Resistividade elétrica superficial

O ensaio de resistividade elétrica é uma das formas de verificar a durabilidade do concreto. As medições de resistividade elétrica superficial dos concretos foram realizadas nas idades 3, 7, 14, 28, 42, 60, 91, 120 e 180 dias, conforme descrito pela norma T358-17 (AASTHO, 2017).

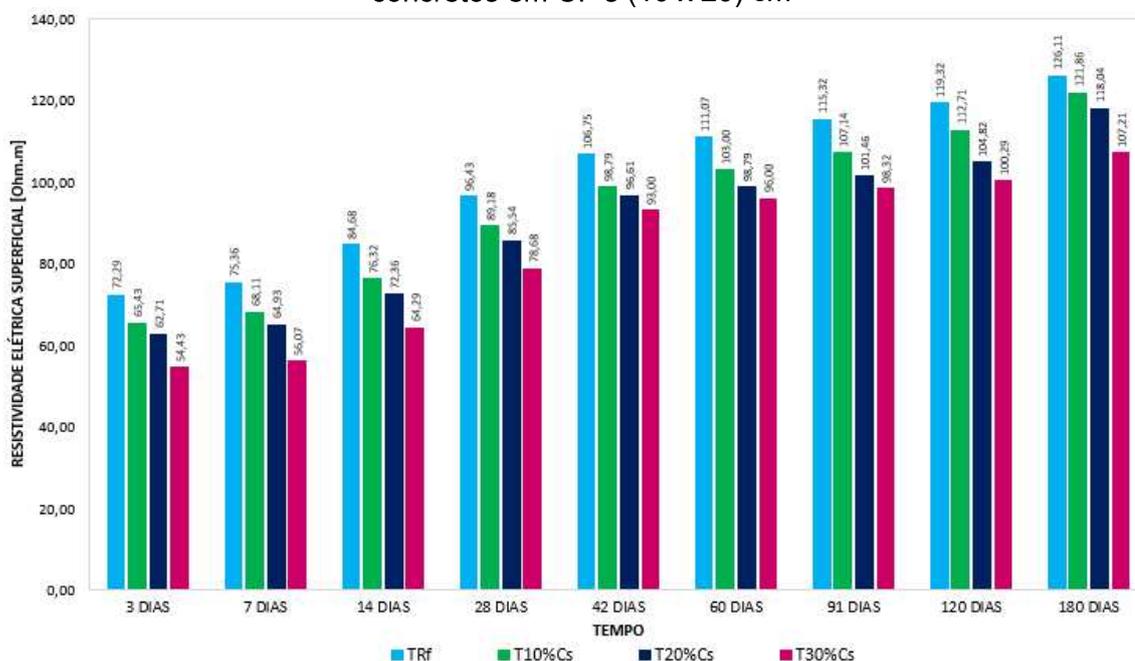
Foram ensaiados 7 corpos de prova para cada mistura, totalizando 28 corpos de prova que encontravam saturados em um recipiente com água desde o início até a data final do ensaio. O ensaio foi aplicado usando quatro ângulos numa mesma amostra (0°, 90°, 180° e 270°) cilíndrica de (10 x 20) cm e valores foram anotados e no final foi demonstrada a média dos 7 corpos de prova de cada mistura, podendo ser verificados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Média dos resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial nas idades 3, 7, 14, 28, 42, 60, 91, 120 e 180 dias em CP's (10 x 20) cm

Nomenclatura	3 DIAS [Ohm.m]	7 DIAS [Ohm.m]	14 DIAS [Ohm.m]	28 DIAS [Ohm.m]	42 DIAS [Ohm.m]	60 DIAS [Ohm.m]	91 DIAS [Ohm.m]	120 DIAS [Ohm.m]	180 DIAS [Ohm.m]
TRf	72,29	75,36	84,68	96,43	106,75	111,07	115,32	119,32	126,11
T10%Cs	65,43	68,11	76,32	89,18	98,79	103,00	107,14	112,71	121,86
T20%Cs	62,71	64,93	72,36	85,54	96,61	98,79	101,46	104,82	118,04
T30%Cs	54,43	56,07	64,29	78,68	93,00	96,00	98,32	100,29	107,21

Na Figura 5.19 mostra-se o gráfico dos resultados médio de resistividade elétrica superficial dos concretos de diferentes traços em relação ao avanço da idade.

Figura 5.19 - Resultados médio do ensaio de resistividade elétrica superficial dos concretos em CP's (10 x 20) cm



Na Figura 5.19, observa-se um aumento nos valores de resistividade elétrica superficial a medida que a idade aumenta em relação a todos os traços analisados devido à evolução de hidratação do cimento e o endurecimento progressivo do concreto. Comportamento encontra-se de acordo com outros trabalhos como ANDRADE e D'ANDRÉA, 2011; MEDEIROS-JUNIOR; GANS, 2017; PRESUEL-MORENO *et al.*, 2013.

Por outro lado, mediante os dados analisados, os valores de resistividade elétrica em cada mistura que contém resíduo da lama de marmoraria são menores comparado com o concreto de referência para todas as idades.

De fato, a resistividade elétrica na idade de 3 dias, obtidas através dos traços T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs apresenta um resultado mínimo de 54,43 Ohm.m e o valor máximo de 65,43 Ohm.m, enquanto o traço de referência apresenta o valor de 72,29 Ohm.m. Para a idade de 28 dias, as misturas com resíduo da lama de marmoraria registram o valor mínimo de 78,68 Ohm.m e máximo de 89,18 Ohm.m, enquanto que o concreto de referência registra 96,43 Ohm.m. Na idade de 180 dias, os traços com resíduos apresentam valor mínimo de 107,21 Ohm.m e máximo de 121,86 Ohm.m, enquanto que o concreto de referência apresenta 126,11 Ohm.m.

Destaca-se ainda que entre as idades 3 e 28 dias, os traços T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs apresentam um aumento na resistividade elétrica superficial

aproximadamente de 27% a 31%. Entre as idades 28 e 180 dias, os mesmos traços apresentam um ganho de 27% a 28%.

Pode-se dizer que os resultados médios obtidos de resistividade elétrica superficial apresentam uma redução à medida que aumenta os percentuais de substituição parcial do peso do cimento pelo resíduo da lama de marmoraria. Isso pode ser ocorrência da alta finura que promove um refinamento na estrutura de poros, tornando a matriz cimentícia menos porosa. Sendo este efeito ocasionado por uma maior densificação da zona de transição e da matriz cimentícia que 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); Olsson *et al.* (2013); Polder (2001) levando em consideração que quanto maior a quantidade de água encontrada nos corpos de prova, maior a condutividade no interior do concreto, registrando assim menores valores de resistividade elétrica superficial.

Cabe ressaltar que a recomendação normativa para corpos de prova (10 x 20) cm pede espaçamento entre eletrodos igual a 38 mm, e neste presente estudo, utiliza-se a sonda com espaçamento entre eletrodos igual a 50 mm, tendo em vista a disponibilidade do instrumento em laboratório, sendo um intuito meramente comparativo entre os diferentes tipos de concretos produzidos, pelo qual não deve ser extrapolado para eventual análise externa a esta pesquisa.

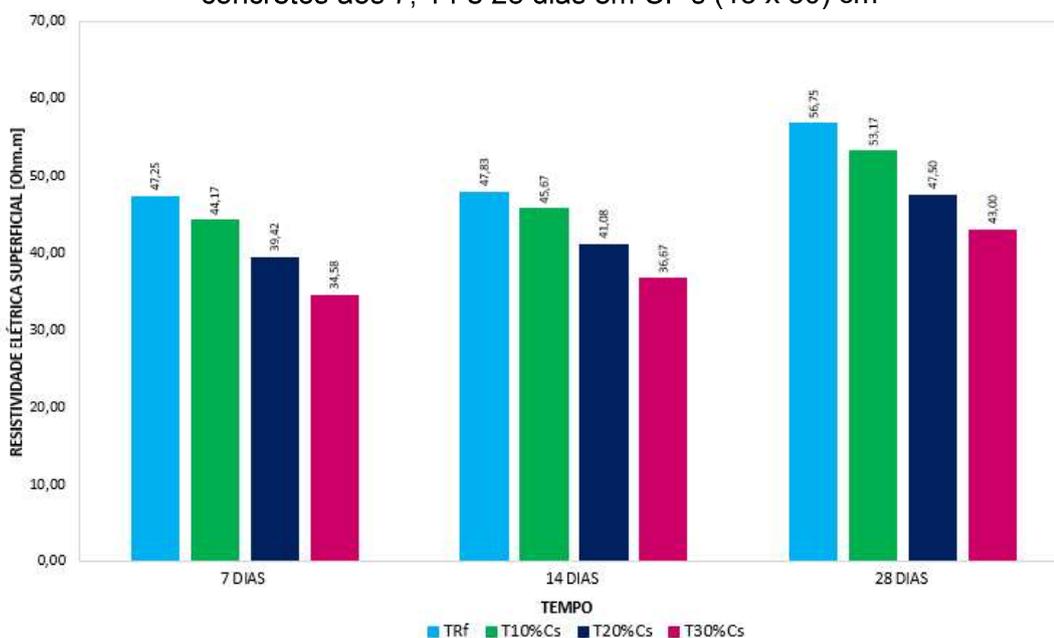
Resistividade elétrica superficial com corpos de prova de dimensão (15 x 30) cm

Na Tabela 5.18 apresenta os resultados médios da resistividade elétrica superficial com corpos de prova de dimensão (15 x 30) cm para os traços de concreto nas idades 7, 14 e 28 dias.

Tabela 5.18 - Média dos resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial

MÉDIA DOS VALORES DAS AMOSTRAS			
Nomenclatura	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS
TRf	47,25	47,83	56,75
T10%Cs	44,17	45,67	53,17
T20%Cs	39,42	41,08	47,50
T30%Cs	34,58	36,67	43,00

Figura 5.20 - Resultados médio do ensaio de resistividade elétrica superficial dos concretos aos 7, 14 e 28 dias em CP's (15 x 30) cm



A partir da Figura 5.20 é possível notar que a resistividade elétrica superficial das amostras saturadas aumenta ao longo do tempo. Observa-se que nas primeiras idades a resistividade elétrica superficial apresenta valores baixos, porém a mesma cresce com o tempo, devido à hidratação do cimento e endurecimento progressivo do concreto. Comportamentos semelhantes acontecem para os corpos de prova (10 x 20) cm.

Os resultados médios obtidos aos 28 dias para os traços T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs apresentam uma redução na resistividade elétrica superficial aproximadamente de 6%, 16% e 24% respectivamente, comparado ao concreto de referência, porém houve um ganho de 17% a 19% entre as idades 7 e 28 dias.

Observa-se nas Figuras 5.19 e 5.20 uma não ocorrência de similaridade nos resultados médios de resistividade elétrica superficial entre os corpos de prova com dimensões (10 x 20) cm e (15 x 30) cm.

Os resultados demonstrados são fundamentados na classificação dada em TP95 (AASTO, 2011) e aplicada a planilha de corrosão (Tabela 3.1) conforme trabalho de Polder (2001), citado no capítulo de revisão bibliográfica. A média dos resultados de classificação dos concretos quanto ao risco de corrosão em relação ao ensaio de resistividade elétrica superficial em corpos de prova de dimensão (15 x 30) cm é mostrado na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 - Média dos resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial em classificação dos concretos quanto a risco de corrosão em CP's (15x30) cm

MÉDIA DOS VALORES DAS AMOSTRAS em CP's (15x30) cm			
NOMENCLATURA	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS
TRf	<i>Muito alta</i>	<i>Muito alta</i>	<i>Alta</i>
T10%Cs	<i>Muito alta</i>	<i>Muito alta</i>	<i>Alta</i>
T20%Cs	<i>Muito alta</i>	<i>Muito alta</i>	<i>Muito alta</i>
T30%Cs	<i>Muito alta</i>	<i>Muito alta</i>	<i>Muito alta</i>

Baseado na análise dos resultados médio obtidos, uma influência da resistividade elétrica sobre o avanço da corrosão do aço é apontada, apresentando uma alta taxa de corrosão no interior do concreto podendo resultar em uma queda da resistividade elétrica, principalmente nas primeiras idades.

Observam que as misturas de concreto que mostram maiores valores de resistividade elétrica podem ser mais duráveis do que aquelas que demonstram baixa resistividade elétrica, pois estas podem apresentar uma evolução do processo de corrosão das armaduras e estarem suscetíveis aos agentes agressivos, como por exemplo, os traços com teor de 20% e 30%.

Correlação entre a resistência à compressão axial e a resistividade elétrica superficial em corpos de prova com dimensão (10 x 20) cm e (15 x 30) cm

Nas Tabelas 5.20 e 5.21 apresentam-se a média dos resultados do ensaio da resistência à compressão axial e a resistividade elétrica superficial para todos os traços de concreto nas idades 28 e 180 dias para os dois tipos de dimensões de corpos de prova cilíndricos.

Tabela 5.20 - Média dos resultados da resistência à compressão axial e resistividade elétrica superficial aos 28 dias (a) e 180 dias (b) em CP's (10 x 20) cm

MÉDIA DOS VALORES DAS AMOSTRAS - 28 DIAS		
Nomencl.	Resistência à compressão axial [média MPa]	Resistividade elétrica superficial [Ohm.m]
TRf	32,65	96,43
T10%Cs	29,80	89,18
T20%Cs	27,45	85,54
T30%Cs	23,65	78,68

(a)

MÉDIA DOS VALORES DAS AMOSTRAS - 180 DIAS		
Nomencl.	Resistência à compressão axial [média MPa]	Resistividade elétrica superficial [Ohm.m]
TRf	38,10	126,11
T10%Cs	33,38	121,86
T20%Cs	32,05	118,04
T30%Cs	25,35	107,21

(b)

Baseado nas condições analisadas, as Figuras 5.21 e 5.22 apresentam os gráficos de correlação entre a resistência à compressão axial e a resistividade elétrica superficial para todas as misturas na idade de 28 dias para CP's (10x 20) cm e (15 x 30) cm e aos 180 dias para CP's (10x 20) cm.

Figura 5.21 - Correlação: resistência à compressão axial x resistividade elétrica superficial dos concretos aos 28 e 180 dias para as misturas TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs em CP's (10 x 20) cm

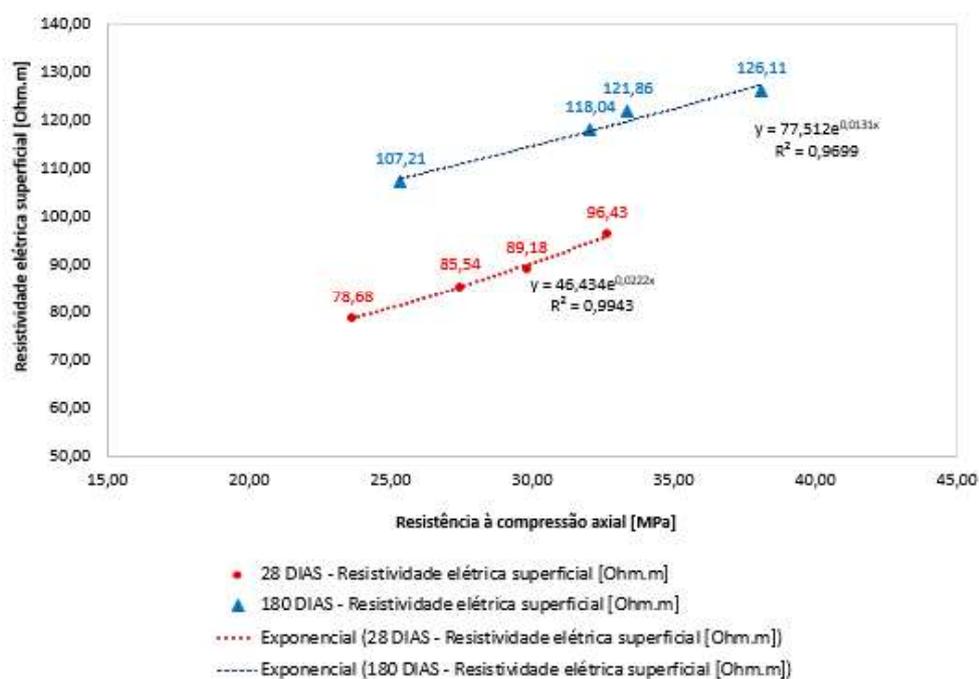
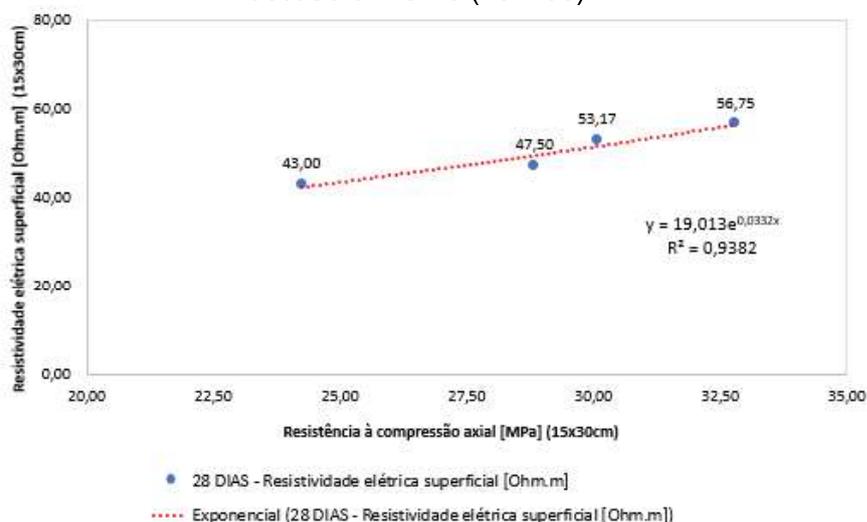


Tabela 5.21 - Média dos resultados da resistência à compressão axial e resistividade elétrica superficial aos 28 dias em CP's (15 x 30) cm

MÉDIA DOS VALORES DAS AMOSTRAS - 28 DIAS CP's (15 x 30) cm		
Nomenclatura	Resistência à compressão axial [MPa]	Resistividade elétrica superficial [Ohm.m]
TRf	32,80	56,75
T10%Cs	30,07	53,17
T20%Cs	28,83	47,50
T30%Cs	24,23	43,00

Figura 5.22 - Correlação do ensaio de resistência à compressão axial x resistividade elétrica superficial dos concretos aos 28 dias para as misturas TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs em CP's (15 x 30) cm



A curva de regressão mais adequada aos dados foi do tipo exponencial, com R^2 tendendo a 1. Como visto nas Figuras 5.21 e 5.22, observam-se os resultados com $R^2 = 0,9943$ e $R^2 = 0,9699$ nas idades 28 e 180 dias para corpos de prova com dimensão (10 x 20) cm respectivamente, e $R^2 = 0,9382$ para corpos de prova com dimensão (15 x 30) cm aos 28 dias entre a resistência à compressão axial e a resistividade elétrica superficial.

A correlação mostra bastante satisfatória, demonstrando que estas propriedades podem estar relacionadas pelo fato de apontar uma redução da resistência à compressão quanto da resistividade elétrica superficial para as misturas de substituição do peso do cimento contendo resíduo de lama comparado com o concreto de referência.

Destaca-se uma tendência linear aproximada entre as duas propriedades, pois ambas dependem diretamente da porosidade da matriz. Comportamentos são observados anteriormente por Dinakar *et al.* (2007); Lübeck *et al.* (2012). Os mesmos autores complementam que a medida que o concreto tende a amadurecer, a relação pode ser devidamente afetada por outras propriedades, como a saturação dos compostos e a condutividade da solução (DOTTO *et al.*, 2004; LÜBECK *et al.*, 2012).

Conforme as Tabelas 5.20 e 5.21, os valores médio obtidos de resistividade elétrica superficial dos traços de substituição parcial do peso do cimento pelo

resíduo (T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs) pode ser notado valores de crescimento à medida que os valores de resistência mecânica aumenta. Esse motivo pode ser em função do aumento da densidade da matriz do cimento, em ocorrência ao progresso da hidratação. Comportamentos parecidos podem ser vistos nos estudos de Dinakar *et al.* (2007); Lübeck *et al.* (2012); Medeiros (2016); Rosa (2005).

Andrade (2004) retrata 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 é influenciado por outras propriedades, como a condutividade da solução de poros e o grau de saturação do concreto (LÜBECK *et al.*, 2012).

Porém, Ramezaniapour *et al.* (2011) salienta que não é recomendado usar a resistividade elétrica como um indicador para avaliação da resistência à compressão. O mesmo autor descreve que a resistência à compressão não tem efeito significativo sobre a resistividade do concreto, mas sobre outra perspectiva, a solução do composto químico do poro tem uma grande influência na resistividade do concreto, podendo afetar a resistência à compressão do concreto.

5.3.4 Resistividade elétrica volumétrica

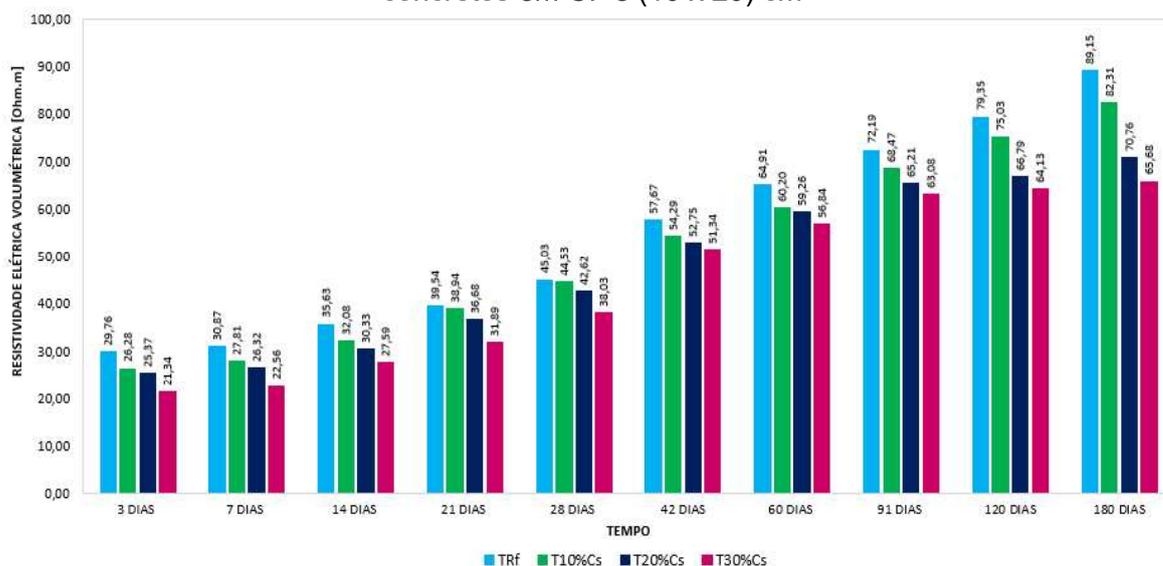
O ensaio de resistividade elétrica é uma das formas de verificar a durabilidade do concreto. Foram empregados 7 corpos de prova para cada mistura, totalizando 42 corpos de prova e ensaiados nas idades 3, 7, 14, 21, 28, 60, 91, 120 e 180 dias. Os corpos de prova encontram saturados em uma caixa com água potável desde o início até a data final do período do ensaio. Os valores médios obtidos da resistividade elétrica volumétrica encontram-se na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 - Média dos resultados de resistividade elétrica volumétrica CP's (10 x 20) cm

Nomenclatura	3 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS	42 DIAS	60 DIAS	91 DIAS	120 DIAS	180 DIAS
	[Ohm.m]	[Ohm.m]								
TRf	29,76	30,87	35,63	39,54	45,03	57,67	64,91	72,19	79,35	89,15
T10%Cs	26,28	27,81	32,08	38,94	44,53	54,29	60,20	68,47	75,03	82,31
T20%Cs	25,37	26,32	30,33	36,68	42,62	52,75	59,26	65,21	66,79	70,76
T30%Cs	21,34	22,56	27,59	31,89	38,03	51,34	56,84	63,08	64,13	65,68

Na Figura 5.23 representa-se o gráfico dos resultados médio do ensaio de resistividade elétrica volumétrica nos traços de concreto TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs aos 3, 7, 14, 21, 28, 60, 91, 120 e 180 dias em corpos de prova de (10 x 20) cm.

Figura 5.23 - Resultados médio do ensaio de resistividade elétrica volumétrica dos concretos em CP's (10 x 20) cm



Em relação a Figura 5.23, os resultados de resistividade elétrica volumétrica para as misturas em substituição ao peso do cimento pelo percentual do resíduo da lama de marmoraria em pó apresentam valores menores comparado com o concreto de referência (sem resíduo) para todas as idades do ensaio.

Por outro lado, pode ser observado um aumento nos resultados da resistividade elétrica à medida que a idade de cura aumenta com o tempo de ensaio para todas as misturas.

Os resultados médios obtidos aos 28 dias para os traços T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs apresentam uma redução de resistividade aproximadamente de 1%, 5% e 15% respectivamente, em relação aos valores do concreto de referência. Para a idade mais avançada, de 180 dias, apresenta uma queda nos valores de resistividade em cerca de 8%, 21% e 26% comparado ao concreto de referência.

Entre as idades 3 e 28 dias, os traços T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs apresentam um aumento na resistividade elétrica volumétrica em torno de 41%,

40% e 44%. E para as idades 28 e 180 dias, as mesmas misturas apresentam um ganho de 46%, 40% e 42%, respectivamente.

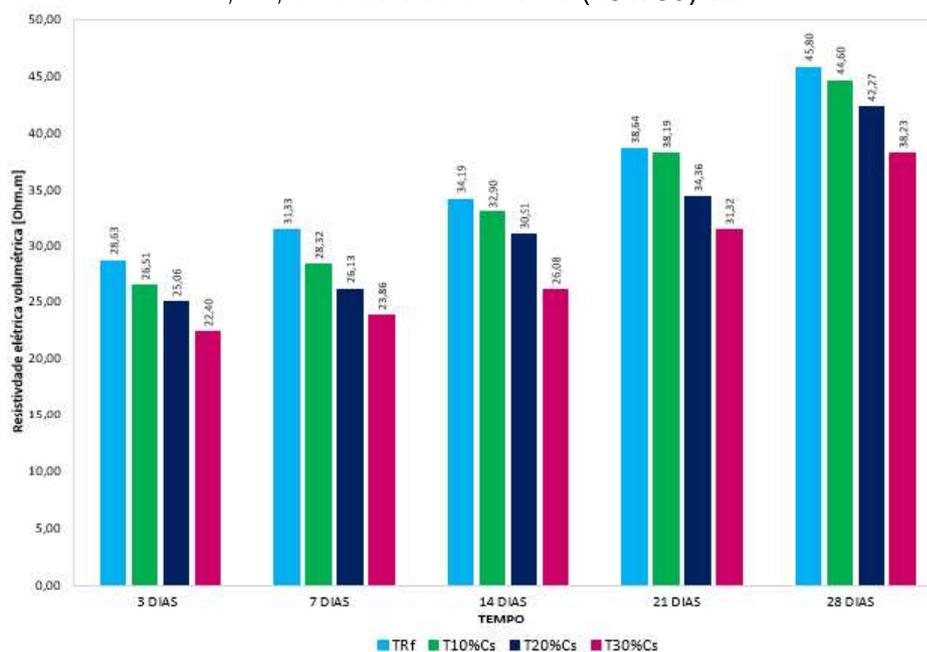
Resistividade elétrica volumétrica com corpos de prova de dimensão (15 x 30) cm

Na Tabela 5.23 e na Figura 5.24 apresenta-se os resultados médios da resistividade elétrica volumétrica com corpos de prova de dimensão (15 x 30) cm para os traços de concreto nas idades 3, 7, 14, 21 e 28 dias.

Tabela 5.23 - Média dos resultados de resistividade elétrica volumétrica CP's (15 x 30) cm

Nomenclatura	3 DIAS [Ohm.m]	7 DIAS [Ohm.m]	14 DIAS [Ohm.m]	21 DIAS [Ohm.m]	28 DIAS [Ohm.m]
TRf	28,63	31,33	34,19	38,64	45,80
T10%Cs	26,51	28,32	32,90	38,19	44,60
T20%Cs	25,06	26,13	30,91	34,36	42,27
T30%Cs	22,40	23,86	26,08	31,32	38,23

Figura 5.24 - Resultados médio de resistividade elétrica volumétrica dos concretos aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias em CP's (15 x 30) cm



A partir da Figura 5.24 é possível notar que os valores da resistividade elétrica volumétrica das amostras saturadas aumentam ao longo do período do ensaio. Nota-se que nas primeiras idades os resultados de resistividade elétrica volumétrica apresentam valores baixos, porém o mesmo cresce com o tempo,

devido à hidratação do cimento e endurecimento progressivo do concreto. Fatos semelhantes ocorrem em corpos de prova com dimensão (10 x 20) cm medidos.

Os resultados médios obtidos aos 28 dias para os traços T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs contribuem para uma redução aproximadamente de 3%, 7% e 16% respectivamente, em relação aos valores do concreto de referência. Entretanto, houve um ganho de 41% entre as idades 3 e 28 dias.

Para a idade de 28 dias, os corpos de prova dos traços T10%Cs e T20%Cs registram resultados médio muito próximo, não sendo significativa variação em relação ao traço de referência. O valor da resistividade média para o traço de referência (TRf) foi de 45,80 Ohm.m, o resultado máximo (T10%Cs) de 44,60 Ohm.m e o resultado mínimo de 38,23 Ohm.m (T30%Cs).

Observa-se uma similaridade de valores médios encontrados nos resultados de resistividade elétrica volumétrica, apresentados nas Figuras 5.23 e 5.24, para corpos de prova com dimensões (10 x 20) cm e (15 x 30) cm. Porém, o mesmo não ocorre nos resultados de resistividade elétrica superficial.

Correlação entre a resistência à compressão axial e resistividade elétrica volumétrica em corpos de prova com dimensão (10 x 20) cm e (15 x 30) cm

Na Tabela 5.24 apresenta-se os resultados médio da resistência à compressão axial e a resistividade elétrica volumétrica para os quatro diferentes traços de concreto aos 28 dias e 180 dias para CP's (10 x 20) cm.

Tabela 5.24 - Média dos resultados de resistência à compressão axial e resistividade elétrica volumétrica nas idades de 28 dias (a) e 180 dias (b) em CP's (10 x 20) cm

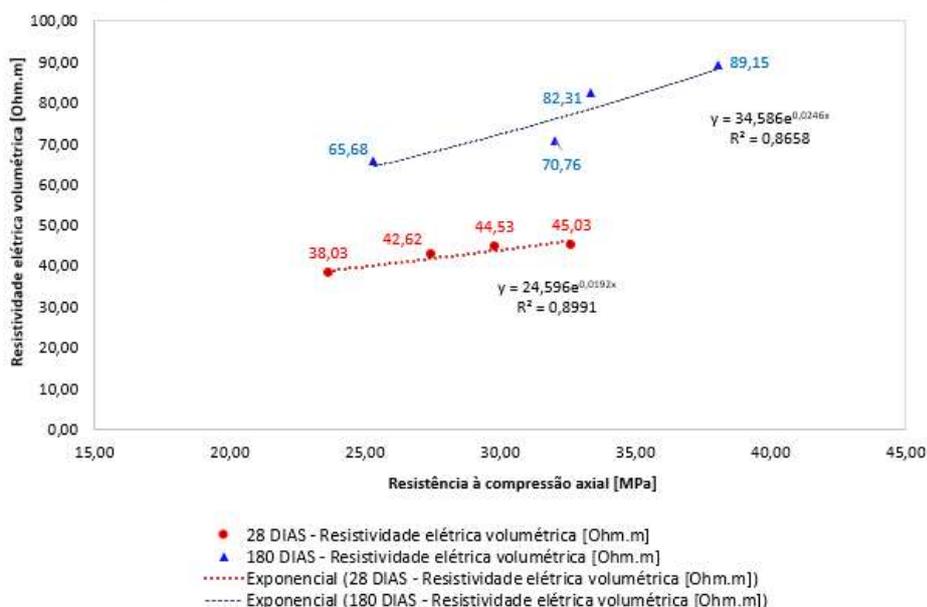
MÉDIA DOS VALORES DAS AMOSTRAS - 28 DIAS			MÉDIA DOS VALORES DAS AMOSTRAS - 180 DIAS		
Nomenclatura	Resistência à compressão axial [MPa]	Resistividade elétrica volumétrica [Ohm.m]	Nomenclatura	Resistência à compressão axial [MPa]	Resistividade elétrica volumétrica [Ohm.m]
TRf	32,65	45,03	TRf	38,10	89,15
T10%Cs	29,80	44,53	T10%Cs	33,38	82,31
T20%Cs	27,45	42,62	T20%Cs	32,05	70,76
T30%Cs	23,65	38,03	T30%Cs	25,35	65,68

(a)

(b)

Na Figura 5.25 apresenta-se o gráfico com curva de regressão entre a resistência à compressão axial e a resistividade elétrica volumétrica para as quatro misturas (TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs) nas idades 28 e 180 dias.

Figura 5.25 - Correlação: resistência à compressão axial x resistividade elétrica superficial aos 28 e 180 dias em CP's (10 x 20) cm



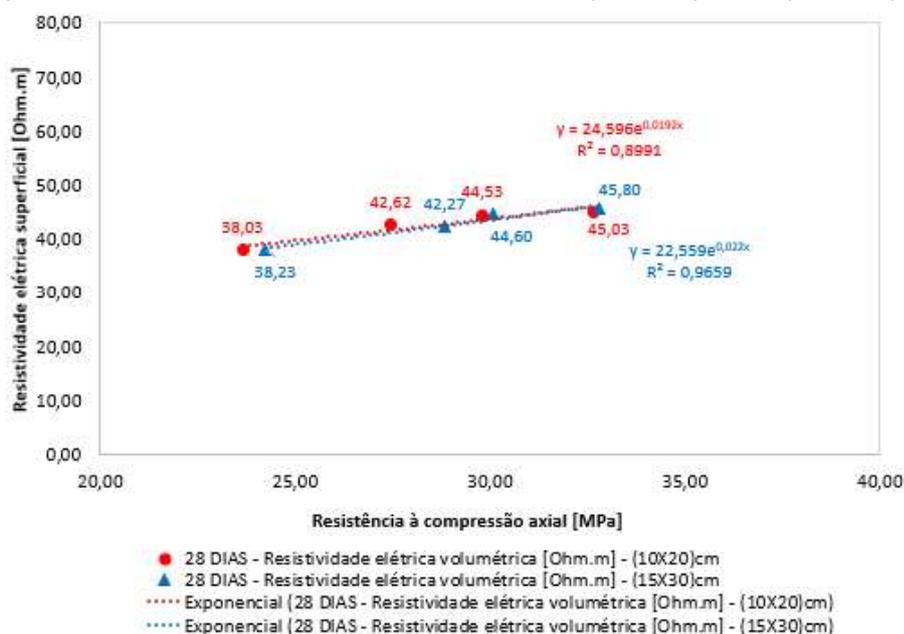
A curva de regressão mais adequada aos dados foi do tipo exponencial, com R^2 tendendo a 1. Como visto na Figura 5.25, observa-se as correlações de $R^2 = 0,8991$ e $R^2 = 0,8658$ nas idades 28 e 180 dias respectivamente, para corpos de prova com dimensão (10 x 20) cm, entre a resistência à compressão axial e a resistividade elétrica volumétrica.

A Tabela 5.25 e Figura 5.26 apresenta-se os resultados médio do ensaio de resistência à compressão axial e a resistividade elétrica volumétrica para as quatro misturas de concreto aos 28 dias em CP's (10 x 20) cm e (15 x 30) cm.

Tabela 5.25 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial e resistividade elétrica volumétrica aos 28 dias em CP's (10 x 20) cm e (15 x 30) cm

MÉDIA DOS VALORES DAS AMOSTRAS - 28 DIAS				
Nomenclatura	CP's (10 x 20) cm		CP's (15 x 30) cm	
	Resistência à compressão axial [média MPa]	28 DIAS - Resistividade elétrica volumétrica [Ohm.m]	Resistência à compressão axial [média MPa]	28 DIAS - Resistividade elétrica volumétrica [Ohm.m]
TRf	32,65	45,03	32,80	45,80
T20%Cs	29,80	44,53	30,07	44,60
T20%Cs	27,45	42,62	28,83	42,27
T30%Cs	23,65	38,03	24,23	38,23

Figura 5.26 - Correlação: resistência à compressão axial x resistividade elétrica superficial dos concretos aos 28 dias em CP's (10 x 20) cm e (15 x 30) cm



A Figura 5.26 apresenta -se a curva de regressão mais adequada aos dados foi do tipo exponencial, onde os valores de R^2 tendendo a 1 no gráfico é de $R^2 = 0,8991$ e $R^2 = 0,9659$ aos 28 dias em CP's (10 x 20) cm e (15 x 30) cm respectivamente, entre a resistência à compressão axial e a resistividade elétrica volumétrica.

Nota-se então que nos resultados de resistividade elétrica volumétrica apresentam um desempenho melhor nas misturas de concreto com incorporação do resíduo da lama de marmoraria em substituição ao peso do cimento em relação aos resultados de resistência à compressão axial. Tal fato pode ser dito que o volume total de poros do concreto não reduz devido a atividade pozolânica, porém a estrutura dos poros se torna menos contínua. Situação provocada pela ação da conectividade dos poros ser maior na durabilidade do que na resistência do concreto (KHODABAKHSHIAN *et al.*, 2018a).

Comparação entre a Resistividade elétrica superficial e Resistividade elétrica volumétrica em corpos de prova com dimensão (10 x 20) cm e (15 x 30) cm

Comparando os resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica, de acordo com os valores informados na Tabela 5.26 e representados

através de gráficos na Figura 5.27, é possível perceber que os resultados encontrados pelo método de resistividade elétrica superficial abrangem uma diferença entre o método de resistividade elétrica volumétrica, considerando uma média de 51% entre as misturas na idade de 28 dias para corpos de prova (10 x 20) cm.

Tabela 5.26 - Média dos resultados de resistividade elétrica superficial (a) e resistividade elétrica volumétrica (b) aos 7, 14 e 28 dias em CP's (10 x 20) cm

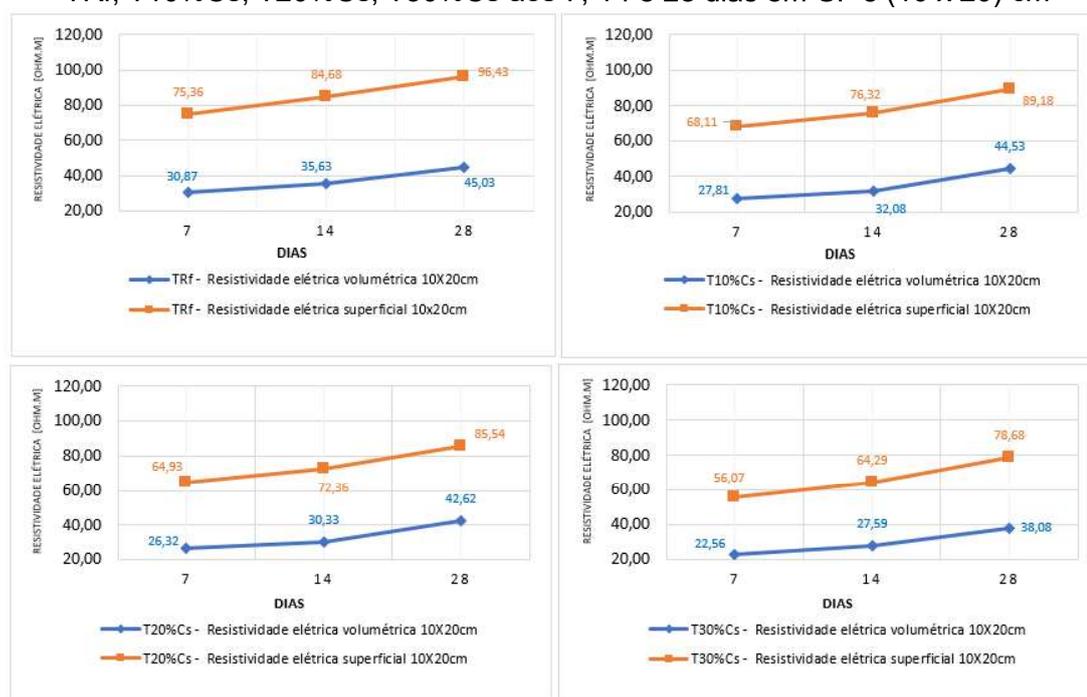
Resistividade elétrica superficial (10x20) cm				
Dia	TRf	T10%CS	T20%CS	T30%CS
7	75,36	68,11	64,93	56,07
14	84,68	76,32	72,36	64,29
28	96,43	89,18	85,54	78,68

(a)

Resistividade elétrica volumétrica (10x20) cm				
Dia	TRf	T10%CS	T20%CS	T30%CS
7	30,87	27,81	26,32	22,56
14	35,63	32,08	30,33	27,59
28	45,03	44,53	42,62	38,08

(b)

Figura 5.27 - Comparação: resistividade elétrica superficial x volumétrica dos concretos TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs aos 7, 14 e 28 dias em CP's (10 x 20) cm



Conforme os valores apresentados na Tabela 5.27 e representado através de gráficos na Figura 5.28, observa-se o mesmo comportamento para corpos de prova (15 x 30) cm, onde os resultados encontrados pelo método de resistividade elétrica superficial apresentam uma diferença entre o método de resistividade

elétrica volumétrica, considerando uma média de aproximadamente 14% nas misturas aos 28 dias.

Tabela 5.27 - Média dos resultados de resistividade elétrica superficial (a) e resistividade elétrica volumétrica (b) aos 7, 14 e 28 dias em CP's (15 x 30) cm

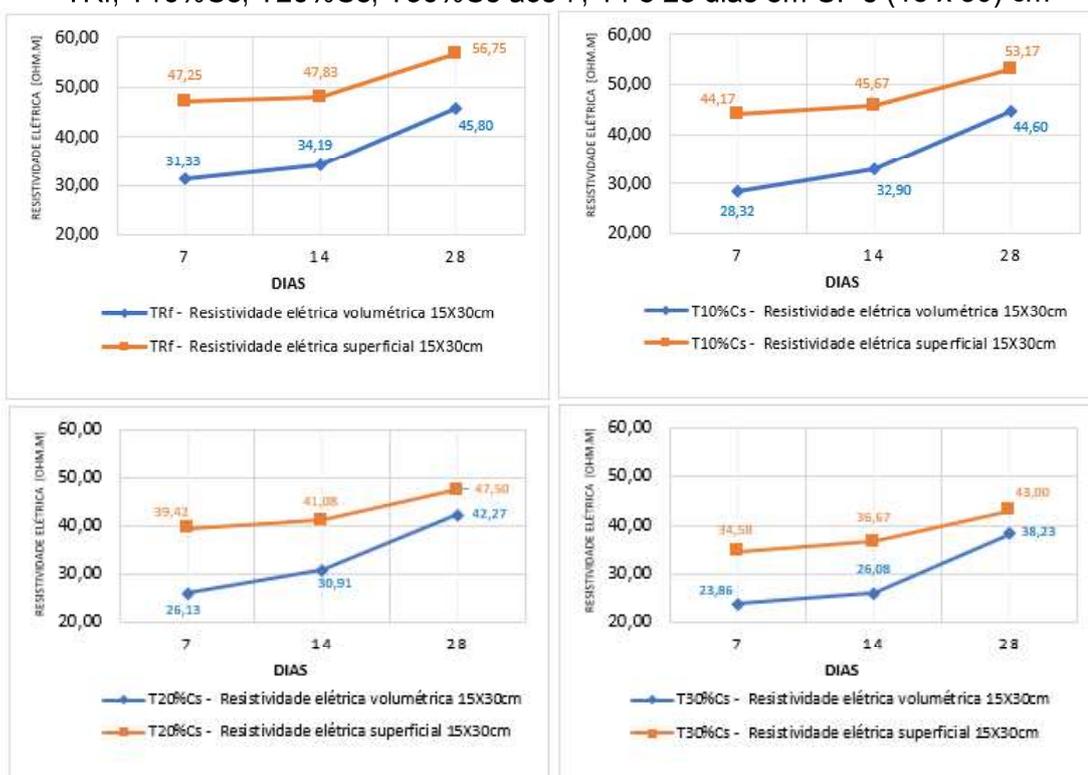
Resistividade elétrica superficial (15x30) cm				
Dia	TRf	T10%CS	T20%CS	T30%CS
7	47,25	44,17	39,42	34,58
14	47,83	45,67	41,08	36,67
28	56,75	53,17	47,50	43,00

(a)

Resistividade elétrica volumétrica (15x30) cm				
Dia	TRf	T10%CS	T20%CS	T30%CS
7	31,33	28,32	26,13	23,86
14	34,19	32,90	30,91	26,08
28	45,80	44,60	42,27	38,23

(b)

Figura 5.28 - Comparação: resistividade elétrica superficial x volumétrica dos concretos TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs aos 7, 14 e 28 dias em CP's (15 x 30) cm



Entretanto, pode-se dizer que os resultados de resistividade elétrica superficial é significativamente maior que os resultados de resistividade elétrica volumétrica para todas as idades analisadas. Tal comportamento demonstra que superficialmente o concreto encontra protegido da corrosão do que internamente, na qual estabelece que a umidade tende a permanecer constante em um intervalo de tempo maior.

5.3.5 Módulo de elasticidade estático e Módulo de elasticidade dinâmico

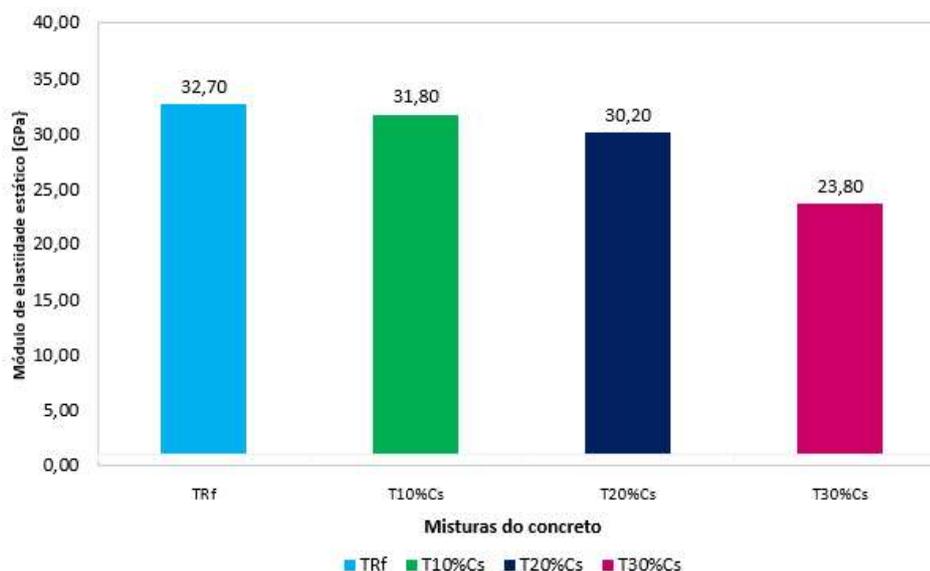
Os valores médios obtidos dos módulos de elasticidade estático, estabelecidos para a idade de 28 dias são demonstrados na Tabela 5.28. Para a realização dos ensaios foram utilizados 2 corpos de prova de (10 x 20) cm e 3 corpos de prova (15 x 30) cm para cada traço e aplicados os ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade, estabelecendo a média deles.

Tabela 5.28 - Média dos resultados do ensaio do módulo de elasticidade estático aos 28d

Nomenclatura	Ensaio de compressão axial [MPa]				Resistência f_c [MPa]					Eci [GPa]			Módulo de elasticidade [GPa]
					Ensaio de compressão axial								
	CP1	CP2	CP3	Média [MPa]	FC1	FC2	Fc. Média [MPa]	σ_a	σ_b	CP1	CP2	CP3	
TRf	31,90	32,90	33,60	32,80	32,30	34,10	33,20	0,50	9,96	32,40	31,60	31,10	32,70
T10%Cs	29,90	29,50	30,80	30,07	30,90	29,90	30,40	0,50	9,12	31,80	30,10	32,50	31,80
T20%Cs	28,60	29,00	28,90	28,83	29,50	28,90	29,20	0,50	8,76	29,50	30,70	31,40	30,20
T30%Cs	23,50	25,10	24,10	24,23	23,10	24,90	24,00	0,50	7,20	23,90	25,10	23,80	23,80

O gráfico representado na Figura 5.29 mostra a relação entre a resistência à compressão de 28 dias e o módulo de elasticidade estático. Os resultados apresentam uma boa correlação entre ambos os ensaios para todas as misturas do concreto.

Figura 5.29 - Resultados médio entre a resistência à compressão axial e módulo de elasticidade estático aos 28 dias.



Observa-se que para uma relação de a/c de 0,53, apresenta uma redução dos valores do módulo de elasticidade estático para todas as misturas que contém resíduo da lama de marmoraria em substituição ao peso do cimento (T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs), porém cabe destacar que para as misturas que contém 10% e 20% deste resíduo apresentam uma variação insignificante comparada com o concreto de referência, podendo levar em consideração a erros de ensaio.

No entanto, a substituição de 10% do peso do cimento (T10%Cs) mostra um resultado de rigidez melhor em relação as outras misturas, obtendo uma redução de aproximadamente 2,75% comparado com o concreto de referência. O mesmo ocorre para o traço (T20%Cs) onde ocorre uma queda de rigidez de 8%.

Nota-se que à medida que aumenta o percentual de resíduo, o resultado do módulo de elasticidade estático diminui. E com o aumento desse percentual de resíduo de 10% para 30%, o módulo de elasticidade reduziu de 31,80 GPa para 23,80 GPa. Esta é uma redução significativa da rigidez podendo ser devido a redução do teor do cimento pelo resíduo.

Segundo Melo Neto e Helene (2002), o consumo do cimento influencia diretamente no módulo de elasticidade do concreto. Esta influência pode estar ligada a duas situações, em manter constante o fator a/c e elevando assim o consumo do cimento, dessa forma acarreta uma redução no valor do módulo de elasticidade. A segunda situação é que mantendo constante o abatimento, e aumentando o consumo do cimento, ocorre um aumento no valor do módulo de elasticidade em função da redução do fator a/c.

O módulo de elasticidade para todas as misturas que passa pela substituição parcial do peso do cimento mostra uma redução progressiva de rigidez comparado com o concreto de referência (sem resíduo). Principalmente à medida que o percentual do resíduo é maior em substituição ao peso do cimento, o valor da rigidez decresce. Fatos estes apresentam algumas semelhanças com estudos de BACARJI *et al.*, 2013; GENCEL *et al.*, 2012; RANA *et al.*, 2016; RODRIGUES *et al.*, 2015.

Portanto, observa-se que todas as misturas apresentam um módulo de elasticidade inferior ao módulo de elasticidade do concreto de referência, especificamente o traço T30%Cs, pois obteve o pior resultado em comparação com

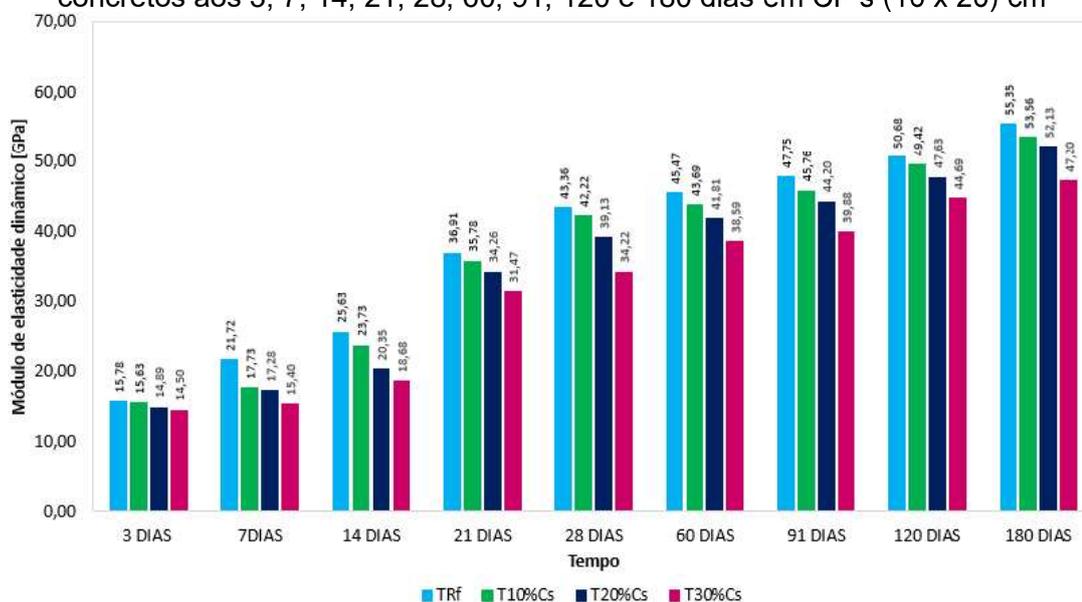
as demais misturas, resultando uma queda de rigidez de 27% em relação ao concreto de referência (sem resíduo). Fato este pode ser devido ao abatimento do concreto que demonstrou a necessidade de água para uma melhor adensamento e trabalhabilidade.

Na Tabela 5.29 mostra-se a média dos resultados nas idades 3, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 120 e 180 dias em relação ao ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das misturas dos traços (TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs). Na Figura 5.30 apresenta-se o gráfico dos resultados.

Tabela 5.29 - Média dos resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico em CP's (10 x 20) cm

Nomenclatura	3 DIAS [GPa]	7DIAS [GPa]	14 DIAS [GPa]	21 DIAS [GPa]	28 DIAS [GPa]	60 DIAS [GPa]	91 DIAS [GPa]	120 DIAS [GPa]	180 DIAS [GPa]
TRf	15,78	21,72	25,63	36,91	43,36	45,47	47,75	50,68	55,35
T10%Cs	15,63	17,73	23,73	35,78	42,22	43,69	45,76	49,42	53,56
T20%Cs	14,89	17,28	20,35	34,26	39,13	41,81	44,20	47,63	52,13
T30%Cs	14,50	15,40	18,68	31,47	34,22	38,59	39,88	44,69	47,20

Figura 5.30 - Resultados médio do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico dos concretos aos 3, 7, 14, 21, 28, 60, 91, 120 e 180 dias em CP's (10 x 20) cm



Analisando os valores apresentados na Figura 5.30, os resultados médios obtidos do módulo de elasticidade dinâmico 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 demonstra aumento.

Em contrapartida, o aumento do teor do resíduo da lama de marmoraria em substituição parcial do peso do cimento reduz o valor do módulo, apresentando assim resultados inferiores ao do concreto de referência (TRf), do mesmo modo como na resistência à compressão.

Entre as idades 3 e 28 dias, os traços T10%Cs, T20%Cs e T30%Cs apresentam um ganho médio de aproximadamente 61% no valor do módulo de elasticidade dinâmico para todas as misturas que contém resíduo. Posteriormente, nas idades entre 28 dias e 180 dias, as mesmas misturas apresentam um ganho, porém menor de 21%, 25% e 28%, respectivamente.

Na idade de 28 dias, essas misturas apresentam uma redução de rigidez em torno de 3%, 10% e 21% em relação ao concreto de referência, sendo o valor máximo de 42,22 GPa para o traço T10%Cs de substituição e valor mínimo de 34,22 GPa para o T30%Cs, enquanto registrado o valor de rigidez de 43,36 GPa no concreto de referência.

O mesmo ocorreu para idade de 180 dias, registrando uma queda de rigidez em torno de 3%, 6% e 15%, onde essas misturas registram um valor máximo de 53,56 GPa e valor mínimo de 47,20 GPa para o traço T30%Cs, enquanto que o concreto de referência registra 55,35 GPa.

Tanto no módulo de elasticidade estático quanto no módulo de elasticidade dinâmico, nota-se que todas as misturas que contém resíduo apresentam valores menores comparado com o concreto de referência.

Cabe ressaltar que os resultados do módulo de elasticidade dinâmico correspondem a uma deformação muito pequena, em torno de 20% a 40% maior em relação ao módulo estático para as misturas de concreto. Fato este corrobora conforme citado por Mehta e Monteiro (2014), demonstrado na revisão bibliográfica.

Comportamentos semelhantes dos resultados encontrados podem ser identificados nos trabalhos de Khodabakhshian *et al.* (2018); Melo (2016); Nobrega *et al.* (2014); Rodrigues *et al.* (2015); Singh *et al.* (2017) e Uliana *et al.* (2015).

Correlação entre a resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico

A Tabela 5.30 apresenta os resultados médios da resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade dinâmico e estático para todos os traços de concreto nas idades 28 e 180 dias.

Tabela 5.30 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias (a) e 180 dias (b).

MÉDIA DOS VALORES DAS AMOSTRAS - 28 DIAS			MÉDIA DOS VALORES DAS AMOSTRAS - 180 DIAS		
Nomenclatura	Resistência à compressão axial [MPa]	Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]	Nomenclatura	Resistência à compressão axial [MPa]	Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]
TRf	32,65	43,36	TRf	38,10	55,35
T10%Cs	29,80	42,22	T10%Cs	33,38	53,56
T20%Cs	27,45	39,13	T20%Cs	32,05	52,13
T30%Cs	23,65	34,22	T30%Cs	25,35	47,20

(a)

(b)

Diante das condições analisadas, as Figuras 5.31 e 5.32 representam os gráficos de correlação entre a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade dinâmico e estático para todas as misturas nas idades de 28 dias e módulo de elasticidade dinâmico na idade de 180 dias.

Figura 5.31 - Correlação: resistência à compressão axial x módulo de elasticidade dinâmico e estático das misturas TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs aos 28 dias.

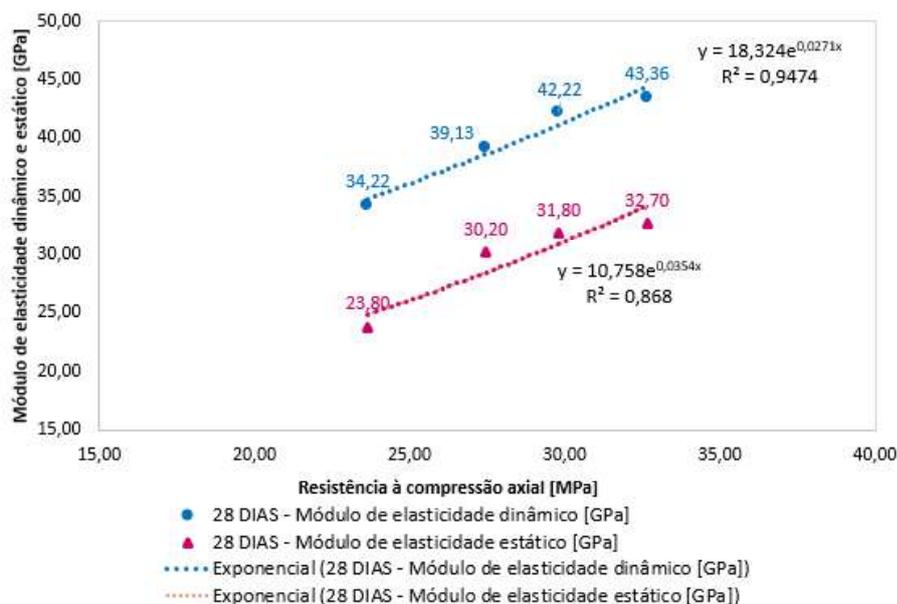
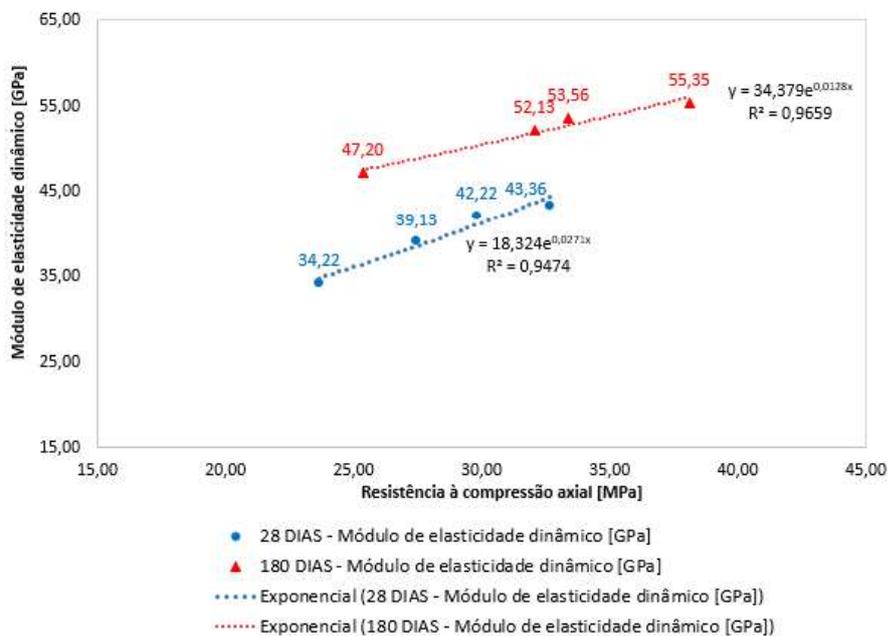


Figura 5.32 - Correlação: resistência à compressão axial x módulo de elasticidade dinâmico das misturas TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs nas idades 28 e 180 dias.



A partir dos resultados obtidos em relação a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias e 180 dias demonstram o $R^2 = 0,9474$ e $R^2 = 0,9659$, respectivamente. E para o módulo de elasticidade estático apresentam $R^2 = 0,868$ aos 28 dias. Os altos valores de correlação confirmam que as propriedades estão relacionadas.

Observa-se uma similaridade de comportamento ao registrar uma redução no valor da resistência à compressão quanto no valor do módulo de elasticidade dinâmico e estático à medida que aumenta o percentual de resíduo na mistura em substituição parcial ao peso do cimento comparado com o concreto de referência. Essa ocorrência pode ser devido ao progresso de hidratação da pasta. Estudo de Rodrigues *et al.* (2015) apresenta uma relação de comportamentos similares.

Geralmente, o módulo de elasticidade é análogo aos resultados de resistência à compressão (SINGH *et al.*, 2017). Para tanto, pode ser observado de forma geral uma tendência similar comparada com resultados da resistência à compressão entre as dosagens que contém mistura do resíduo.

Molin (1995) informa que o módulo é influenciado pela força das ligações e pelo empacotamento dos cristais e conclui que o efeito filer foi essencial na manutenção do módulo quando houve redução do cimento.

5.3.6 Absorção de água por imersão

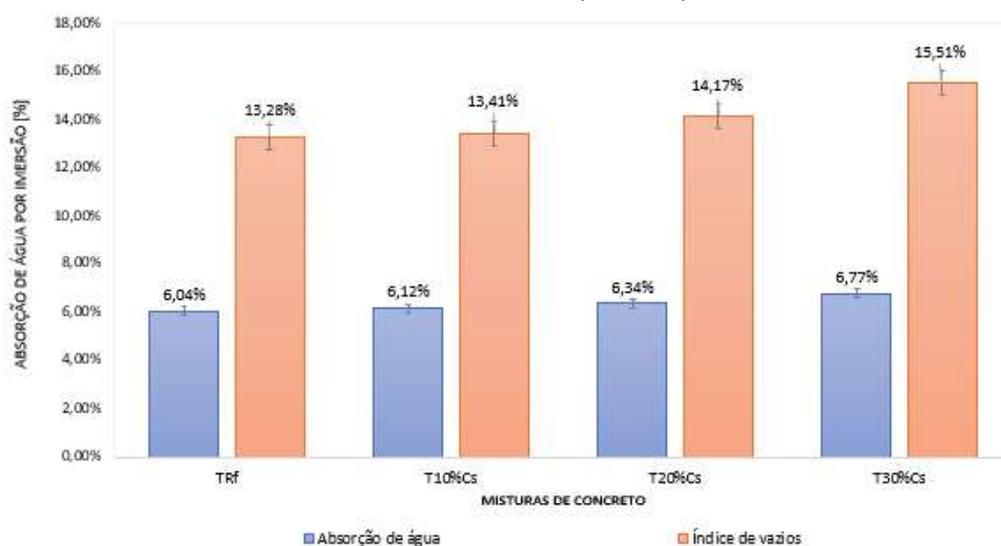
A realização do ensaio aos 60 dias, permitiu avaliação das propriedades de absorção de água por imersão, índice de vazios e das massas específicas dos quatro traços de concretos produzidos (TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs). Esta propriedade caracteriza a porosidade aberta da matriz do cimento. Para tanto, a água absorvida por um concreto é um bom indicador para a durabilidade e qualidade.

Os resultados obtidos consistem na média de 3 amostras para cada traço de concreto avaliado e estão apresentados na Tabela 5.31 e nas Figuras 5.33 e 5.34.

Tabela 5.31 - Média dos resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 60 dias em CP's (10 x 20) cm

Nomenclatura	Absorção de água [%]	Índice de vazios [%]	Massa espec. Seca [g/cm ³]	Massa espec. Saturada [g/cm ³]	Massa espec. Real [g/cm ³]
TRf	6,04	13,28	2,20	2,33	2,54
T10%Cs	6,12	13,41	2,19	2,33	2,53
T20%Cs	6,34	14,17	2,24	2,38	2,61
T30%Cs	6,77	15,51	2,29	2,45	2,71

Figura 5.33 - Resultados médio do ensaio de absorção por imersão e índice de vazios aos 60 dias em CP's (10 x 20) cm



A partir da análise dos resultados médios apresentados acima, observa-se que a incorporação do resíduo da lama de marmoraria em substituição parcial ao peso do cimento Portland no concreto aumenta as propriedades de absorção de

água por imersão e o índice de vazios para todos os casos analisados em comparação com o concreto de referência (sem resíduo).

O uso do resíduo da lama de marmoraria em substituição ao peso do cimento na mesma proporção implica nas duas propriedades que contribui na qualidade do concreto analisado. Esta influência está diretamente relacionada ao refinamento da estrutura de poros da pasta hidratada.

Esse comportamento pode ser explicado devido ao aumento da área superficial do material por possuir partículas finas que necessitam de água e possivelmente pela pequena dificuldade de adensamento, apresentando uma consistência menos fluida, especialmente no concreto com teor de 30%, ocasionando o aumento de poros de ar aprisionado, o que representa uma queda tanto na resistência mecânica quanto no módulo de elasticidade.

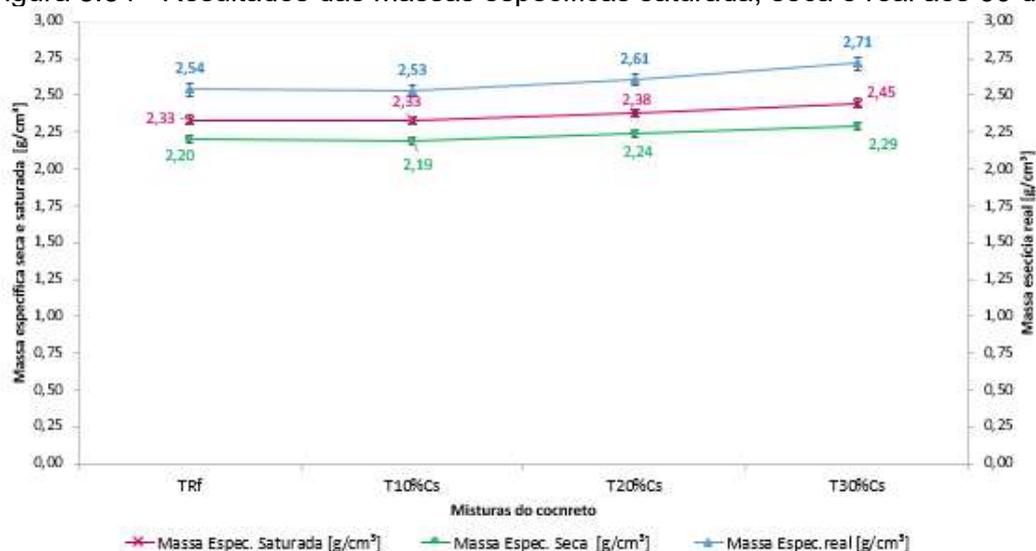
Resultados corroboram com os encontrados nos trabalhos de BACARJI *et al.*, 2013; BASTOS, 2014; DIETRICH *et al.*, 2017; MASHALY *et al.*, 2018; TOPÇU; *et al.*, 2009.

Destaca-se que quando o resíduo é aplicado como substituto parcial do cimento, a quantidade de água absorvida pelos concretos executados tende a aumentar. Conforme Mehta e Monteiro (2014), uma consistência menos fluida pode ocasionar o aumento de poros de ar aprisionado, fazendo com que a resistência do concreto possa apresentar uma redução.

A absorção máxima com o uso de resíduos é de 6,77%, resultados estes obtidos vão ao encontro de Gencil *et al.* (2012) e do que afirma Neville (2015), um concreto de boa qualidade, apresenta uma absorção abaixo de 10%. Baixos valores de absorção indicam que íons agressivos terão dificuldades de penetrar no concreto e a mesma autora aborda que quanto maior a porosidade, menor a resistência do concreto.

Os valores obtidos para o percentual de índice de vazios apresentam o mesmo procedimento para a absorção dos concretos, ou seja, a medida que o percentual de resíduo aumenta em substituição ao cimento, o índice de vazios representa crescimento, enquanto que o concreto de referência apresenta menor índice de vazios.

Figura 5.34 - Resultados das massas específicas saturada, seca e real aos 60 dias



Observa-se na Figura 5.34 que os concretos com maior teor de resíduo da lama de marmoraria apresentam maiores massas específicas mantendo constante a relação água/cimento. Ocorre que essa relação pode estar diretamente associada com a estrutura de poros do concreto, que acarreta em uma massa mais densa, apresentando uma maior massa específica real.

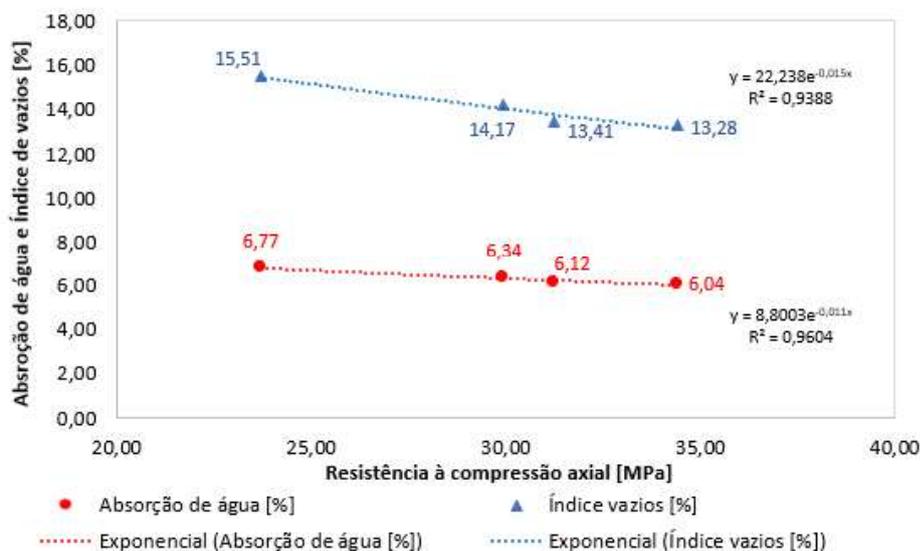
Correlação entre a resistência à compressão axial e absorção de água por imersão

A Tabela 5.32 e a Figura 5.35 abrange a correlação entre os resultados médios de resistência à compressão e absorção de água por imersão na idade de 60 dias, para os traços de concretos TRf, T10%Cs, T20%Cs, T30%Cs.

Tabela 5.32 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão e absorção de água por imersão em 72 horas aos 60 dias

MÉDIA DOS VALORES DAS AMOSTRAS - 60 DIAS			
Nomenclatura	Resistência à compressão axial [MPa]	Absorção de água [%]	Índice vazios [%]
TRf	34,40	6,04	13,28
T10%Cs	31,25	6,12	13,41
T20%Cs	29,95	6,34	14,17
T30%Cs	23,70	6,77	15,51

Figura 5.35 - Correlação: resistência à compressão x absorção de água por imersão em 72 horas aos 60 dias



A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se dizer que a resistência à compressão e a absorção de água por imersão dos concretos estão inversamente relacionados. Para a idade de 60 dias, o T10%Cs apresenta maior resistência à compressão (31,25 MPa) e o menor percentual de absorção de água (6,12%) comparado com os percentuais T20%Cs que apresenta uma resistência de 29,95 MPa e absorção de água 6,34% e T30Cs% que registra uma resistência de 23,70 MPa e um percentual de absorção de água de 6,77%.

Em relação ao aumento no percentual de substituição, observa que há uma redução na resistência à compressão, que por sua vez, constata um aumento do percentual de absorção de água. Neville (2015) destaca que quanto maior a porosidade da matriz cimentícia, menor a resistência do concreto, apresentando uma relação inversamente entre si. Mehta e Monteiro (2014) em relação a durabilidade, acrescentam que valores baixos de absorção apontam que íons agressivos podem encontrar dificuldades de penetração no concreto e salientam que quanto maior o índice de vazios, menor a resistência à compressão.

Resultados encontram divergentes com estudos de Aliabdo *et al.* (2014), pois a porosidade do concreto aumentou com o aumento do teor do resíduo de lama de marmoraria em substituição parcial do peso do cimento.

5.3.7 Absorção de água por capilaridade

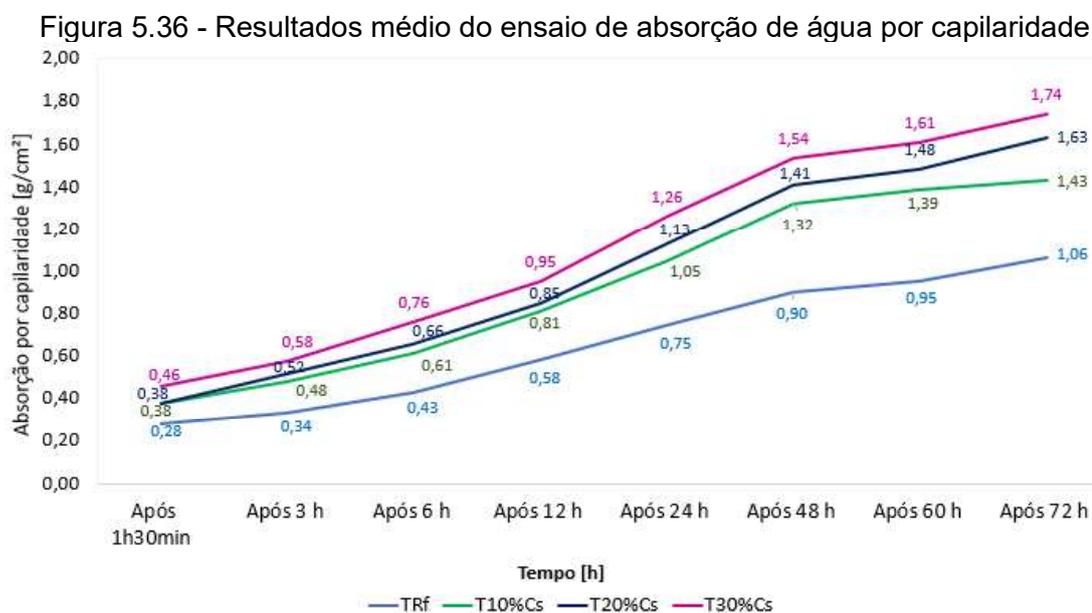
O ensaio consiste em determinar a permeabilidade do concreto, em uma medição direta da quantidade de água absorvida por unidade de área durante um período de exposição, sendo um importante indicador de durabilidade do concreto. Foram empregados 3 corpos de prova para cada traço especificado aos 60 dias, conforme descrito pela norma NBR 9779 (ABNT, 2012).

A Tabela 5.33 exhibe os valores médios de absorção de água por capilaridade obtidos através das medições após 90min, 3h, 6h, 24h, 48h, 60h e 72h, sendo mostrado também a altura média que a água atingiu nos corpos de prova de (10 x 20) cm.

Tabela 5.33 - Média dos resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade

Nomenclatura	Absorção capilar média [%]								Ascensão capilar [cm]	Resistência [MPa]
	Após 90 min	Após 3 h	Após 6 h	Após 12 h	Após 24 h	Após 48 h	Após 60 h	Após 72 h		
TRf	0,28	0,34	0,43	0,58	0,75	0,90	0,95	1,06	8,33	2,22
T10%Cs	0,38	0,48	0,61	0,81	1,05	1,32	1,39	1,43	9,40	2,17
T20%Cs	0,38	0,52	0,66	0,85	1,13	1,41	1,48	1,63	9,33	2,03
T30%Cs	0,46	0,58	0,76	0,95	1,26	1,54	1,61	1,74	9,17	1,76

A Figura 5.36 aborda o gráfico que demonstra a evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do período para cada mistura, resultando em uma maior absorção na fase inicial do ensaio.



Em relação aos resultados médios obtidos, nota-se uma tendência de crescimento das curvas que leva a uma possível continuidade do processo de absorção em todas as amostras da pesquisa. Os resultados analisados apontam um aumento de absorção de água à medida que aumenta o percentual de resíduo da lama de marmoraria em pó e diminui a quantidade proporcional de cimento na mistura comparado ao concreto de referência.

Observa-se um aumento de absorção para as misturas que contém resíduo, registrando cerca de 35% (T10Cs), 35% (T20%Cs) e 39% (T30%Cs) comparado ao concreto de referência (TRf). Em relação ao teor de adição do resíduo, o traço de referência apresentou uma absorção total de 1,06 g/cm², enquanto que nos traços de substituição parcial do peso do cimento no teor de 10%, 20% e 30%, registraram 1,74 g/cm²; 1,63 g/cm² e 1,43 g/cm² respectivamente, após 72 horas de imersão na lâmina de água.

Ocorre que, como observado nas literaturas apresentadas na revisão bibliográfica, a adição do resíduo na mistura resulta em um aumento na demanda de água necessária por apresentar uma quantidade elevada de finos, podendo contribuir como preenchimento dos poros nas matrizes cimentícias e distribuição dos vazios. Resultados semelhantes podem ser encontrados nos trabalhos de BACARJI *et al.*, 2013; BASTOS, 2014; COLANGELO *et al.*, 2010; MASHALY *et al.*, 2018; TOPÇU *et al.*, 2009.

Conforme mostrado na Figura 5.36, os resultados da absorção de água por capilaridade apresentam comportamentos semelhantes ao da absorção de água por imersão, onde a absorção de água das misturas tanto aumenta com o aumento do teor de porcentagem do resíduo em substituição ao peso do cimento.

Os resultados obtidos no ensaio de capilaridade não indicam que o uso do resíduo de lama de marmoraria não altera suas características quanto à absorção, mas corrobora o entendimento proposto segundo Coutinho (1994 apud Gonçalves, 2000), da qual uma quantidade elevada de finos, sem atividade pozolânica, favorece o aumento da absorção capilar, o que pode colaborar para os resultados encontrados neste ensaio.

Identifica uma altura de água no interior de cada amostra rompida onde atingiu uma altura mínima de 9,17cm para a mistura com 10% de substituição

parcial do cimento e altura máxima de 9,40 cm para o que contém um teor maior de resíduo.

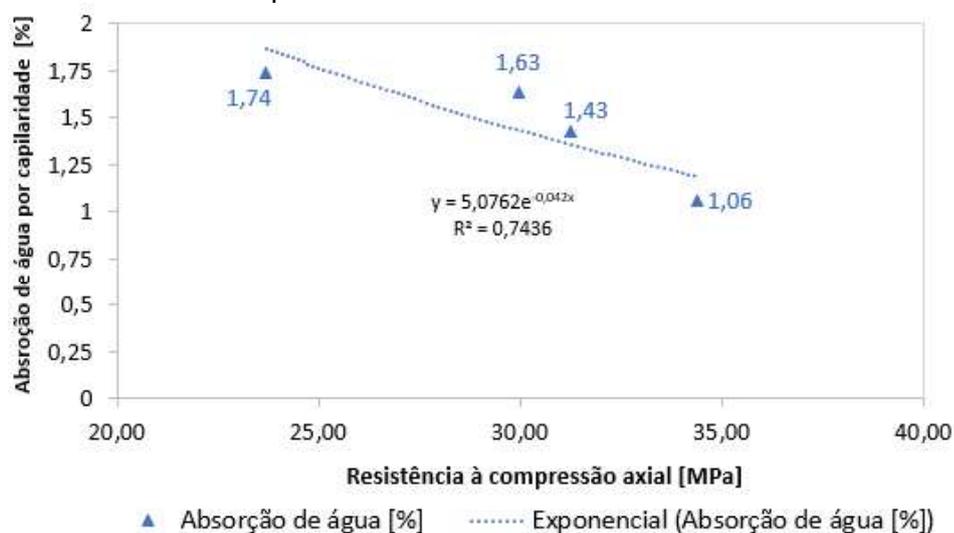
Correlação entre a resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade

Na Tabela 5.34 e na Figura 5.37 apresenta-se a correlação entre os resultados médios de resistência à compressão e absorção de água por imersão na idade de 60 dias, para os traços TRf, T10%Cs, T20%C, T30%Cs.

Tabela 5.34 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade por 72 horas aos 60 dias

MÉDIA DOS VALORES DAS AMOSTRAS - 60 DIAS		
Nomenclatura	Resistência à compressão axial [MPa]	Absorção de água [%]
TRf	34,40	1,06
T10%Cs	31,25	1,43
T20%Cs	29,95	1,63
T30%Cs	23,70	1,74

Figura 5.37 - Correlação: resistência à compressão axial x absorção de água por capilaridade em 72 horas aos 60 dias



A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se dizer que a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade dos concretos estão inversamente relacionados. Comportamentos semelhantes apresentaram nos resultados de absorção de água por imersão. Para a idade de 60 dias, o T10%Cs apresenta maior resistência à compressão de 31,25 MPa e o menor absorção de água por capilaridade de 1,43 g/cm² comparado com o traço T20%Cs que

apresenta uma resistência à compressão axial de 29,95 MPa e absorção de água 1,63 g/cm² e T30Cs% que registra uma resistência de 23,70 MPa e um percentual de absorção de água de 1,74 g/cm².

5.3.8 Comparação dos resultados do estudo com especificações das normas de peças de concreto de pavimentação

A construção civil é um setor que impacta em vários segmentos, seja em relação ao descaso da exploração de recursos e/ou descarte dos mesmos.

A inserção do uso do resíduo da lama de marmoraria (em pó) em substituição parcial do peso do cimento na mesma proporção pode favorecer diversos benefícios, como a redução nas emissões de gases poluentes, produção de novos materiais para o setor da construção civil, bem como uma produção própria em pequenas comunidades como a fabricação de blocos, pavers, bancos e outros tipos de produtos, devido à facilidade do processo.

A utilização de resíduos na fabricação de peças de pavimentação ou outros fins pode gerar um grande potencial, podendo ser empregados em calçadas, condomínios, pátios de empresas, escolas, praças e prefeituras, ruas de baixo movimento, auxiliando na produção de materiais alternativos de baixo custo quando comparado aos materiais convencionais, substituindo uma porcentagem do peso do cimento pelo resíduo de lama de marmoraria.

Esse processo pode ser uma alternativa para minimizar o problema ambiental, podendo contribuir na redução do descarte irregular ou em áreas de disposição, em virtude do crescente volume de resíduos processados e descartados a cada ano e diante da escassez de áreas destinadas aos aterros, principalmente em grandes regiões metropolitanas. Pode propiciar também pela redução da emissão de CO₂ na atmosfera e consumo da demanda do cimento.

As especificações de resistência à compressão geralmente são estabelecidas para períodos de cura de 28 dias. Dessa forma, na Tabela 5.35, para fins de comparação, a análise dos resultados obtidos aos 28 dias apresenta as

especificações conforme parâmetros estabelecidos de alguns países em relação a norma para avaliação mecânica de pavers.

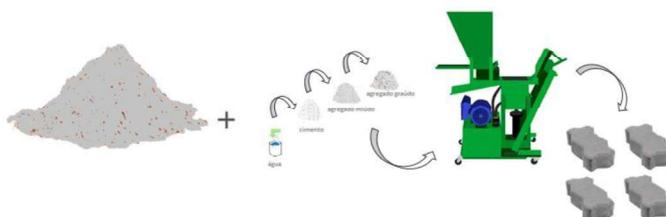
Tabela 5.35 - Especificações de norma para avaliação mecânica de pavers

NORMA		PARÂMETRO
Americana	ASTMC936:1996	Resistência à compressão $\geq 55,0$ MPa e absorção (valor médio $\leq 5,0\%$)
África do Sul	SANS 1058:2008	Resistência à compressão ≥ 25 MPa e tensão de tração de 2,2 MPa (tráfego leve e de pedestres) Resistência à compressão ≥ 35 MPa e tensão de tração de 2,8 MPa (tráfego pesado) e absorção (valor médio $\leq 6,5,0\%$)
Austrália	AS/NZS 4456.4:2003	Resistência à compressão: 25 a 60 MPa
Brasileira	NBR 9781:2013	Resistência à compressão ≥ 35 MPa (solicitação de veículos comerciais, ou de linha) Resistência à compressão ≥ 50 MPa (tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão) e absorção (valor médio $\leq 6,0\%$)
Canadense	CSA A231-2-95:1995	Resistência à compressão ≥ 50 MPa
Europeia	BS EM-1388:2003	Utiliza o ensaio de tração indireta com corpos de prova cilíndricos e absorção $< 6,0\%$

Analisando a Tabela 5.35 pode-se dizer que os traços estudados não conseguiram atingir o valor mínimo especificado pela norma Brasileira de 35 MPa. Entretanto, para os traços de referência (TRf), e de substituição de 10% (T10%Cs) e 20% (T20%Cs) atendem às especificações mínimas das normas da África do Sul e Austrália exigidas para tráfego leve, acima de 25 MPa aos 28 dias.

Porém, Fioriti (2007) manifesta que resistências de 15 MPa em blocos/pavers seriam suficientes para suportar cargas exercidas em praças, calçadas e locais com trânsito leve. Considerando o exposto acima, todos os traços poderiam ser aplicáveis para esta finalidade. Gencel *et al.* (2012) expõe em seu trabalho que a incorporação de resíduos de mármore fornece blocos de pavimentação de concreto com qualidade suficiente. A Figura 5.38 apresenta um desenho esquemático do processo de fabricação de pavers.

Figura 5.38 - Desenho esquemático do processo de fabricação de pavers



Fonte: Adaptado de Sahara Tecnologia

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises e os resultados médios obtidos apresentados neste trabalho abordam o uso do resíduo da lama de marmoraria desidratada (em pó) coletada em um tanque da empresa onde passou por um tratamento e resultou em uma redução da quantidade de água.

Esta lama é de origem distinta de rochas ornamentais, sendo recolhido este resíduo em semestres diferentes durante o mesmo ano, mostrando assim uma caracterização semelhante. Foram realizadas análises de granulometria, físicas, mineralógicas e pozolanicidade.

Uma pesquisa experimental foi realizada em que 10%, 20% e 30% do peso do cimento foi substituído pelo resíduo da lama de marmoraria, em pó, para a produção do concreto.

O desempenho mecânico e durabilidade foram realizados por meio de testes de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico e estático, resistividade elétrica superficial e volumétrica, absorção de água por imersão e capilaridade.

A partir da análise do estudo, as seguintes considerações podem ser apresentadas:

- A dimensão das partículas do resíduo em pó varia entre 1,05 μm a 20,17 μm , estabelecendo um $D_{\text{médio}}$ na ordem de 8,80 μm , sendo possível preencher a zona de transição, passando o material agir como um fíler;
- A área específica do resíduo da lama de marmoraria é de 5.987 m^2/g , sendo maior que a área do cimento CPV Ari de 4.906 m^2/g , o que indica que o resíduo possui partículas menores. A massa específica do resíduo resulta em 2,62 g/m^3 e a do cimento CPV Ari em 3,09 g/cm^3 , podendo dizer que o resíduo é mais leve comparado ao cimento;
- A lama de marmoraria coletada no tanque em semestres diferentes e no mesmo ano, apresenta alta porcentagem de finos e presença de quartzo (silicatos provenientes de ardósias, granitos e feldspatos), calcita, dolomita e hematita, a qual provém dos elementos abrasivos utilizados no corte das rochas da marmoraria;

- O comportamento apresentado pelos termogramas tanto do cimento quanto do resíduo demonstra que a temperatura atingida nas análises foi insuficiente para decompor a estrutura do material. Porém, é possível verificar que o tratamento térmico ao qual o resíduo foi submetido apresentou resultados satisfatórios, pois não há nenhum registro de perda de massa na faixa de temperatura de 100 ± 5 °C, o que apresentou eliminação de umidade. Afirma-se também que as amostras analisadas não apresentam matéria orgânica;
- Da perspectiva das características química, o resíduo da lama de marmoraria (em pó) possui uma estrutura cristalina e apresenta resultado qualitativo como elementos de Si, O (altos); Al, Fe, Ca, K, Mg, Na (médios) e Ti, Cr, Mn, P, S (baixos);
- O resíduo da lama de marmoraria não apresenta atividade pozzolânica;
- As consistências dos concretos produzidos com resíduo do pó da lama não permaneceram dentro do intervalo pré-estabelecido na etapa da dosagem (100 ± 20) mm, apresentando abatimentos menores (*slump*) do que o concreto de referência para uma mesma relação água/cimento;
- Há uma tendência de queda nas propriedades mecânicas e nos parâmetros de durabilidade com o aumento do teor de porcentagem do resíduo na mistura, porém à medida que aumenta a idade de cura das amostras de concreto, as mesmas propriedades demonstram um ganho nos resultados;
- A influência do resíduo da lama de marmoraria contribuiu para reduzir os resultados nas propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade;
- Na resistência à tração por compressão diametral os resultados apresentam um ganho nas idades 28 e 60 dias. Entretanto, os resultados mostram que há um decréscimo da resistência com a incorporação do resíduo;
- A incorporação do resíduo da lama de marmoraria em 10% e 20% de substituição ao peso do cimento parece consideravelmente não comprometer as propriedades mecânicas como a resistência à compressão e módulo de elasticidade, mas observa-se quanto maior a proporção de substituição do cimento pelo resíduo (em 30%), maior a redução da resistência e rigidez;
- Em relação a durabilidade, a adição do teor de porcentagem do resíduo na mistura em 10% e 20% em substituição ao peso do cimento parece não comprometer os

resultados de resistividade elétrica superficial e volumétrica, mesmo apresentando uma queda em comparação ao concreto de referência;

- Apresenta uma similaridade de valores médios de resistividade elétrica volumétrica em todas as idades entre os corpos de prova com dimensões (10 x 20) cm e (15 x 30) cm. Porém, o mesmo não acontece nos resultados de resistividade elétrica superficial;

- Pode-se dizer que a resistividade elétrica superficial é significativamente maior que a resistividade elétrica volumétrica para todas as idades analisadas. E que tal comportamento demonstra que superficialmente o concreto encontra protegido da corrosão do que internamente, na qual estabelece que a umidade tende a permanecer constante em um intervalo de tempo maior;

- Observa-se que nas primeiras idades a resistividade elétrica volumétrica apresenta valores baixos, porém a mesma cresce com o tempo, devido à hidratação do cimento e endurecimento progressivo do concreto. Comportamentos semelhantes ocorrem para corpos de prova (10 x 20) cm e (15 x 30) cm;

- Houve um aumento de percentual de absorção de água e índice de vazios em comparação ao concreto de referência, sendo potencializados devido o aumento do teor do resíduo na mistura;

- Pode-se dizer que a resistência à compressão axial e a absorção de água dos concretos são propriedades inversamente relacionadas;

- Houve boa correlação entre as propriedades para todas as misturas do concreto.

- Mesmo sendo observado um ganho maior de resistência nas primeiras idades de cura, constata-se uma redução da quantidade de porcentagem de cimento, adição do resíduo na massa do concreto e utilização de agregado miúdo artificial, e ainda sim a resistência para todos os corpos de prova não apresentou perda;

- Todavia, este resíduo da lama de marmoraria recolhido no tanque da empresa é formado por diferentes tipos de rochas e apresenta um ganho de resistência acima de 25 MPa aos 28 dias para as misturas de 10% e 20%;

- Os traços estudados não conseguiram atingir o valor mínimo especificado de 35 MPa pela norma Brasileira para peças de concreto de pavimentação. Entretanto, para os traços de referência (sem resíduo) e traços de substituição do peso do

cimento pelo resíduo da lama de marmoraria em 10% e 20% atendem às especificações mínimas das normas da África do Sul e Austrália exigidas para tráfego leve, acima de 25 MPa aos 28 dias;

- A partir do estudo realizado, tendo em conta razões ambientais e econômicas, pode-se dizer que o uso do resíduo da lama de marmoraria como adição mineral em concreto pode ser viável, levando em consideração a uma redução das emissões de efeito estufa e esgotamento dos recursos naturais na produção do concreto (maior aproveitamento de resíduos, redução do consumo do cimento e resistência adequada), contribuindo com a utilização do resíduo industrial, reduzindo custos com descartes e aterros sanitários, incentivando práticas sustentáveis como a reciclagem de um produto sustentável no mercado para a construção civil, bem como propiciando um destino final e adequado ao resíduo.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Realizar os mesmos ensaios, porém utilizar o resíduo pelo processo de moagem e após tratamento térmico acima de 100° C, podendo atuar como pozolanas.
- Estudar a microestrutura das pastas com resíduo da lama de marmoraria a partir do beneficiamento à úmido de diferentes tipos de rochas ornamentais;
- Estudar o comportamento do resíduo de granito x mármore x diferentes tipos de rochas ornamentais e comparar na resistividade elétrica superficial e volumétrica;
- Inferir em diferentes idades os ensaios de resistência à compressão e resistividade elétrica utilizando a lama de marmoraria com diferentes relações a/c;
- Estudar o comportamento do resíduo com utilização de aditivo na massa do concreto utilizando porcentagens como substituição ou adição ao cimento e agregado miúdo;
- Realizar ensaios em concretos com diferentes tipos de cimento e incorporar a lama de marmoraria, de forma a correlacionar os valores obtidos de resistividade elétrica, módulo de elasticidade e resistência à compressão.

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

AASHTO – American Association Of State Highway And Transportation Officials. AASHTO TP 95: **Standard method of test for surface resistivity of concrete's ability to resist chloride ion penetration**, 2011.

AASHTO – American Association of State and Highway Transportation Officials. T358-17: **Standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration**, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 10 p., 2017.

ABIFA: CEMP 137 – **Materiais para fundição – Determinação da massa específica pelo uso do frasco volumétrico de “Le Chatelier” em materiais granulares** – Método de ensaio, revisada em novembro, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 936**: Standard specification for solid concrete interlocking paving units, Conshohocken, Pennsylvania, USA, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 57**: Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. West Conshohocken, Philadelphia, 5p, 2006.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland – Determinação da massa específica Rio de Janeiro, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 24**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregado – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**: Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. RJ, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251:** Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802:** Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9202:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (número 325), Rio de Janeiro, 1985.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9204:** Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica volumétrica – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781.** Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. RJ, 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001**: Sistema de gestão ambiental: requisitos com orientações para uso. ed 2. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n 200) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12127**: Gesso para construção civil – Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15012**: Rochas para revestimentos de edificações – Terminologia. 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: Aplicação de agregados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (método de Blaine) Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION, **CSA A231-2-95**: Precast Concrete Pavers, CSA, Rexdale, Ontario. 1995.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION CEN/TC 178, **EN1338 N204E**. “Concrete Paving Blocks, Requirements and Test Methods”, Brussels, Belgium, 1996.

NORMA FRANCESA. NF P 18-513 - Pozzolanic Addition For Concrete Metakaolin - Definitions, Specifications And Conformity Criteria. 2010.

SOUTH AFRICA NATIONAL STANDARDS, **SANS 1058**: Standard Specification of Concrete Paving Blocks, 2008.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Guia de aplicação de rochas em revestimentos**. Projeto Bula / Cid Chiodi Filho; Elenco de Paula Rodrigues. São Paulo, 2009.
- ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Designação comercial das rochas ornamentais e classificação fiscal de seus produtos**. Informe 04/2018. Brasília, 2018.
- ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **O setor brasileiro de rochas ornamentais**. Informe 05/2018. Brasília, 2018.
- ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balanco das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2018**. Informe 01/2018. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/03/Informe-01-2018-Balanco-2017.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2018.
- ABREU, A. G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- ABUKERSH, S. A., FAIRFIELD, C. A. **Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement**. *Construction and Building Materials*, v. 25, n.10, pp.4088-4094, 2011.
- AL-AKHRAS, N. M.; ABABNEH, A.; ALARAJI, W. A. **Using burnt stone slurry in mortar mixes**. In: *Construction and Building Materials*. v. 24, p. 2658-2663, 2010.
- ALGIN, H.M.; TURGUT, P. **Cotton and limestone powder wastes as brick material**. *Construction and Building Materials*, v. 22, Issue 6, pages 1074-1080, June 2008.
- ALIABDO, A. A.; ELMOATY, A. E. M. A.; AUDA, E. M. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 50, p.28-41, jan. 2014.
- ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; SANTOS, J. R. **Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures**. *ScienceDirect - Building and Environment*, v. 42, p. 810-819, 2007a.
- ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; BRITO, J. de; SANTOS, J. R. **High-performance concrete with recycled stone slurry**. *ScienceDirect – Cement and Concrete Research*, v. 37, p. 210-220, 2007b.
- ALVES M. S. **Estudo das Características e da Viabilidade do Uso de Resíduos Gerados no Polimento de Rochas Graníticas como Adição em Concretos**. Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- ALYAMAÇ, K. E.; AYDIN, A. B. **Concrete Properties Containing Fine Aggregate Marble Powder**. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 19, n.7, p.2208- 2216, 2015.
- ALYAMAÇ, K. E.; INCE, R. A Preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. In: **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 1201–1210, 2009.

ALZBOON, K. K.; MAHASNEH, K.N. Effect of using stone cutting waste on the compression strength and slump characteristics of concrete. In: **International Journal of Civil and Environmental Engineering**, v. 1, Issue 4, p. 168-173. Jordan: 2009.

AMARAL, P.G.Q; SICHIERI, E.P. Caracterização dos resíduos provenientes da indústria de rochas ornamentais para o seu reaproveitamento na construção civil. In. **III Simpósio sobre resíduos sólidos – III SIRS**. Núcleo de Estudo e Pesquisa em Resíduos Sólidos. p.1-8, 2013.

ANDRADE, C. Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcement by using the electrical resistivity. In. **International symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering**, RILEM. Proceedings. Evanston, p. 1-8, 2004.

ANDRADE, C.; D'ANDRÉA, R. La resistividade eléctrica como parâmetro de control del hormigón y de su durabilidad. **Revista ALCONPAT**, v.1, n. 2, p.93-101, 2011.

ANDRADE J.J.; TUTIKIAN B.F. Resistência Mecânica do Concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**, 1ª ed., v.1 p. 626 e 627, São Paulo: GC Isaias, 2011.

AREL, H. S. **Recyclability of waste marble in concrete production**. Journal of Cleaner Production, v. 131, p. 179-188, September, 2016.

ARUNTAS, H.Y.; GÜRÜ, M.; DAYI, M.; TEKIN, I. Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. **Materials & Design**, v. 31, n.8, p. 4039-4042. DOI:10.1016/j.matdes.2010.03.036, 2010.

ARSHAD, A.; SHAHID, I.; ANWAR, U.H.C.; BAIG, M.N.; KHAN, S.; SHAKIR. K. **The wastes utility in concrete**. International Journal of Environmental Reseach. v. 8, Issue 4, p. 1323-1328, ISSN: 1735-6865, Autumn 2014.

BACARJI, E.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E.A.B; FIGUEIREDO, E.P; LOPES, J.L.M.P. **Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers**. Construction and Building Materials, v. 45, p. 1-10, 2013.

BARBOSA, J.F.; COSTA, V.S. da; LIMA, M. R. P. **Avaliação da utilização de lama abrasiva gerada no beneficiamento de mármore e granito para a confecção de telhas de concreto**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 8, n. 1, 2013.

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.

BEUSHAUSEN, H. **Performance based specifications and control of concrete durability**, Rilem Report Star 230-DUC, v. 359, p. 90, ISBN 978-94-017-7308-9, September, 2015.

BLATT, H.; TRACY, R.; OWENS, B. **Petrology: Igneous, Sedimentary, and Metamorphic**, 3rd ed., Amazon, 2005.

BRAGA, Fd; BUZZI, DC; COUTO, Mcl; LANGE, LC. **Environmental Characterization of processing sludge of ornamental stones**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, Jul-Sep, ISSN 1413-4152, v. 15(3), p. 237-244, 2010.

BRASIL. **Política Nacional de resíduos sólidos**. Lei nº 12.305, 2 de agosto de 2010. 2ª edição – Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, ISBN 978-85-736-5972-6, 73p., 2012.

CHATTERJI, A. K.; PHATAK, T. C. Hydration of Portland Cement, **Nature International Journal of Science**, 207, p 711-713, 1965.

COLANGELO, F.; MARROCCOLI, M.; CIOFFI, R. Properties of self-levelling concrete made with industrial wastes. In: **RILEM proceedings pro**, v. 40, p. 580-589, 2010.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 113-117, 2010.

COUTINHO, Joana Sousa. **Betões eco-eficientes com resíduos**. In **1as Jornadas de Materiais de Construção**. Porto: FEUP, 2011.

CRUZ, M.D.R.; GALÁN, E. Mineralogy and origin of spots in spotted slate from maláguide complex, Betic Cordilleras, Spain: an XRD, EMPA and TEM-AEM study, **The Canadian Mineralogist**. v. 40, p. 1483-1503, 2007.

DIETRICH, Yustane Paula. **Durabilidade de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons cloreto**. Mestrado em Engenharia civil. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória/ES, 2015.

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.

DOTTO, J.M.R; ABREU, A.G.; DAL MOLIN, D.C.C.; MÜLLER, I.L. Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behavior of reinforcement bars. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 30-31, 2004.

ELMOATY, A.E.M. **Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust**. **Construction and Building Materials**, v.47, pp. 743-752, 2013.

FARIAS, U. M. S. M. **Produção de concreto autoadensável com uso de filer calcário de resíduo de serragem de pedra cariri**. Dissertação de mestrado. Departamento de ciências em engenharia civil e ambiental. Universidade Estadual de Feira de Santana – BA, 2017.

FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Guia técnico ambiental da indústria de rochas ornamentais** / Fundação Estadual do Meio Ambiente, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais – Belo Horizonte: FEAM; FIEMG, 60p., 2015.

FIORITI, Cesar F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. DOI: 10.11606/T.18.2007.tde-27092007-184727.

FRASCÁ, M.H.B.O. **Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento**. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, 2003: São Paulo.

GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Construction and Building Materials**, v.102, p.769-781, 2016.

GAMEIRO, F.; BRITO, J.; SILVA, C. **Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying**. Eng Struct, v. 59, n. 2, p. 654-62, 2014.

GAYARRE, F. L., PÉREZ, C. L., LÓPEZ, M. A. S., CABO, A. D. The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v.53, p. 260-266, 2014.

GAZI, A.; SKEVIS, G.; FOUNTIM, M. A. Energy efficiency and environmental assessment of a typical marble quarry and processing plant. **Journal of Cleaner Production**, v. 32, p. 10-21, September, 2012.

GENCEL, O.; OZEL, C.; KOKSAL, F.; ERDOGMUS, E.; MARTÍNEZBARRERA, G.; BROSTOW, W. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. **Journal of Cleaner Production**. v. 21, p. 62-70, 2012.

GHODS, P.; ISGOR, O. B., POUR-GHAZ, M. **A practical method for calculating the corrosion rate of uniformly depassivated reinforcing bars in concrete**. Materials and Corrosion, v. 58, n. 4, issue 4, p. 265-272, 2007. <https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1002/maco.200604010>

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

GHORBANI, S.; TAJI, I.; TAVAKKOLIZADEH, M.; DAVODI, A; BRITO, J. Improving corrosion resistance of steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 110-119, October., 2018.

GONÇALVES, J. P., I. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2000.

GONÇALVES, J. P., MOURA, W.A., DAL MOLIN, D.C.C. **Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto**. Ambiente Construindo, Porto Alegre, ISSN 1415-8876, v. 2, n.1, p. 53-68, jan/mar. 2002.

GHOSH, P.; TRAN, W. Influence of parameters on surface resistivity of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 62, p. 134-146, 2015.

HANIEH, A. A.; ABDELALL, S.; HASAN, A. Sustainable development of stone and marble sector in Palestine. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, p. 581-588, 2014.

HEBHOUB, H.; AOUN, H.; BELACHIA, M.; HOUARI, H.; GHORBEL E. Use of waste marble aggregates in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, Issue 3, p. 1167-1171, March, 2011.

HOPPE, Tiago Fernandes. **Resistividade Elétrica de Concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Dissertação de mestrado - UFSM, 150 p., Santa Maria, RS, 2005.

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.

ISAIA, G.C. A Água no Concreto. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, 1a ed. São Paulo, v.1 p. 326, 2011.

JÚNIOR, E.R. Propriedades dos materiais constituintes do concreto. **Revista online IPOG - Especialize**, v.1, dezembro, Goiânia, 2015.

KALLA, P.; MISRA, A.; GUPTA, R.C.; CSETENVI, L.; GAHLOT, V.; ARORA, A. Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite – fly ash combination. In: **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1142-1150, 2013.

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.

KIHARA, Y. **Contribuição ao estudo de pozolanas no Brasil**. In: XXV Congresso Brasileiro de Cerâmica, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

KOU, S., POON, C., AGRELA, F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with addition of different mineral admixtures. **Cement & Concrete Composites**, v.33, n.8, p.788-795, 2011.

LANGSCH, J. E.; CARRISSO, R. C. C.; PEITER, C. C. Tratamento do efluente proveniente do corte de rochas ornamentais. **Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, v. 23, p. 65-70, Gramado/RS. Anais. Porto Alegre: 2009.

LAWRENCE P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v.33, p.1939-1947. 2003.

LENCIONI, J. W.; LIMA, M. G de. **Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto – Estado-da-Arte**. CINPAN - VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, Córdoba/Argentina, Junho, 2010.

LENCIONI, J. W. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios**. Tese (Doutorado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, Brasil, 2011.

LI, L.G; HUANG, Z.H.; TAN, Y.P.; KWAN, A.K.H.; CHEN, H.Y. Recycling of marble dust as paste replacement for improving strength, microstructure and eco-friendliness of mortar. **Journal of Cleaner Production**, v.210, p.55-65, 2019.

LIMA, Rosa do Carmo de Oliveira. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduos de granito**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande – Centro Tecnológico de Recursos Naturais. Campina Grande, 2010.

LÜBECK, A. **Resistividade elétrica de concretos de cimento Portland branco e elevados teores de escória de alto forno**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2008.

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

MAGACHO, I; SILVA, R. B.; BRAGA, F; S.; PREZOTTI, J. C. S. **Identificação e gerenciamento dos resíduos gerados em empresas de beneficiamento de rochas ornamentais localizadas no município de Nova Venécia/ES - Brasil**. XXX Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ambiental - AIDIS. Punta Del Este – Uruguay, 2006.

MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização e classificação de resíduo sólido de “pó de rocha granítica” gerado na indústria de rochas ornamentais**. Química Nova, vol. 31, n. 6, 1301-1304p, 2008.

MARRAS, G.; BORTOLUSSI, A.; PERETT, R.; CAREDDU, N. Characterization methodology for re-using marble slurry in industrial applications. **ScienceDirect**, Energy procedia, v. 125, p. 656-665, 2017.

MÁRMOL, I.; BALLESTER, P.; CERRO, S.; MONRÓS, G.; MORALES, J.; SÁNCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 617- 622, 2010.

MASHALY, A.O; EL-KALIOUBY, B.A; SHALABY, B.N. EL-GOHARY, A.M; RASHWAN, M.A. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. **Journal Cleaner Production**, v. 112, p. 731-741, 2016.

McCARTER, W J.; TAHA, H.; SURYANTO, B.; STARRS, G. **Two-point concrete resistivity measurements: interfacial phenomena at the electrode–concrete contact zone**. Measurement Science And Technology, [s.l.], v. 26, n. 8, p.85-98. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/26/8/085007>, 10 jul. 2015.

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.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista ALCONPAT**, v. 4, n. 2, p 116-132, 2014.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª.edição. Ed. IBRACON. ISBN.: 978-85-98576213. São Paulo, 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.

MELO NETO A. A.; HELENE, Paulo R. L. Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade de Concretos, **44º Congresso Brasileiro de Concreto, IBRACON**, Belo Horizonte/MG, 2002.

MITTRI, S.H.M; VIEIRA, G.L. GUIGNONE, G.C; DEGEN, M.K. TELES, C.R. ZULCÃO R. Utilisation of heat-treated ornamental stone processing waste as an addition to concretes to improve compressive strength and reduce chloride ion penetration. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 444-455, 2018.

MOLIN D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssílica**. Tese Doutorado em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

MOLIN, D. C. C. Técnicas Experimentais para Estudo da Microestrutura. In: **IBRACON - Matérias de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2ª ed, v.1 p. 411-415, São Paulo, 2010

MOLIN, D. C. C. Adições Mineraias. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed. São Paulo: G.C. Isaia., v.1 p. 233-294, São Paulo, 2011.

MOOSBERG-BUSTNES, H.; LAGERBLAD, B.; FORSSBERG, E. The function of fillers in concrete. In: **Materials and Structures/ Matériaux et Constructions**, v.37, p. 74-81, março 2004.

MORAES, I. V. M. Mármore e granito: lavra, beneficiamento e tratamento de resíduos. **Dossiê Técnico**. Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

MOTHÉ FILHO, H. F., POLIVANOV, P., MOTHE, C. G., **Reciclagem dos Resíduos Sólidos de Rochas Ornamentais**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ Vol. 28-2 p.139-151, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª ed. São Paulo: Editora Pini, p. 125 e 828, 2015.

NEVILLE, A. M., BROOKS J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, p. 2-12, 2013.

NOBREGA A.K.C., SÁ, M.V.V.A., AMARAL, R.A., GOIS S.E., DANTAS, G. M. **Caracterização do resíduo de pó de pedra ornamental adicionado à Argamassa em substituição parcial do cimento**. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, Santa Catarina, 2014.

OLSSON, N.; BAROGHEL-BOUNY, V.; NILSSON, L.; THIERY, M. **Non-saturated ion diffusion in concrete – A new approach to evaluate conductivity measurements**. Cement and Concrete Composites, V.40, pp. 40-47, 2013.

PATEL, N.; RAVAL, A.; PITRODA, J. Marble waste: opportunities for development of low cost concrete. **Global Research Analysis**, ISSN n. 2277-8160, v.2, p.94-96, February, 2013.

PEDROSO, D. E.; PEDROSO, C.L.; FILHO, J.S.R.F.; PRESA M.; LIMA, E.P. Concretos utilizando resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) como substituição parcial do cimento Portland. **VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**. Ponta Grossa, Dezembro, 2017.

PETRY, N. S.; DELONGUI, L.; MULLER, A. L.; MASUERO A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação do uso de resíduos de marmoraria na produção de concretos. **Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, v. 6, n. 2, p. 71-92, Jul.a Dez., 2017.

PIRES, V.; Rosa, L. G.; Dionísio, A. Implications of exposure to high temperatures for stone cladding requirements of three Portuguese granites regarding the use of dowel-hole anchoring systems. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 440-450, 2014.

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, p. 125-131, 2000.

PRESUEL-MORENO, F., WU, Y.-Y., LIU, Y. Effect of curing regime on concrete resistivity and aging factor over time. **Construction and Building Materials**, v.48, pp. 874-882, 2013.

PROCEQ. Portfólio comercial de produtos do Resipod – Ano 2018. Proceq Group. Disponível em: <<https://www.proceq.com/compare/corrosion-potential-concrete-resistivity-and-permeability/>>. Acesso em: 14 de março de 2018.

RAISDORFER, J.W. **Influência da adição ou da substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concreto**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2015.

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.

RANA, A., KALLA, P., CSETENYI, L. J. Sustainable use of marble slurry in concrete, **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 304-311, 2015.

RANA, A., KALLA, P., CSETENYI, L. J. Recycling of dimension limestone industry waste in concrete, **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, p.1-20, 2016.

REIS, A.S. **Estudo do aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-graduação em Engenharia civil, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

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.

ROSA, A. R. O.; GONÇALVES, D. K. C.; OLIVEIRA, N. N. C. Avaliação da resistência à compressão do concreto usando raio X. **Revista Construindo**, Belo Horizonte, v.6, n. 1, p.19-25, 2014.

ROSA, D. W. **Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFMS, Santa Maria, 2005.

SADEK, Dina M.; EL-ATTAR, Mohamed M.; ALI, Haitham A. **Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development**. Journal of Cleaner Production 121, p. 19-32, 2016.

SÁNCHEZ, A. F. B. **Análisis de La Reutilización de Residuos Procedentes de La Industria de Silestone en la Fabricación de Mezclas Bituminosas**, Tesis Doctoral em Ingeniería de La Construcción, Universidad de Granada, 2009.

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

SANTOS, J. G.; SILVA, S. S. F.; NASCIMENTO, N. M. S.; TRAJANO, M. F.; MELLO, V. S. **Caracterização da lama abrasiva gerada nos processos de beneficiamento do granito: um estudo de caso na Granfugi localizado em Campina Grande**. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP. São Carlos - SP, 2010.

SANTOS, M. A.; DESTEFANI A. Z.; HOLANDA.J.N.F. Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. **Revista Matéria**, v. 18, n. 04 – artigo 11514, p. 1442-1450, Rio de Janeiro, 2013.

SCHUTTER, G. de. Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete. In: Our world in concrete & structures, v. 36. **Anais...** Singapura Concrete Institute, Singapura, 2011.

SILVA, M. G. Cimento Portland com Adições Mineraias. **Matérias de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. In: **IBRACON**, 2ª ed. São Paulo: G.C.Isaia, v.1, p. 809, 2010.

SILVA, A. Z. D. **Metodologia de avaliação das práticas de gerenciamento ambiental dos resíduos de empresas de beneficiamento de rochas ornamentais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

SILVA, A. F. C. **Caracterização e classificação ambiental da lama abrasiva do beneficiamento de rochas ornamentais**. Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 36 p., Campo Grande, 2013.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SILVEIRA, R. P. **Estudo da cadeia produtiva de rochas ornamentais em Santo Antônio de Pádua – RJ e Cachoeira de Itapemirim - ES**. Dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Campos dos Goytacazes, RJ, 2017.

SINGH, S., NAGAR, R., AGRAWAL, V. Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions. **Journal of Cleaner Production**, v.127, p. 172-182, 2016.

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.

SINGH, M., SRIVASTAVA, A.; BHUNIA, D. Evaluation of marble incorporated concrete using nondestructive methods. **Science Direct**, ICEMS, v.4, p.9842-9845 2017a.

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.

SOARES, E. S. S; VIEIRA, R. K. Análise ambiental dos processos de beneficiamento das marmorarias da cidade de Manaus. **Revista Foco**, ISSN 1981-223X, v. 9, nº. 2, p. 120-137, ago/dez, 2016.

SOLÍS, R. G., MORENO, E. I., ARJONA, E. Resistencia de concreto con agregado de alta absorción y baja relación a/c., v.2, n.1, p. 21-29, 2012.

SOUSA, J. G. de. **Análise ambiental do processo de extração e beneficiamento de rochas ornamentais com vistas a uma produção mais limpa: aplicação Cachoeiro de Itapemirim - ES**. Faculdade de Engenharia da UFJF, Juiz de Fora, 2007.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. Engineering Tribology, Amsterdam, **Elsevier**, p. 314, 1993.

TOPÇU, I. B.; BILIR, T.; UYGUNOGLU, T. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. In: **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 1947–1953, 2009.

TÜRKER, P., ERDOGAN, B., ERDOGDU, K. Influence of marble powder on microstructure and hydration of cements. **Cement Concrete World Journal**, v. 7, p. 38 e 89, 2002.

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.

URAL N., KARAKURT C., CÖMERT A.T., Influence of marble wastes on soil improvement and concrete production, **Journal of Materials Cycles Waste Management**, v.16, p. 500-508, July, 2014. DOI 10.1007/s10163-013-0200-3.

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.

VAZZOLER, J.S.; VIEIRA, G.L.; TELES, C. R.; KLEIN, M.; TEIXEIRA, R.A. Investigation of the potential use of waste from ornamental stone processing after heat treatment for the production of cement-based paste. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 314-321, 2018.

VEIGA, K.K.; GASTALDINI, A.L.G. Sulfate attack on a white Portland cement with activated slag, **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 494-503, 2012.

VIJAYALAKSHMI, M., SEKAR, A.S.S., GANESH PRABHU, G. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. **Construction and Building Materials**, v.46, p.1-7, 2013.

Anexo A – Análise elementar do cimento Portland e resíduo da lama de marmoraria

As Tabelas I e II apresentam os resultados obtidos por análise elementar ou CHN (Analisador CHNS 2400 series II Perkin-Elmer) em triplicata para as amostras de cimento *Portland* e lama de marmoraria, respectivamente. Os resultados obtidos estão em porcentagem atômica. Não foi possível a determinação da porcentagem atômica de S por essa técnica (CHNS) pois esse equipamento especificamente não possui a coluna para determinação do mesmo. Entretanto, para os propósitos desse trabalho e para os materiais analisados, a porcentagem de S pode ser considerada não interferente para as aplicações de interesse e raramente encontrada nesse tipo de material. Embora muitos trabalhos na literatura determinam a porcentagem atômica de O por diferença entre as porcentagens de C, H e N, tal método é pouco preciso e inexato visto que outros elementos podem estar presentes nas amostras principalmente por tratar-se de resíduos cerâmicos ou comercial.

A técnica de CHN apresenta-se em acordo com os dados obtidos por TGA onde foram observados valores de aproximadamente 5 e 0% de perda em massa até $100,00 \pm 0,05^\circ\text{C}$ para amostras do cimento Portland e lama de marmoraria, respectivamente. Tais eventos foram atribuídos à eliminação de água (moisture content) das amostras. Após tratamento térmico em estufa e eliminação de água, a amostra de lama de marmoraria praticamente não apresentou nenhuma porcentagem em massa dos elementos CHN. Por outro lado, o cimento Portland apresenta um percentual baixo de H provavelmente devido a presença de água pois tal amostra não foi pré-termicamente tratada antes das análises.

Outro ponto com importância relevante é o fato da ausência de elementos como C e N nas amostras. Esse comportamento é um indício da ausência de matéria orgânica nas duas amostras. Esse resultado relevante e importante corrobora com os resultados obtidos por TGA onde pode-se observar ausência de perda de massa na faixa de temperatura entre 150 e 400°C , a qual é a faixa característica de perda de massa de materiais lignocelulósicos ^[Ref].

Tabela A.0.1 - Análise elementar ou CHN para amostras de lama de cimento Portland.

	C	H	N
Amostra 1	0,00	0,47	0,00
Amostra 2	0,00	0,52	0,00
Amostra 3	0,00	0,51	0,00

Tabela A.0.2 - Análise elementar ou CHN para amostras de lama de marmoraria.

	C	H	N
Amostra 1	0,00	0,00	0,00
Amostra 2	0,00	0,00	0,00
Amostra 3	0,00	0,00	0,00