

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**"CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSTOS DE CIMENTO PORTLAND
CONFECCIONADOS COM RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO A ÚMIDO DE
ROCHAS ORNAMENTAIS DE ORIGENS DISTINTAS"**

Autor(a): Luciane Souza Cunha Melo
Orientadora: Prof. Maria Teresa Paulino Aguilar
Coorientador: Prof. White José dos Santos

Belo Horizonte
Abril/2016

Luciane Souza Cunha Melo

**"CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSTOS DE CIMENTO PORTLAND
CONFECCIONADOS COM RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO A ÚMIDO DE
ROCHAS ORNAMENTAIS DE ORIGENS DISTINTAS "**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Materiais de Construção Civil. Linha de pesquisa: Resíduos como materiais de construção civil

Orientadora: Prof. Maria Teresa Paulino Aguilár

Coorientador: Prof. White José dos Santos

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2016

Luciane Souza Cunha Melo

**"CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSTOS DE CIMENTO PORTLAND
CONFECCIONADOS COM RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO A ÚMIDO DE
ROCHAS ORNAMENTAIS DE ORIGENS DISTINTAS "**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 29 de abril de 2016

Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar
Coordenadora do Programa de Pós-graduação em Construção Civil

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar
Orientadora - UFMG/DEMC

Prof . Dr. White José dos Santos
Coorientador - UFMG/DEMC

Profa. Dra. Liséte Celina Lange
UFMG/DESA

Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto
UFOP

Dedico este trabalho a Deus pela sua infinita misericórdia, que sustenta os diversos operários das indústrias de rochas ornamentais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela presença ao ser a Luz que direcionou este trabalho nos caminhos a seguir na promoção do exercício do perdão.

Ao meu filho Dante, sempre disposto a ajudar, a minha mãe Jailde, a memória do meu pai Dante, aos meus irmãos, aos sobrinhos, e ao Claudio Moreira pela compreensão.

Aos meus Professores Orientadores Maria Teresa e White um agradecimento especial pela dedicação, pelo carinho, pelos ensinamentos, pela assistência e pelos esforços empreendidos ao longo de todo este trabalho.

A Bruna Silva Almeida, Júlia Baptistella Machado Dutra e Larissa Cardoso Bubani por participarem desta pesquisa por meio da iniciação científica, com conhecimentos e valiosas contribuições ao longo da pesquisa.

Ao Secretario Municipal de Meio Ambiente de Belo Horizonte Vasco de Oliveira Araujo pelo apoio.

Aos meus colegas da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Belo Horizonte especialmente ao Pedro Franzoni, aos colegas da Sudecap especialmente a Ilda Carvalho Aguiar pelo apoio e compreensão.

As Professoras Renata C. S. Araujo e Maria Irene Yoshida do Departamento de Química da UFMG e aos servidores dos diversos Laboratórios da UFMG, que contribuíram com os ensaios, especialmente o Ricardo Barbosa Laboratório de Concreto e Marcos Laboratório Geotecnia.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG, aos Professores e Servidores deste Departamento com os quais convivi ao longo da pesquisa.

Aos colegas da UFMG Ramon Tadeu Lopes, Artur Lamounier, Natanael Almeida, Oneida Heiderick e Raquel Menezes pelos auxílios concedidos.

A Supermix por disponibilizar o Laboratório no Bairro Olhos d' Água, na pessoa do Clésio Francisco Silva e principalmente ao Álvaro Pacheco de Oliveira e Ramon pela disponibilidade durante os ensaios.

A Holcim na pessoa do Fabrício Carlos França pelo fornecimento do cimento e a Mineração Martins Lanna na pessoa do Wender Matosinho pelo fornecimento da areia.

As marmorarias pelo fornecimento dos resíduos e ao Sindicato das Marmorarias de Belo Horizonte - SINROCHAS pela parceria.

RESUMO

O setor de mineração e beneficiamento de rochas ornamentais apresenta produção expressiva no contexto brasileiro em função das diversas aplicações desses materiais na construção civil. Diversas etapas do beneficiamento dessas rochas promovem a geração de resíduos sólidos: estima-se que de 20% a 30% da matéria prima processada seja transformada em resíduos. Trabalhos da literatura mostram a possibilidade de incorporação desses resíduos em materiais usados na construção civil. No entanto, uma dificuldade em tal aplicação é a heterogeneidade de sua composição, especialmente nos resíduos oriundos de cortes e polimentos realizados por equipamentos a úmido, processo no qual gera uma lama abrasiva composta de vários tipos de resíduos de rochas e de outros materiais. Neste contexto, este trabalho estuda a caracterização de compostos cimentícios de cimento Portland confeccionados com uso de resíduos oriundos do processamento à úmido de rochas ornamentais de origens distintas, de forma a avaliar a influência da heterogeneidade dos resíduos no desempenho desses compostos. Estudou-se comparativamente, compostos sem e com resíduos em substituição a 20% do cimento Portland. Os resíduos foram coletados em diferentes marmorarias e épocas do ano, na cidade de Belo Horizonte, MG. Após a caracterização dos resíduos, foram avaliadas o desempenho de pastas e argamassas no estado fresco e endurecido. Os resultados indicaram que o uso dos resíduos em substituição a 20% ao cimento torna o composto cimentício mais susceptível à carbonatação e menos resistente ao esforço de compressão, e que as propriedades no estado fresco não foram afetadas, assim como a resistividade elétrica e a absorção de água por imersão e por capilaridade.

Palavras-chave: Compostos cimentícios, rochas ornamentais, resíduos.

ABSTRACT

The mining and processing of ornamental stones has significant production in the Brazilian context, due to the various applications of these materials in construction. In urban centers, several processing stages of these rocks promote the generation of solid waste: it is estimated that 20% to 30% of the processed material is discarded as waste. Literature studies show the possibility of incorporating these waste in construction materials. However, a difficulty in the recycling of this waste is the heterogeneity of its composition. This heterogeneity is even greater in the waste generated by the cutting and polishing with water use. These processes generate an abrasive slurry composed of various types of waste rocks and other materials. In this context, the aim of this research is to characterize cement Portland compounds made with this abrasive slurry from different sources, in order to evaluate the influence of heterogeneity of waste on the performance of these compounds. It was studied comparatively compound with and without waste in replacement of 20% of Portland cement. The residues were collected in different seasons and marble shops in the city of Belo Horizonte, MG. After waste characterization, it was evaluated the performance of pastes and mortars in fresh and hardened state. The results indicated that the use of waste as a substitute for 20% of Portland cement makes the compound more susceptible to carbonation, less resistant to compressive stress, and did not affect the properties of fresh mortar, as well as electrical resistivity and absorption of water by immersion and capillary action.

Keywords: cement compounds, ornamental rocks, waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1-Diagrama ilustrativo das inter-relações das propriedades dos agregados em relação às características dos compostos cimentícios.....	28
Figura 3.2-Representação esquemática da umidade do agregado	31
Figura 3.3-Classificação das adições minerais para concreto estrutural.....	36
Figura 4.1-Laudo Técnico do cimento CP V ARI fornecido pelo fabricante Holcim.....	51
Figura 4.2-Characterização granulométrica do agregado miúdo.....	52
Figura 4.3-Fluxograma do Programa Experimental.....	54
Figura 4.4-Localização das empresas.....	55
Figura 4.5-Resíduos após secagem em estufa.....	56
Figura 4.6-Destorroamento do resíduo.....	58
Figura 4.7-Técnica do picnômetro por meio de bomba a vácuo.....	59
Figura 4.8-Ensaio Chapelle etapa do banho-maria com amostra de resíduos e amostra em branco	61
Figura 4.9-Ensaio expansibilidade com a pasta de resíduo dentro da agulha Le Chatelier coberta com placas de vidro e submersa em água.....	64
Figura 4.10-Equipamento utilizado no ensaio de calorimetria.....	66
Figura 4.11-Capsulas com e sem resíduos preparados para ensaio de termogravimetria.....	67
Figura 4.12-Medição índice de consistência com paquímetro.....	68
Figura 4.13-Absorção de água por capilaridade.....	72
Figura 4.14-Equipamento medição da frequência ressonante forçada.....	73
Figura 4.15-Equipamento ensaio de resistividade elétrica.....	76
Figura 4.16-Ensaio de compressão Prensa Pavitec.....	78
Figura 4.17-Equipamento ensaio de tração.....	79
Figura 5.1-Resultado do ensaio granulometria por sedimentação.....	83
Figura 5.2- Comparativo entre resultados do ensaio massa específica.....	85
Figura 5.3-Resultado do ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) das pastas sem substituição e com substituição em 20% do cimento por resíduo coletado em setembro.....	90

Figura 5.4-Resultado do ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) das pastas sem substituição e com substituição em 20% do cimento por resíduo coletado em fevereiro.....	90
Figura 5.5-Resultados dos ensaios da TGA - DrTGA- DTA para o traço referência.....	93
Figura 5.6-Resultados dos ensaios da TGA – DrTGA – DTA com resíduo da empresa F1 set.....	94
Figura 5.7-Resultados dos ensaios da TGA – DrTGA – DTA com resíduo da empresa F2 set.....	94
Figura 5.8-Resultados dos ensaios da TGA – DrTGA – DTA com resíduo da empresa F3 set.....	95
Figura 5.9-Resultados dos ensaios da TGA – DTG – DTA com resíduos da empresa F1 fev.....	95
Figura 5.10-Resultados dos ensaios da TGA – DrTGA – DTA com resíduos da empresa F2 fev.....	96
Figura 5.11-Resultados dos ensaios da TGA – DrTGA – DTA com resíduos da empresa F3 fev.....	96
Figura 5.12-Resultados dos ensaios da TGA e DrTGA com resíduos das empresas referentes às coletas realizadas em setembro.....	97
Figura 5.13-Resultados dos ensaios da TGA e DrTGA com resíduos das empresas referentes às coletas realizadas em fevereiro.....	97
Figura 5.14-Resultados ensaio Índice de Consistência.....	101
Figura 5.15-Comparativo ensaio compressão axial.....	103
Figura 5.16-Resultados do ensaio módulo de elasticidade dinâmico.....	106
Figura 5.17-Resultados ensaio de tração na flexão.....	108
Figura 5.18-Resultados ensaio de Absorção por Imersão e Porosidade.....	110
Figura 5.19-Resultado ensaio Absorção por Capilaridade.....	113
Figura 5.20-Resultados ensaio de resistividade.....	116
Figura 5.21-Resultado de amostra com e sem resíduos com propagação da frente de carbonatação.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1-Exemplos de minerais silicáticos comuns.....	14
Tabela 3.2-Exemplos de minerais não silicáticos comuns.....	15
Tabela 3.3-Massa específica aparente de diversos grupos de rochas, em kg/m ³	30
Tabela 3.4-Comparação entre permeabilidade de rochas e pastas de cimento.....	44
Tabela 4.1- Caracterização agregado miúdo.....	52
Tabela 4.2-Proporcionamento do material.....	70
Tabela 4.3-Traço dos corpos de prova.....	70
Tabela 4.4 -Ensaio realizados e tipo de corpos de prova.....	70
Tabela 5.1-Granulometria resíduos empresa F1.....	82
Tabela 5.2-Granulometria resíduos empresa F2.....	82
Tabela 5.3-Granulometria resíduos empresa F3.....	82
Tabela 5.4-Porcentagens de D ₁₀ , D ₅₀ e D ₉₀ dos diâmetros do resíduos.....	83
Tabela 5.5-Massa específica média das amostras.....	84
Tabela 5.6-Primeira amostragem do ensaio Chapelle Modificado.....	86
Tabela 5.7-Segunda amostragem do ensaio Chapelle Modificado.....	86
Tabela 5.8-Consistência normal.....	87
Tabela 5.9-Tempo de pega.....	88
Tabela 5.10-Resultados termogravimetria e termodiferencial em pontos relevantes das reações.....	98
Tabela 5.11-Resultados dos ensaios de expansibilidade volumétrica das pastas.....	100
Tabela 5.12- Resultados ensaio índice de consistência.....	101
Tabela 5.13-Resultado da resistência à compressão axial em MPa.....	103
Tabela 5.14-Resultado ensaio módulo de elasticidade dinâmico.....	106
Tabela 5.15-Resultados do ensaio de tração na flexão aos 7 dias.....	108
Tabela 5.16-Resultados ensaio de tração aos 28 dias.....	109
Tabela 5.17-Resultados do ensaio absorção de água por imersão e porosidade.....	110

Tabela 5.18-Absorção de água por capilaridade por amostras ao longo do tempo.....	112
Tabela 5.19-Resultado da média do coeficiente de capilaridade para amostras com e sem resíduos.....	113
Tabela 5.20-Resistividade elétrica.....	115
Tabela 5.21-Resultados ensaio.de carbonatação.....	118

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1	Exemplos de rochas ornamentais ígneas.....	08
Quadro 3.2	Exemplos de rochas ornamentais sedimentares.....	09
Quadro 3.3	Exemplos de rochas ornamentais metamórficas.....	11
Quadro 3.4	Principais compostos do cimento Portland.....	22
Quadro 3.5	Classificação de Agregados Naturais de acordo com o tipo de rocha.....	27
Quadro 5.1	Identificação das amostras com resíduos.....	80
Quadro 5.2	Composição dos resíduos quanto a natureza.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

A	massa do corpo de prova que permanece na água (g)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
a/c	relação água / cimento
A_c	absorção de água por capilaridade, em g/cm^2
A_i	absorção de água por imersão (%)
B	massa do corpo de prova seco (g)
C	coeficiente de capilaridade em $g/dm^2 \cdot min^{1/2}$
C_3A	aluminato tricálcio
C_3S	silicato Tricálcio
COPASA/MG	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CPV	cimento de alta resistência inicial
CP	corpo de prova
CP's	corpos de prova
E	módulo de elasticidade
E_D	módulo de elasticidade dinâmico
DrTGA	termodiferencial
DSC	calorimetria exploratória diferencial
d	diâmetro das partículas dos resíduos em milímetros (mm)
Fck	resistência à compressão
Fc	fator de correção do HCl
L	distância entre dois pontos onde é medida a voltagem (m)
M_1	massa do picnômetro mais água à temperatura de ensaio
M_2	massa do picnômetro + água + sólidos, à temperatura de ensaio
M_s	massa de sólidos, obtida por secagem no final do ensaio
m_{90}	massa dos corpos de prova a 90 minutos
m_{10}	massa dos corpos de prova a 10 minutos
M_{sat}	massa do corpo de prova superfície seca, que ficou imerso na água
M_{seca}	massa do corpo seco (g)
$M_{s, sed}$	massa seca utilizada na sedimentação

NBR	Norma Brasileira
R	resistência do material (Ω);
P_{sed}	porcentagem do resíduo em suspensão, no instante da leitura
S	área da seção transversal em cm^2
t	tempo de sedimentação em (s)
TGA	termogravimetria
γ	massa específica
ϵ	deformação específica
ρ	densidade do material
ρ_w	massa específica da água à temperatura de ensaio
ρ_s	massa específica dos grãos, em g/cm^3
ρ_{disp}	massa específica do meio dispersor
Δm	perda de massa
μ	coeficiente de viscosidade do meio dispersor
Z	altura de queda das partículas
#	malha de peneira

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Rochas Ornamentais	5
3.1.1 Produção de rochas ornamentais e principais depósitos do Brasil.....	5
3.1.2 Processo de extração na jazida e beneficiamento.....	6
3.1.3 Propriedades petrográficas	7
3.1.4 Propriedades mineralógicas.....	11
3.2 Resíduos de Rochas Ornamentais	16
3.3 Compostos Cimentícios	19
3.3.1 Considerações gerais	19
3.3.2 Constituintes	21
3.3.3 Aditivos, adições e fillers.....	32
3.3.4 Avaliação do desempenho de compostos cimentícios	36
4 MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1 Materiais	50
4.2 Métodos	53
4.2.1 Coleta e preparo do resíduo	54
4.2.2 Caracterização dos resíduos	56
4.2.3 Confeção e caracterização das pastas	61
4.2.4 Confeção e análise do desempenho dos compostos cimentícios.....	68
5 RESULTADOS	80
5.1 Caracterização dos Resíduos	80

5.1.1 Quanto à natureza	80
5.1.2 Granulometria	81
5.1.3 Massa Específica	84
5.1.4 Atividade Pozolânica	85
5.2 Caracterização das Pastas	87
5.2.1 Consistência normal.....	87
5.2.2 Tempo de Pega	88
5.2.3 Calorimetria exploratória diferencial.....	89
5.2.4 Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise Termodiferencial (DTA).....	93
5.2.5 Expansibilidade	99
5.3 Caracterização dos Compostos Cimentícios no Estado Fresco- Trabalhabilidade	100
5.4 Caracterização dos Compostos Cimentícios no Estado Endurecido	102
5.4.1 Resistência à Compressão Axial.....	102
5.4.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico	105
5.4.3 Resistência à Tração na Flexão.....	107
5.4.4 Absorção por imersão	110
5.4.5 Absorção por capilaridade	111
5.4.6 Resistividade elétrica	114
5.4.7 Carbonatação acelerada.....	117
6 CONCLUSÕES.....	120
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
8 ANEXO A – MASSA ESPECÍFICA	131

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a discussão sobre o aquecimento global tem motivado interesse pela preservação ambiental e desenvolvimento sustentável. Assim sendo, atenção especial tem sido dada para o destino dos resíduos sólidos provenientes das atividades industriais, bem como, aqueles oriundos de atividades urbanas.

O setor de mineração e beneficiamento de rochas ornamentais tem apresentando crescimento, tendo em vista as diversas aplicações dos materiais. Segundo Boletim Informativo da Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais -ABIROCHAS (2015) a produção brasileira de rochas ornamentais totalizou 10,13 milhões de toneladas em 2014, sendo o Brasil o terceiro maior exportador mundial de ardósia, depois da Espanha e China, e o segundo maior exportador de blocos de granito, depois da Índia, bem como o primeiro fornecedor geral de rochas para os Estados Unidos e, especificamente, de chapas de granito para esse mercado. De acordo com o relatório da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM) do Ministério de Minas e Energia (2009) a maior concentração de aglomerações produtivas de rochas ornamentais localiza-se na região Sudeste do Brasil, evidenciando a relação direta entre pólos de produção e de consumo regional. O relatório aponta os Estados do Espírito Santo e de Minas Gerais como os dois principais pólos de lavras no Brasil.

O processo produtivo e o beneficiamento das rochas ornamentais, tais como, granito, mármore, gnaisse, ardósia, dentre outras, compõe de várias etapas tais como desdobramento, polimento, corte e acabamento. O desdobramento é realizado em equipamentos denominados teares e consiste na serragem dos blocos em chapas. A etapa do polimento ocorre nas chapas brutas advindas do processo de desdobramento, realizadas em equipamentos denominados politrizes (MELO,2009). A última etapa de beneficiamento das rochas ornamentais é a transformação das chapas em artefatos, por meio do corte e acabamento final. No processo do beneficiamento à úmido é gerado um resíduo na forma de lama, que ao secar transforma-se em um pó fino, não biodegradável.

Pesquisadores da UFMG, da UFES e da USP (Braga *et al.*, 2010) apresentam resíduos de lama de rochas ornamentais de mármore e granito como classe II A, segundo classificação da NBR 10004:2004. Melo (2009) estima que 20% a 30% da matéria prima processada é transformada em resíduos, cuja disposição final tem se revelado problemático, tanto nas minas onde as rochas são exploradas, como nas indústrias de beneficiamento, que se localizam nos centros urbanos. A geração desordenada e o descarte final sem critérios ambientais são considerados como fonte de degradação ambiental e desperdício de insumos.

Conforme Isaia (2011) a substituição de parte do cimento (clinker) por adições minerais ativas (pozolanas, escórias) ou inertes (fíler calcário), na maioria dos casos os subprodutos ou rejeitos agroindustriais, são soluções técnica e economicamente eficientes para minimizar o impacto ambiental do cimento e transformar o concreto em produto mais sustentável.

Gonçalves (2000) pesquisou sobre aproveitamento do resíduo de corte do granito e verificou que sua utilização como adição em concreto é viável tecnicamente e que 10% de adição é o teor que apresenta melhor desempenho. Barros (2008) avaliou as propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito e concluiu que as propriedades de durabilidade apresentaram melhores resultados com uso dos resíduos que aqueles apresentados nos concretos convencionais. Santos (2011) verificou o uso de resíduo de mármore triturado em substituição ao agregado miúdo natural na produção de argamassa e concluiu que o uso do resíduo proporcionou melhor desempenho das características mecânica e de durabilidade que as de referência.

Nesse contexto, observa-se que vários trabalhos publicados apontam para uma potencialidade na incorporação de resíduos oriundos do beneficiamento de rochas ornamentais para o uso na construção civil. Em geral estes resíduos apresentam composições química e mineralógica que quando adicionados às formulações contribuem para melhoria do produto final. No entanto não se encontrou de forma clara na literatura consultada a influência da heterogeneidade

dos resíduos oriundos do processo de beneficiamento à úmido das marmorarias em misturas ao cimento Portland. Dessa forma este trabalho investiga a influência da heterogeneidade dos resíduos, descrita pela presença de diferentes constituintes, nas propriedades no estado fresco e endurecido de compostos de cimento portland (argamassa para fins estruturais).

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é a caracterização de compostos de cimento portland confeccionados com resíduos oriundos do processamento a úmido de rochas ornamentais de origens distintas, em substituição parcial ao cimento.

Para atender ao objetivo geral tem-se os objetos específicos:

- 1 - caracterizar os resíduos quanto a natureza e as propriedades físicas;
- 2 - avaliar o desempenho dos compostos de cimento Portland no estado fresco, confeccionados com os resíduos provenientes de diferentes fontes;
- 3 - avaliar o desempenho dos compostos de cimento Portland no estado endurecido, confeccionados com os resíduos provenientes de diferentes fontes;
- 4 - avaliar o mecanismo de ação dos resíduos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados tópicos relevantes do levantamento bibliográfico acerca das rochas ornamentais e compostos cimentícios, no que tange a caracterização dos resíduos dessas rochas, as propriedades mecânicas e a durabilidade no desempenho de compostos cimentícios.

3.1 Rochas Ornamentais

Conforme Frascá (2010), desde as primeiras civilizações os materiais pétreos como as rochas, foram utilizados em obras de engenharia de construção, a exemplo as Pirâmides do Egito. Durante toda a antiguidade, foram utilizados em edifícios e monumentos europeus como pontes, estradas, aquedutos, palácios, castelos, igrejas e túmulos. Foram importantes tanto pela sua abundância, como pela resistência e durabilidade.

Ao longo do tempo os materiais rochosos tiveram e têm grande aplicabilidade na engenharia, em destaque na Construção Civil, tanto pelas suas características como pela sua composição. O conhecimento destes materiais pétreos, a classificação, determinação dos seus constituintes e principalmente suas propriedades físicas e mecânicas possibilitam uma melhor utilização e contribui no melhor desempenho.

3.1.1 Produção de rochas ornamentais e principais depósitos do Brasil.

Segundo Boletim Informativo da ABIROCHAS (2015) o Brasil é reconhecido por sua excepcional diversidade mineral, incluindo rochas ornamentais, com destaque para materiais silicáticos como quartzitos, granitos e outras rochas similares. Apresenta que a partir de 1990 o Brasil passou por um notável crescimento na produção e exportação de rochas ornamentais, com aumento de

atividades em toda a cadeia produtiva. Aponta que apesar dos problemas econômicos e estruturais, internos e externos, as exportações brasileiras de rochas ornamentais em 2014 igualaram-se as de 2013, com vendas para mais de cem países em todos os continentes. Segundo Maia e Heder (2013) em 2013 a região Sudeste foi responsável por 64,5% da produção nacional e a região Nordeste por 24,7%.

3.1.2 Processo de extração na jazida e beneficiamento.

O Processo de industrialização das rochas ornamentais e de revestimento inicia com a extração das rochas em forma de blocos nas jazidas. Posteriormente estes blocos são beneficiados e transformados em placas ou chapas e encaminhadas para empresas de beneficiamento nos centros urbanos.

O método de lavra das rochas ornamentais pode contemplar diversas tecnologias isoladas ou combinadas, no desmonte das rochas. As técnicas a serem aplicadas dependem do tipo de rocha, suas propriedades físicas e mecânicas, em função das características morfológicas e estruturais Deschamps *et al.* (2002) afirmam que na escolha da técnica do corte a mineralogia é um fator importante. Os percentuais de minerais encontrados nas rochas devem ser avaliados de modo a subsidiar essa escolha. Destacam ainda que no processo de desmonte de rochas é gerado um material, considerado estéril. O estéril é constituído pelo capeamento da jazida ou por camadas intermediárias de material muito fraturado e camadas resistentes, “pedrão”, com espessuras excessivamente elevadas, que não permitem o seu aproveitamento.

As empresas de beneficiamento das rochas ornamentais, localizadas nos centros urbanos, são denominadas marmorarias. Realizam etapas de polimento, corte e acabamento final das peças, conforme finalidade de uso (MELO, 2009). Normalmente em Belo Horizonte as empresas adquirem as placas ou chapas já polidas. O corte é realizado com equipamento a úmido, processo no qual se gera uma lama, objeto da pesquisa neste trabalho.

Melo (2009) aponta que nas marmorarias o processo do beneficiamento inicia-se com a descarga das chapas do caminhão. Em Belo Horizonte a maioria das chapas adquiridas encontram-se previamente polidas, sendo que menos de 5% das empresas adquirem a chapa bruta. A etapa do beneficiamento pode gerar resíduos na forma de pó ou lama, quando se faz uso de equipamento a úmido. A autora aborda que, conforme solicitação de projeto, a placa é medida e cortada por meio de serra elétrica com o corte a úmido. O acabamento consiste no lixamento e polimento das peças individualizadas, etapa geralmente feita à seco, usando ferramentas elétricas manuais. Nesta etapa é gerada grande quantidade de poeira, além de ruído intenso (MELO, 2009).

3.1.3 Propriedades petrográficas

Segundo Frascá (2010), rocha é definida como um corpo sólido natural, resultante de um processo geológico determinado, formado por agregados de um ou mais minerais, arranjados segundo as condições de temperatura e pressão existentes durante a sua formação. Também, podem ser corpos de material mineral não cristalino, como o vidro vulcânico (obsidiana) e materiais sólidos orgânicos, como o carvão.

Conforme abordado por Metha e Monteiro (2008), no Brasil as rochas são classificadas em ígneas (granitos), sedimentares (calcários, arenitos), metamórficas (mármore, quartzito, gnaisses). As rochas, dependendo da ocorrência, são usadas como agregados, e podem reagir com os álcalis do cimento, dependendo dos constituintes, da granulometria e da condição de deformação da estrutura cristalina. Neville (1997) aborda que muitas propriedades dos agregados dependem inteiramente das propriedades da rocha mãe, como a composição química e mineralógica, petrografia, massa específica, dureza, resistência mecânica, estabilidade física e química, estrutura dos poros, cor, dentre outros. A seguir apresenta-se uma abordagem sobre as tipologias apresentadas pelas rochas:

Rochas ígneas ou magmáticas

São aquelas que resultam da solidificação de material rochoso parcial ou totalmente fundido (denominado magma), gerado no interior da crosta terrestre. Frascá (2010) descreve que conforme o local de formação as rochas ígneas se distinguem em dois tipos plutônicas ou intrusivas e vulcânicas ou extrusivas:

Conforme apresentado por Frascá (2010) as rochas ígneas, dentre as quais destacam os granitos, são compostas por feldspatos, quartzo, piroxênios, anfibólios e feldspatóides. São classificadas de acordo com o conteúdo e proporções relativas desses minerais, o que também é condicionante da enorme diversidade desses litotipos. O quadro 3.1 apresenta relação de rochas ornamentais ígneas conforme abordado em Frascá (2010).

Quadro 3.1 - Exemplos de rochas ornamentais ígneas.

Rocha	Estrutura	Cor	Minerais Essenciais	Exemplos de Rochas Comerciais
Granito ^(p)	Maciça	Cinza a rosa-avermelhado	qz, pl, Kf, (bi, hb)	Vermelho Capão Bonito, Branco Ceará, Cinza Andorinha, Cinza Corumbá
Riólito ^(v)	Maciça/ vesículo-amigdaloidal	Cinza, rosada, azulada	qz, pl, Kf, (bi, hb)	Azul Sucuru, Azul Paramirim
Diorito ^(p)	Maciça	Cinza-escuro	pl, bi, hb, (qz, Kf)	Preto Piracaia, Preto Bragança
Sienito ^(p)	Maciça/ Fluxionar	Rosa, marrom, azul	Kf, bi, nf, sd, ag, (bi, hb)	Café Brasil, Café Imperial, Azul Bahia
Gabro ^(p)	Maciça	Cinza-escuro a preto	pl, au, op	Preto Absoluto, Preto Café de Minas
Charnockito ^(p)	Maciça	Verde –escuro	qz, pl, Kf, hy, (bi, hb)	Verde Labrador, Verde Pavão, Preto São Gabriel
Pegmatito	Heterogênea	Branco, bege	qz, pl, Kf, micas	Delicatus, Golden Himalaya

Abreviações: qz = quartzo, pl = plagioclásio, Kf = feldspato potássico, bi = biotita, hb = hornblenda, ne = nefelina, sd = sodalita, ag = augita, op = minerais opacos (óxidos e/ou sulfetos), hy = hiperstênio. (p) = plutônica; (v) = vulcânica

Fonte: Frascá (2010)

Rochas Sedimentares

Segundo Frascá (2010), rochas sedimentares são aquelas formadas por meio de erosão, transporte, fluvial, marítimo ou eólico e deposição de sedimentos (clastos

ou detritos) derivados da desagregação e da decomposição de rochas da superfície terrestre, da precipitação química ou ainda, do acúmulo de fragmentos orgânicos.

A estratificação ou acamamento são estruturas típicas de rochas sedimentares e representam o arranjo dessas rochas em camadas distintas, com espessuras variando de centímetros até poucos metros.

Segundo Petrucci (2007) as rochas sedimentares dividem em grupos:

- *Sedimentares clásticas ou detríticas* formadas pela deposição de detritos, como por exemplo, o arenito. Os arenitos contêm 50% de grãos, predominantemente de quartzo (Frasca, 2010).
- *Sedimentares químicas* formadas pela precipitação química, por exemplo, calcários. Os dolomitos são gerados a partir dos calcários (Frasca, 2010).
- *Sedimentares organógenas* formadas pela acumulação de substâncias orgânicas, por exemplo a turfa.

A seguir apresenta-se o quadro 3.2 referente às rochas ornamentais sedimentares conforme Frasca (2010).

Quadro 3.2 - Exemplos de rochas ornamentais sedimentares

Rocha	Estrutura	Cor	Minerais Essenciais	Exemplos de rochas Comerciais
Arenito	Isótropa/ Laminada	Branca, bege, avermelhada, Rosa	qz, felds, cimento: si, cc, am	Pink Brasil, Rosa Bahia
Calcário	Laminada	Bege, alaranjada, amarronzada, preta	cc+ fósseis	Pedra Cariri, Crema Marfil (Espanha);
Travertino	Laminada/ vacuolar/ brechóide	Bege amarronzado	cc ± fósseis	Bege Bahia, travertino Romano (Itália)

Abreviações: qz = quartzo, felds = feldspato, si = sílica, cc = calcita, am = argilominerais
Fonte: Adaptado Frasca (2010)

Rochas Metamórficas

São derivadas de outras preexistentes que, no decorrer dos processos geológicos, exibem mudanças mineralógicas, químicas e estruturais, no estado

sólido, em resposta a alterações nas condições físicas e químicas impostas em profundidades superiores àquelas da diagênese (Frasca, 2010).

São formadas pela alteração gradual na estrutura das rochas anteriores, pela ação do calor, pressão ou da água. Assim, os gnaisses resultam da alteração dos granitos, os quartzitos da alteração dos arenitos, os mármorees da alteração de calcários e os esquistos cristalinos da alteração da argila (PETRUCCI, 2007).

De acordo com Frasca (2010) os mármorees contêm mais de 50% de calcita e/ou dolomita, formadas a partir do metamorfismo de calcários e/ou dolomitos. A cor é clara variando em branca, rosada, cinzenta, esverdeada, etc., dependendo da presença de outros minerais, tais como talco, anfibólio (tremolita), piroxênios (diopsídio), olivina (forsterita) entre outros.

Conforme Frasca (2010) ardósia é uma rocha de granulação muito fina, composta essencialmente por micas, clorita e quartzo, derivada do metabolismo de folhelhos, com os quais muitas vezes se confunde dadas as sutis modificações que sofrem nessa transformação. A seguir apresenta-se o quadro 3.3 que se refere a rochas ornamentais metamórficas conforme autora.

Conforme Petrucci (2007), o tipo de mineral predominante na constituição das rochas é determinante das suas características, o que permite classifica-las em:

- *Rochas silicosas*: são aquelas nas quais predomina a sílica (SiO_2). De maneira geral, têm maior resistência mecânica e a maior durabilidade de todas. Conforme Chiodi Filho (2002) no setor de rochas ornamentais e de revestimento, granito se refere a uma série de rochas silicáticas, abrangendo monzonitos, granodioritos, charnockitos, sienitos, dioritos, diabásios/basalto e os próprios granitos.
- *Rochas calcárias*: são aquelas onde as propriedades são governadas pelo carbonato de cálcio (CaCO_3). Têm boa resistência mecânica e média durabilidade.

- *Rochas argilosas*: são aquelas nos casos em que a argila (silicatos hidratados de alumínio) é preponderante. Apresentam menor resistência mecânica e durabilidade.

Quadro 3.3 - Exemplos de rochas ornamentais metamórficas

Rocha	Estrutura	Cor	Minerais Essenciais	Exemplos de rochas Comerciais
Gnaisse	Gnáissica	Branca, tons de cinza, amarelo, vermelho e rosa	flds, qz, bi, hb	Azul Fantástico, Amarelo Santa Cecília, Branco Itaúnas
Migmatito	Migmatítica	Tons de cinza, vermelho e rosa	felds, qz, bi, hb	Kashmir Bahia, Kinawa Bahia, Champagne Trançado
Milonito	Milonítica	Tons de cinza, amarelo e rosa	mi, felds, qz	Pedra Paduana ou Miracena, Pedra Madeira
Metaconglo merado	Clástica/ recristalizada	Verde, vermelho e preto	Variada	Verde Marinace, Rhodium Bahia
Quartzito	Maciça	Branca e azul	qz, mi, du (em quartzitos azuis)	Azul Macaúbas, Azul Imperial
	Foliada	Branca, tons de amarelo, verde e rosa	qz, mi	Pedra São Tomé, Pedra Luminárias, Pedra Goiás
Mármore	Maciça	Cinza a branca com tons verdes ou rosas	cc / do	Branco Paraná, Branco Espírito Santo, Branco Itálva
Ardósia	Clivagem ardosiana	Tons de cinza ou marrom	mi, cl, qz	Ardósia Cinza, Ardósia Vinho, Ardósia Grafite

Abreviações : qz = quartzo, bi = biotita, hb = hornblenda, mi = micas, felds = feldspatos, cc = calcita, do = dolomita, du = dumortierita, cl = clorita

Fonte: Adaptado Frascá (2010)

3.1.4 Propriedades mineralógicas

Segundo Petrucci (2007), as propriedades das rochas resultam das propriedades dos minerais constituintes, no entanto não é absoluta e depende ainda da estrutura da pedra resultante da formação geológica (vulcânica, sedimentar, metamórfica); textura da pedra (do arranjo, forma e dimensões dos elementos mineralógicos) e, finalmente, do estado de alteração dos mesmos.

Os minerais podem ser simplificarmente agrupados em silicatos e não silicatos segundo Frascá, (2010). A seguir faz-se uma descrição de exemplos de minerais silicáticos e não silicáticos mais comuns:

Minerais silicáticos

A composição mineralógica dos granitos é definida por associações variáveis de quartzo, feldspato, micas (biotita e muscovita), anfibólios (sobretudo homblenda), piroxênios (aegirina, augita e hiperstênio) e olivina conforme Chiodi Filho (2002).

- *Quartzo*: os silicatos são materiais compostos por silício e oxigênio, os dois elementos mais abundantes da crosta terrestre, quimicamente o silicato mais simples é o dióxido de silício, ou sílica (CALLISTER, 2012). Possui alta resistência à compressão, e apresenta grande resistência a abrasão (Petrucci, 2007). Devido à sua resistência às intempéries, é um importante constituinte de muitos depósitos de areias, pedregulhos e arenitos (Metha e Monteiro, 2008). Para Chiodi Filho (2002), macroscopicamente o quartzo é reconhecido como mineral incolor ou fume, geralmente translúcido. De acordo com Cascudo, Carasek e Hasparyk (2010) as formas cristalinas polimórficas do SiO_2 o quartzo apresenta fatores de empacotamento mais elevados, sua classificação pertence aos tectossilicatos e grupo da sílica.
- *Tridimita e a cristobalita*: minerais de sílica cristalina, mas são metaestáveis em condições normais de temperatura e pressão, raramente são encontrados na natureza, exceto em rochas vulcânicas (Metha e Monteiro, 2008). Conforme Cascudo *et al* (2010) fator de empacotamento dessas estruturas é bastante baixo, devido a relativa baixa densidade.
- *Opala*: mineral de sílica hidratada (3% a 9% de água) que parece não cristalino por microscopia ótica, mas pode apresentar arranjo com um baixo grau de cristalinidade na análise por difração de raio X. Costuma ser encontrada em rochas sedimentares, especialmente no chert, e é o constituinte principal da diatomita (Metha e Monteiro, 2008). Conforme Cascudo *et al* (2010) este é considerada uma mineralóide ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), pertencente ao grupo sílica. Possui uma proporção variada de água, ocorre em fendas e cavidades de rochas ígneas e sedimentares. Em virtude das suas características cristalográficas e químicas, são extremamente susceptíveis a reagir com os hidróxidos alcalinos presentes na solução dos poros do concreto formando produtos expansivos na presença de água.

- *Calcedônia*: mineral poroso que geralmente contém fibras microscópicas de quartzo (variedade criptocristalina de quartzo da classe fibrosa). As propriedades da calcedônia são intermediárias entre a opala e as do quartzo (METHA e MONTEIRO, 2008).

Aluminossilicatos

Depois da sílica, é a alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3) o mais abundante constituinte da crosta terrestre. Combinado com a sílica e outros óxidos básicos, constitui o grande grupo dos minerais aluminossilicatos, dos quais destacam Feldspato e Micas.

- *Feldspato*: este silicato de alumínio forma 50% em peso da litosfera. Conforme Metha e Monteiro (2008) são quase tão duros quanto o quartzo, e vários minerais do grupo são diferenciados pela composição química e propriedades cristalógicas.
- *Ortoclásio, sanidina e microlina*: são silicatos de alumínio e potássio que frequentemente são denominados feldspatos potássicos. Os plagioclásios, ou feldspatos cálcio-sódicos, incluem silicatos de alumínio e sódio (albita), silicatos de alumínio e cálcio (anortita), ou ambos. Os feldspatos alcalinos que contêm potássio ou sódio ocorrem tipicamente em rochas ígneas contendo alto teor de sílica, como os granitos e riolitos. Os que contêm alto teor de cálcio são encontrados em rochas ígneas com menor teor de sílica como diorito, gabro e basalto (Metha; Monteiro, 2008). A olivina é um mineral comum dessa classe e ocorre em rochas ígneas com teor relativamente baixo de sílica (Metha; Monteiro, 2008).
- *Micas*: são silicatos de alumínio de variada e complexa composição química. Muscovita, biotita, clorita e vermiculita, que formam o grupo dos minerais micáceos, também consistem de silicatos de ferro e magnésio, mas seu arranjo interno com estrutura lamelar é responsável pela tendência a fraturar-se em lâminas finas. As micas são abundantes e ocorrem nos três grupos de rochas (METHA; MONTEIRO, 2008).

A seguir apresenta-se a tabela 3.1 dos silicáticos mais comuns conforme Frascá (2010).

Tabela 3.1 - Exemplos de minerais silicáticos comuns

Mineral	Fórmula Química	Peso específico**	Classe (Grupos)	Alteração
Olivina	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	3,27-4,37	Nesosilicatos	serpentina, óxidos de ferro
Granada	$Fe_3Al_2Si_3O_{12}$	4,1-4,3		clorita, hidróxidos de ferro
Augita	$(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al)_2O_6$	3,28-3,55	Inossilicatos (piroxênios)	clorita, serpentina, talco, óxidos de ferro
Diopsídio	$MgCaSi_2O_6$	3,25-3,55		
Hiperstênio	$(Mg,Fe)_2Si_2O_6$	3,4-3,5		
Hornblenda	$(Na,Ca)_2(Mg,Fe)_5Si_7AlO_{22}(OH)_2$	3,0-3,5	Inossilicatos (anfíbólios)	clorita, argilominerais carbonatos, hidróxidos de ferro
Feldspato potássico	$KAlSi_3O_8$	2,56	Tectosilicatos	sericita, caulinita, carbonato
Plagioclásio	$(Na,Ca)(Al,Si)AlSi_2O_8$	2,62-2,76		sericita, caulinita, carbonato +/- epidoto
Quartzo	SiO_2	2,65		
Nefelina	$KNa_3(SiAlO_4)_4$	2,55-2,65	Tectosilicatos (feldspatóides)	albita, zeólitas, caulinita, analcima
Analcita	$NaSi_2AlO_6.H_2O$	2,22-2,29	Tectosilicatos (zeólitas)	produto de alteração da nefelina
Muscovita	$K_2Al_4Si_6Al_2O_{20}(OH)_4$	2,76-3,0	Filossilicatos (micas)	caulinita, gibbsita
Biotita	$K_2(Mg,Fe,Al)_6(Si,Al)_8O_{20}(OH)_4$	2,8-3,4		Clorita, vermiculita
Caulinita	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$	2,6	Filossilicatos (argilominerais)	Minerais de alteração ou secundário
*Montmorilonita ou Esmeclita	$(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2.4H_2O$	2,5		
Clorita	$(Mg,Fe,Al)_6(Al,Si)_4O_{10}(OH)_8$	2,6-3,0		
Serpentina	$Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$	2,2-2,7	Filossilicatos	
Talco	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	2,82		

* Os argilominerais do grupo da montmorilonita, também designados de esmeclita, são expansivos na presença de água, frequentemente levando à desagregação física das rochas que os contêm. ** Peso específico em kg/dm^3 .

Fonte: Adaptado Frascá (2010)

Minerais não silicatos - carbonatos e sulfatos

Segundo Chiodi Filho (2002), as principais rochas carbonáticas abrangem calcários e dolomitos, sendo os mármoreos os seus correspondentes metamórficos. Os calcários são rochas sedimentares compostas principalmente de calcita ($CaCO_3$), enquanto dolomitos são rochas também sedimentares

formadas por dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). A Tabela 3.2 apresenta os minerais não silicáticos.

- *Carbonatos minerais*: calcita que é o carbonato de cálcio (CaCO_3), a magnesita (MgCO_3) e a dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) são os mais importantes. Conforme Metha e Monteiro (2008) os dois minerais carbonáticos são menos duros do que o quartzo e o feldspato.
- *Minerais sulfeto e sulfatos*: de acordo com Mehta e Monteiro (2008) os sulfetos de ferro como a pirita, marcasita e pirrotita são minerais frequentemente presentes nos agregados naturais. A marcasita, que é encontrada principalmente em rochas sedimentares, oxida-se rapidamente, formando ácido sulfúrico e hidróxidos de ferro. A formação de ácido é indesejável devido ao seu potencial de corrosão do aço de estruturas de concreto protendido e armado. Informa, ainda que, suspeita-se que a marcasita e algumas formas de pirita e pirrotita são responsáveis por reações expansivas no concreto, causando fissuras e pipocamentos. O gesso e a anidrita são entre os sulfatos minerais os mais importantes. Conforme Metha e Monteiro (2008), a Gipsita (sulfato de cálcio di-hidratado) e a anidrita (sulfato de cálcio anidro) são minerais sulfatados mais abundantes que podem se apresentar como impurezas em rochas carbonáticas e folhelhos. Às vezes recobrimo a areia e o pedregulho, a gipsita e a anidrita aumentam a possibilidade de ataque interno por sulfato no concreto.

Tabela 3.2 - Exemplos de minerais não silicáticos comuns

Mineral	Fórmula Química	Peso Específico**	Classe
Grafita	C	2,15	Elementos Nativos
Pirita	FeS_2	5,1	Sulfetos
Magnetita	Fe_3O_4	5,2	Óxidos
Hematita	Fe_2O_3	5,26	
Ilmenita	FeTiO_3	4,7	
Pirolusita	MnO_2	4,7-5,0	
Limonita	$\text{FeO} \cdot \text{OH}$	4,3	Hidróxidos
Goethita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	3,3-4,3	
Bauxita	Hidróxidos de alumínio *	2,3-2,4	
Calcita	CaCO_3	2,71	Carbonatos
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	2,85	
Halita	NaCl	2,16	Halóides
Gipso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2,32	Sulfatos

* Mistura de hidróxidos hidratados de alumínio: boehmita ($\text{AlO}(\text{OH})$), diásporo (HAIO_2), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$). ** Peso específico em kg/dm^3 .

Fonte: Adaptado Frascá (2010)

3.2 Resíduos de Rochas Ornamentais

De acordo com Frascá (2010), a escolha e a valorização do uso da rocha ornamental têm como principal critério a escolha do padrão estético, inerente à natureza da rocha, tipologia do jazimento, composição mineralógica, intensidade e tipo de alteração, presença de tensões confinadas, heterogeneidade estrutural e textural, entre outros. Estas situações refletem as características intrínsecas, as propriedades físicas e mecânicas e a alterabilidade da rocha, fatores que condicionarão aos usos mais adequados e a durabilidade do material para os diversos fins aos quais se propõe na construção civil.

Conforme Melo (2009) os resíduos sólidos são gerados em diversas etapas do processo, desde a extração até o beneficiamento final das rochas ornamentais nos centros urbanos. Podem estar na forma de lama, pó, retalhos, cacos ou pedaços de pedra e possuem as características específicas provenientes da rocha originária.

Nas marmorarias, localizadas nos centros urbanos, os resíduos gerados na forma de lama são proveniente do beneficiamento com uso de equipamentos à úmido na etapa do corte. Em muitas empresas de marmorarias, estes resíduos ficam retidos em caixas de decantação, de onde são retirados e descartados em caçambas. O pó é proveniente do uso de equipamentos a seco, nas etapas do corte, polimento, ou acabamento final (MELO, 2009).

Diversos trabalhos evidenciam pesquisas com possibilidade de uso destes resíduos. No entanto, deve-se observar com critério este uso, considerando que produtos químicos utilizados para melhoria do acabamento final da peça, como resinas, ceras, solventes, impermeabilizantes e agentes protetores, podem promover contaminação dos resíduos gerados (MELO, 2009).

Moura *et al.* (2002) verificou a viabilidade de uso de resíduo de corte de mármore e granito resultante da serragem de blocos dessas rochas e concluiu que estes resíduos não apresentam riscos ambientais e que sua utilização em até 10%

como agregado miúdo para argamassa de revestimento é tecnicamente viável, bem como, na produção de lajotas para pisos. Foi verificado pelos autores um melhor desempenho da resistência à compressão para as argamassas com uso de resíduo de mármore e granito, em relação à argamassa de referência.

Queiroz e Frascá (2008) apresentam a possibilidade de uso de agregado a partir dos resíduos das marmorarias com características tecnológicas adequadas para uso na produção de concreto, onde o concreto preparado revelou resistência em torno de 35 MPa, demonstrando um agregado apropriado para uso em concreto.

Coura (2009) pesquisou sobre a utilização de rejeitos de mármore triturado, substituindo o agregado miúdo natural, como alternativa na produção de concretos. Foi verificado que os concretos elaborados com o resíduo de mármore triturado apresentaram características mecânicas e de durabilidade superiores às do concreto de referência da pesquisa elaborada, mostrando viabilidade da utilização desses para confecção de concreto. Na pesquisa foram realizados ensaios, além da mistura de referência utilizando areia natural, foram formuladas quatro novas misturas, com substituição em 20%, 40%, 60% e 100% da areia natural por resíduo de mármore triturado, utilizando mesma distribuição granulométrica. Nas composições elaboradas foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão, módulo de deformação, coeficiente de Poisson, velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, retração hidráulica, absorção por imersão e absorção por sucção capilar, foi verificado que os concretos elaborados com o rejeito de mármore triturado apresentaram características mecânicas e de durabilidade superiores às do concreto de referência, mostrando a viabilidade da utilização desses rejeitos para confecção de concreto.

Santos (2011) pesquisou sobre o emprego de resíduo de mármore triturado em substituição ao agregado miúdo natural na produção de argamassas com estudo de diversos traços de argamassas (cimento: cal hidratada: areia). O autor realizou diversos ensaios: resistência a compressão axial; resistência a tração por compressão diametral; modulo de elasticidade; velocidade de propagação de

ondas ultrassônicas; retração hidráulica; absorção por capilaridade, por imersão e pelo método do cachimbo e dureza superficial (esclerometria). Foi concluído na pesquisa que as argamassas confeccionadas com o agregado alternativo apresentaram características mecânicas e de durabilidade superiores as de referência, sendo denominadas como argamassas de alto desempenho.

Santos *et al.* (2013) caracterizaram resíduos de rochas ornamentais provenientes de distintos processos de corte e beneficiamento de rochas denominados de resíduos de granalha, diamantado, levigação e polimento. Foi verificado pelos autores que os resíduos apresentaram diferentes características químicas, físicas, térmicas, e que o principal elemento químico verificado foi a sílica (SiO_2), por ser característica de rochas ácidas (rochas silicatadas), sendo o resíduo diamantado aquele que apresentou o mais alto teor de sílica. Para o resíduo denominado granalha, oriundo da serragem nos teares de lâmina metálica, a pesquisa constatou a presença de óxido de ferro e cálcio, em nível mais alto, considerando que esta etapa é auxiliada pelo uso de polpa de água, cal e granalha. Foi verificado pelo autor que os resíduos estudados ricos em $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (80,980% – 95,316%) apresentaram grande potencial para serem utilizados na confecção de argamassas.

Alves (2008) estudou o uso do resíduo gerado no polimento de placas de granitos como adição mineral em concretos. O trabalho envolveu a caracterização do resíduo e dos componentes empregados nos concretos, com verificação da pozolânicidade ou efeito fíler do resíduo. O autor concluiu que 20% é um teor de adição ideal, e que os resíduos atuaram como efeito fíler no concreto, preencheu os espaços vazios, presentes na pasta de cimento, diminuiu a porosidade da matriz de cimento, proporcionou um ganho de resistência e, conseqüentemente melhoria da qualidade.

Gonçalves (2000) pesquisou o resíduo de corte do granito (em pó) como adição na produção de concreto e constatou ser tecnicamente viável o uso.

Barros (2008) avaliou as propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável com uso de resíduo de corte de mármore e granito, originado de tanques de decantação de indústria de beneficiamento. Verificou que os resultados mostraram superiores àqueles apresentados pelo concreto de referência.

Kitamura (2011) estudou o uso de retalhos de granitos triturados em substituição, parcial e/ou total ao agregado miúdo natural na produção de concreto de cimento Portland. Os resultados obtidos indicaram ser tecnicamente viável a substituição por promoverem misturas de concreto com propriedades adequadas ao uso.

3.3 Compostos Cimentícios

3.3.1 Considerações gerais

Diversos materiais, que podem substituir parcialmente o cimento portland, seja por ação química, ou por ação física, são denominados materiais cimentícios. São considerados compostos cimentícios aqueles materiais, de grande uso na construção civil, originados da mistura homogênea entre aglomerantes e agregados minerais com água, com propriedades de aderência e endurecimento. Os aglomerantes são em geral o cimento Portland e cal hidratada. De acordo com Neville e Brooks (2013) o concreto tem sido citado como um material bifásico. Os autores informam que em termos gerais, um material compósito é constituído por duas fases e pode ter duas formas distintas. Abordam que denomina-se materiais cimentícios aqueles materiais que contribuem para a resistência do concreto, seja por ação química ou física. Pode-se entender como compostos cimentícios as pastas, as argamassas e os concretos.

O concreto é um material compósito, no qual muitas características não seguem as regras das misturas. Sob cargas de compressão, tanto o agregado quanto a pasta de cimento hidratada, separadamente testados, apresentarão rompimento elástico, enquanto que o concreto apresenta comportamento inelástico, antes de romper. Além disso, a resistência do concreto normalmente é muito menor que a resistência individual dos dois componentes. Essas anomalias de comportamento do concreto podem ser explicadas com base em sua microestrutura, especialmente pelo importante papel da zona de transição na interface entre agregado gráudo e pasta de cimento (METHA; MONTEIRO, 2008).

Concreto pode ser entendido no sentido mais amplo, conforme Neville e Brooks (2013) como qualquer produto ou massa produzido a partir do uso de um meio cimentante, esse meio, geralmente, é oriundo do produto da reação entre um cimento hidráulico e água, Segundo os autores o concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e também conter pozolanas, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras.

Paulon e Kirchheim (2011) consideram o concreto endurecido como uma rocha artificial, comparável a um conglomerado constituído por uma associação de agregados gráudos e grãos de areia, de dimensões variáveis, englobados por uma pasta de cimento. Os autores informam que as propriedades desse material heterogêneo, em particular suas características mecânicas, elásticas, físicas e químicas, as quais condicionam o seu emprego, dependem de um grande número de fatores relativos à pasta em si, aos agregados utilizados e enfim à ligação entre esses dois elementos essenciais.

De acordo com Neville e Brooks (2013) a pasta de cimento pode ser vista como constituída de grãos duros de cimento anidro em uma matriz macia de produtos de hidratação. Os autores informam que os produtos de hidratação, por sua vez, são constituídos por poros capilares macios, em uma matriz dura de gel de cimento.

Conforme ABNT NBR 13281:2005 define-se argamassas como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosadas em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada). As argamassas podem ter diversas funções e utilização conforme propriedades específicas, conforme ABNT NBR 13529:2013.

3.3.2 Constituintes

Os compostos cimentícios consistem da mistura de aglomerante com água considerada como pasta, de aglomerantes com agregados miúdos e água denominado argamassa, ou ainda da mistura de aglomerante com agregados miúdos, agregados graúdos e água na composição do concreto. Podem ter aditivos e adições para melhoria de alguma propriedade desejada.

Cimento

Conforme Metha e Monteiro (2008) cimento anidro é um pó cinza composto de partícula com dimensões que variam normalmente de 1 μm a 50 μm . Neville e Brooks (2013) apresentam que o cimento Portland é obtido pela mistura de calcário, argila ou outros materiais silicosos, alumina e materiais que contenham óxido de ferro, essa mistura é queimada à temperatura de clinquerização, resultando no clínquer, moído. Pode-se deduzir que o cimento Portland é produzido essencialmente a partir da mistura de um material cálcico, como o calcário ou giz, e a sílica e a alumina encontradas em argilas ou folhelhos.

Neville e Brooks (2013) destacam que quatro compostos são os principais constituintes do cimento. A denominação abreviada, utilizada pela química do cimento, descreve cada óxido por uma letra, ou seja: $\text{CaO} = \text{C}$; $\text{SiO}_2 = \text{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$; e $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$. da mesma forma que H_2O no cimento hidratado é representado como H. O quadro 3.4 apresenta os principais constituintes do cimento.

Quadro 3.4 - Principais compostos do cimento Portland.

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Neville e Brooks (2013)

Neville e Brooks (2013) abordam que a hidratação do cimento ocorre quando na presença da água os silicatos e aluminatos do cimento Portland se hidratam, formando compostos hidratados que, com o passar do tempo, produzem uma massa sólida e resistente. Abordam que o C_3S se hidrata mais rápido que o C_2S e liberam como produto da hidratação o composto microcristalino $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ e a cal na forma cristalina de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Atualmente os silicatos de cálcio hidratados são descritos como C-S-H, anteriormente denominado gel de tobermorita.

A morfologia do C-S-H varia desde fibras pouco cristalinas até redes reticulares (METHA; MONTEIRO, 2008). Conforme Paulo e Kirchheim (2011) esta fase compõe 50% a 60% o volume dos sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada. Os autores abordam que em nível atômico o C-S-H é formado por cadeias de SiO_4 com possíveis substituições da Si por Al. Apresentam que os cristais de CH, também chamados de portlandita, constituem 20% a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada e que os sulfoaluminatos de cálcio ocupam 15% a 20% do volume de sólido da pasta de cimento hidratada e possuem um papel secundário nas relações da microestrutura-propriedades. Conforme Metha e Monteiro (2008) durante os estágios iniciais da hidratação, a relação sulfato/alumina favorece a formação do trissulfato hidratado conhecido como etringita, podendo transformar em maiores idades em monossulfoaluminato hidratado.

Conforme Neville e Brooks (2013) os dois silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) são os compostos mais importantes, pois são responsáveis pela resistência da pasta do cimento hidratada, sendo que o C_3S contribui principalmente para o desenvolvimento da resistência durante as primeiras quatro semanas, enquanto o

C_2S tem influência no ganho de resistência posterior. Na idade próxima a um ano, os dois componentes massa por massa, tem contribuição aproximadamente igual na resistência do cimento hidratado. Os autores informam que na realidade, os silicatos no cimento não são compostos puros, pois contêm alguns óxidos secundários na solução sólida. Esses óxidos têm efeitos significativos no arranjo atômico, forma dos cristais e propriedades hidráulicas dos silicatos. Abordam que a quantidade de C_3A na maioria dos cimentos é relativamente pequena e que a reação do C_3A puro com a água é muito rápida e resulta na pega instantânea, que é prevenida pela adição do sulfato de cálcio ao clínquer e que a quantidade de água requerida é maior que na hidratação dos silicatos.

Para Neville (1997), a resistência à compressão de um concreto, após cura em água à temperatura constante, depende da relação água/cimento e adensamento. Quanto menor a relação água/cimento e melhor adensamento do concreto, maior será a resistência à compressão e menor será a porosidade da pasta de cimento

De acordo com Carasek (2007) o tipo e as características físicas do cimento podem influenciar nos valores das propriedades mecânicas e de durabilidade. Um dos parâmetros mais significativos é a finura do cimento: quanto mais fino o cimento, maior a resistência, tanto a resistência final, relativa a idade superior a 6 meses, quanto, principalmente as iniciais de 3 a 14 dias. Neville e Brooks (2013) apresentam que a hidratação começa na superfície das partículas do cimento, que representa o material disponível para a hidratação. Portanto, a velocidade de hidratação depende da finura das partículas das partículas de cimento e, para um rápido desenvolvimento de resistência, é necessária uma finura elevada.

Água

Conforme Metha e Monteriro (2008) o cimento anidro não tem poder aglomerante, só adquire esta propriedade quando misturado com água, por meio da reação química denominada hidratação do cimento, resultando assim em produtos, que possuem características de pega e de endurecimento.

Conforme Isaia (2011) no concreto fresco a água é o agente que promove a diminuição do atrito por meio de película envolvente aos grãos, promovendo a aglutinação do agregado por intermédio da pasta de cimento, fornecendo a coesão e consistência necessárias para que o concreto no estado plástico possa ser produzido, transportado e colocado nas formas sem perda da sua homogeneidade.

Para que as reações de hidratação sejam completas, deve haver quantidade de água suficiente para que estas reações se processem integralmente. Metha e Monteiro (2008) apresentam que a água está presente na pasta de cimento em diversos estados, como:

- Água quimicamente combinada: aquela que integra as moléculas dos produtos de hidratação da pasta cimentícia, não se perde por secagem, sendo removida com a decomposição dos produtos hidratados por aquecimento;
- Água interlamelar: Associada à estrutura C-S-H, presente entre as lamelas formadas durante a polimerização dos silicatos conforme se desenvolve o grau de hidratação. A distância entre as lamelas é pequena e provavelmente exista somente uma camada monomolecular de água entre elas, tornado-a fortemente aderida pelas forças de Van der Waals por meio das pontes de hidrogênio. É removida com secagem muito forte, ocasião em que o C-S-H retrai com a perda;
- Água adsorvida: Aderida a superfície das paredes das moléculas dos produtos hidratados, por meio das forças de Van der Waals proporcionadas pelas pontes de hidrogênio. Como as energias de ligação das moléculas individuais de água diminuem com a distância da superfície do sólido, uma porção maior da água adsorvida pode se perder por secagem da pasta de cimento hidratada a 30% de umidade relativa. A perda de água adsorvida é responsável pela retração da pasta de cimento hidratada.

- **Água capilar:** É a água que se encontra em vazios maiores que 50 Å. Pode ser dividida em duas categorias: a água em grandes vazios da ordem de > 50 nm (0,05 µm), identificada como água livre, cuja remoção não altera volume, e a água retida por tensão capilar em pequenos capilares (5 a 50 nm), cuja remoção causa retração do sistema. Esta água é o principal agente da retração, que tanto maior quanto menor for os poros da pasta, em vista das forças de tensão superficial serem inversamente proporcional à película de água aderida à superfície sólida.

Agregados

Os agregados para concretos normalmente são definidos como inertes, contudo certos elementos mineralógicos, contidos nos grãos, podem reagir com os compostos do cimento, com a cal liberada na hidratação dos silicatos, ou alterar-se em presença do ar e água, dando como resultado substâncias expansivas que podem causar a desagregação do concreto (PETRUCCI,1987). Neville (2013) aborda que como os agregados não são totalmente inertes, suas propriedades físicas, térmicas e algumas vezes químicas influenciam no desempenho do concreto podendo melhorar sua estabilidade dimensional e durabilidade em relação às da pasta de cimento.

Dependendo do tipo de rocha e da escolha do britador, o agregado britado pode conter uma proporção considerável de partículas achatadas ou alongadas, que afetam negativamente muitas propriedades do concreto (METHA; MONTEIRO, 2008). Os fragmentos, pedaços da rocha intacta, podem ser provenientes da desagregação natural devida a agente de intemperismo, ou da desagregação artificial por um processo mecânico. De acordo com Neville (2013), do ponto de vista petrográfico, os agregados podem ser divididos em diversos grupos de rochas com características comuns conforme quadro 3.5.

O diagrama na figura 3.1, apresentado por Metha e Monteiro (2008), ilustra as várias inter-relações e demonstra as características do agregado que são importantes para as propriedades do concreto, decorrentes da microestrutura da

rocha matriz, das condições prévias de exposição e fatores relacionados ao processo de fabricação do agregado.

A Norma ABNT NBR 7211:2009 estabelece 4,75 mm como a divisão entre agregados miúdos e agregados graúdos. É considerado como agregado graúdo aquele cujas partículas são maiores que 4,75 mm e ficam retidas na peneira nº 4 e o agregado miúdo aquele cujas partículas são menores que 4,75 mm. Conforme Metha e Monteiro (2008) em geral os agregados miúdos contêm partículas com tamanhos variando de 75 μm (peneira nº 200) a 4,75mm, enquanto o agregado graúdo varia de 4,75 mm a cerca de 50 mm. Os autores informam que segundo a massa específica podem ser classificados em leves, aqueles com massa unitária menor que 1.120 Kg/m^3 , médios e pesados, aqueles que pesam mais que 2.080 Kg/m^3 .

Quadro 3.5 – Classificação de Agregados Naturais de acordo com o tipo de Rocha.

Grupo Basalto	Grupo Flint	Grupo Gabro
Andesito	Chert	Diorito básico
Basalto	Flint	Gnaisse básico
Porfiritos básicos		Gabro
Diabásio		Hornblenda
Todos os tipos de doleritos, incluindo teralito e teschenito		Norito
Epidiorito		Peridotito
Lamprófiro		Picrito
Quartzo-dolerito		Serpentinito
Espilito		
Grupo Granito	Grupo Arenito (incluindo rochas vulcânicas fragmentadas)	Grupo Hornfels Todos os tipos de rochas de contato alteradas, exceto mármore
Gnaisse		
Granito	Arcósio	
Granodiorito	Grauvaca	
Granulito	Arenito	
Pegmatito	Tufo	
Quartzo-diorito		
Sienito		
Grupo Calcáreo	Grupo Porfirítico	Grupo Quartzito
Dolomito	Aplito	Quartzito
Calcário	Dacito	Arenito quartzítico
Mármore	Felsito	Quartzito recristalizado
	Granófiro	
	Queratófiro	
	Microgranito	
	Pófiro	
	Quartzo-porfirítico	
	Riólito	
	Traquito	
Grupo Xisto		
Filito		
Xisto		
Folhelho		
Todas as rochas altamente cisalhadas		

Fonte: Neville, Brooks (2013)

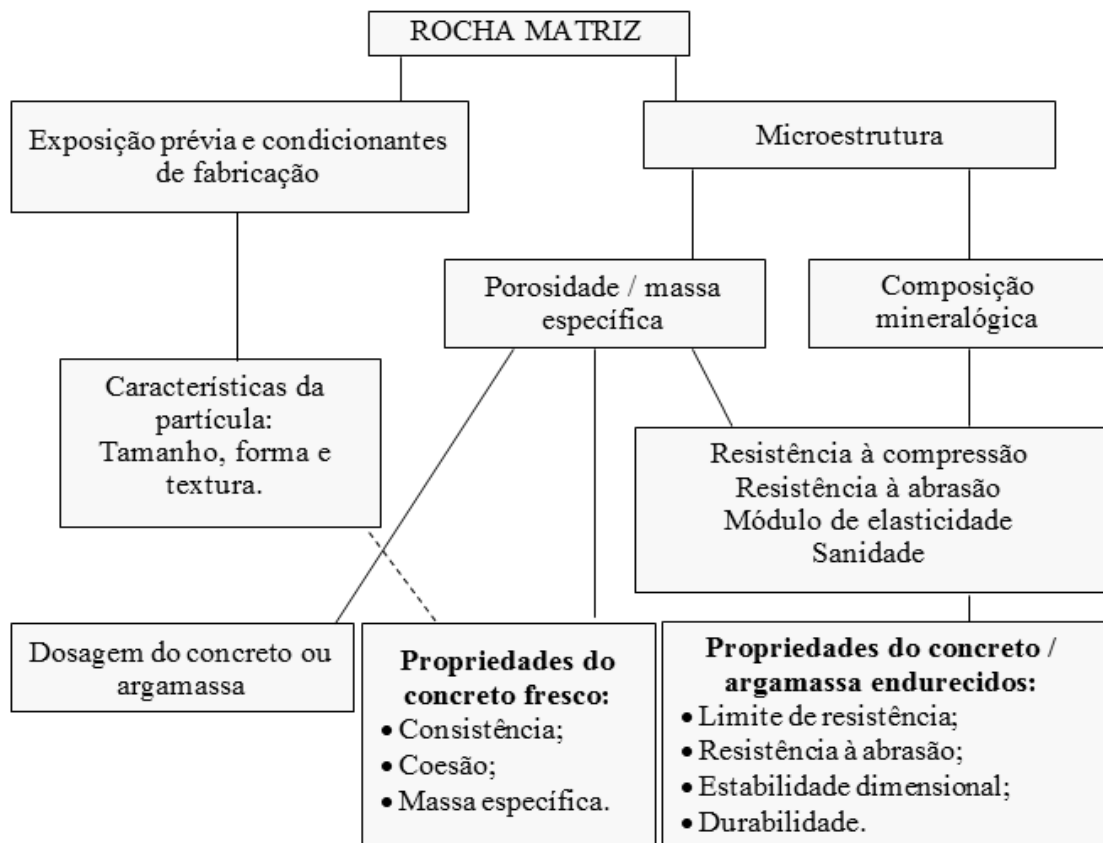


Figura 3.1 - Diagrama ilustrativo das inter-relações das propriedades dos agregados em relação às características dos compósitos cimentícios.

Fonte: Adaptado de Metha e Monteiro (2008)

Distribuição granulométrica das partículas

O agregado é formado por mistura de grãos de extensa gama de tamanhos. A distribuição dos tamanhos dos grãos na massa total pode variar conforme o agregado. Denomina-se diâmetro máximo do agregado a abertura da peneira, em que ficar retida, acumulada, uma porcentagem igual ou imediatamente inferior a 5%. Denomina-se módulo de finura a soma das porcentagens retidas, acumuladas, divididas por 100. De acordo com esses dois índices, caracteriza-se o agregado do ponto de vista granulométrico (PETRUCCI, 1987).

A distribuição granulométrica tem influência na trabalhabilidade do concreto fresco: alta porcentagem de material fino (~0,15mm) exige aumento da água de amassamento e conseqüentemente de cimento para o mesmo fator água

cimento. Há ainda que considerar material ainda mais fino, inferior a 0,076 mm, portanto, com finura da ordem do cimento; é ainda mais pernicioso, pois os grãos misturam-se com os do cimento, criando descontinuidade na argamassa e reduzindo a resistência do concreto. A grande superfície específica desse material requer muita água de molhagem, e para a mesma trabalhabilidade e fator água/cimento, requer maior quantidade de cimento, aumentando a retração e a permeabilidade do concreto (ALBUQUERQUE, 2009).

Conforme Metha e Monteiro (2008), areias muito grossas produzem misturas de concreto ásperas e não trabalháveis, e areia muito fina aumentam a demanda de água e também o consumo de cimento para uma dada relação água/cimento, não sendo econômicas. Agregados de granulometria contínua, ou seja, que não apresentam grande deficiência ou excesso de qualquer dimensão de partícula produzem misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas.

Segundo Nevlille e Brooks (2013) para se conseguir condições ótimas de mínimo vazios ou maior adensamento sem segregação, a influência do tipo de agregado e da granulometria deve ser considerada. Partículas mais finas requerem mais água para a molhagem de suas superfícies específicas, enquanto a forma irregular e textura rugosa de um agregado anguloso demandam mais água que um agregado arredondado. A porosidade ou absorção do agregado é também importante, considerando que parte da água de amassamento será removida daquela necessária à lubrificação das partículas.

Massa específica

A massa específica aparente do agregado depende da massa dos minerais do qual o agregado é constituído e da quantidade de vazios. O espaço ocupado pelas partículas é que interessa e despreza os vazios internos existentes. A massa específica aparente se refere ao peso da unidade de volume aparente dos grãos, incluindo no volume os poros permeáveis e impermeáveis, excluindo os vazios entre os grãos (PETRUCCI, 1987).

Massa específica real dos grãos se refere à massa da unidade de volume, excluindo deste os vazios permeáveis e os vazios entre os grãos. Conforme Petrucci (1987), a massa específica real ou absoluta só pode ser obtida reduzindo a pó o material, de modo a eliminar o efeito dos vazios impermeáveis. A tabela 3.3 apresenta a massa específica aparente de diversos grupos de rochas.

Tabela 3.3 – Massa específica aparente de diversos grupos de rochas, em kg/m³

Grupo	Massa Específica média (kg/m ³)	Intervalo de variação
Basalto	2800	2600 – 3000
Sílex	2540	2400 – 2600
Granito	2690	2600 – 3000
Arenito	2690	2600 – 2900
Hornfel	2820	2700 – 3000
Calcário	2660	2500 – 2800
Quartzito	2620	2600 – 2700

Fonte: Neville, 1997

A massa específica real do agregado miúdo, eliminando desse conceito os agregados leves, anda em torno de 2,65 kg/dm³ e, sempre que não for possível sua determinação, deve adotar este valor (PETRUCCI, 1987).

Absorção e umidade superficial

De acordo com Metha e Monteiro (2008) a capacidade de absorção do agregado é definida como a quantidade total de água requerida para levá-lo da condição seco em estufa à condição SSS, que se refere a situação quando todos os poros permeáveis estão saturados e não há uma película ou filme de água na sua superfície. Os autores apresentam que quando o agregado está saturado e também há umidade livre na superfície, o agregado está na condição úmida ou saturada. Na condição seca em estufa, toda a água evaporável foi eliminada por aquecimento a 100°C.

A absorção de água é determinada pela medida do decréscimo da massa de uma amostra saturado superfície seca após secagem em estufa por 24 horas. O valor de perda de massa em relação à massa da amostra seca expressa como uma porcentagem é denominada absorção. Neville e Brooks (2013) apresenta como

absorção a água contida no agregado na condição saturado superfície seca e que o teor de umidade pode ser definido como a água excedente a essa condição. O total de água em um agregado úmido é a soma da absorção e do teor de umidade.

Dependendo do teor de umidade e da composição granulométrica do agregado miúdo, pode ocorrer um aumento considerável do volume aparente da areia, fenômeno chamado inchamento (METHA; MONTEIRO, 2008).

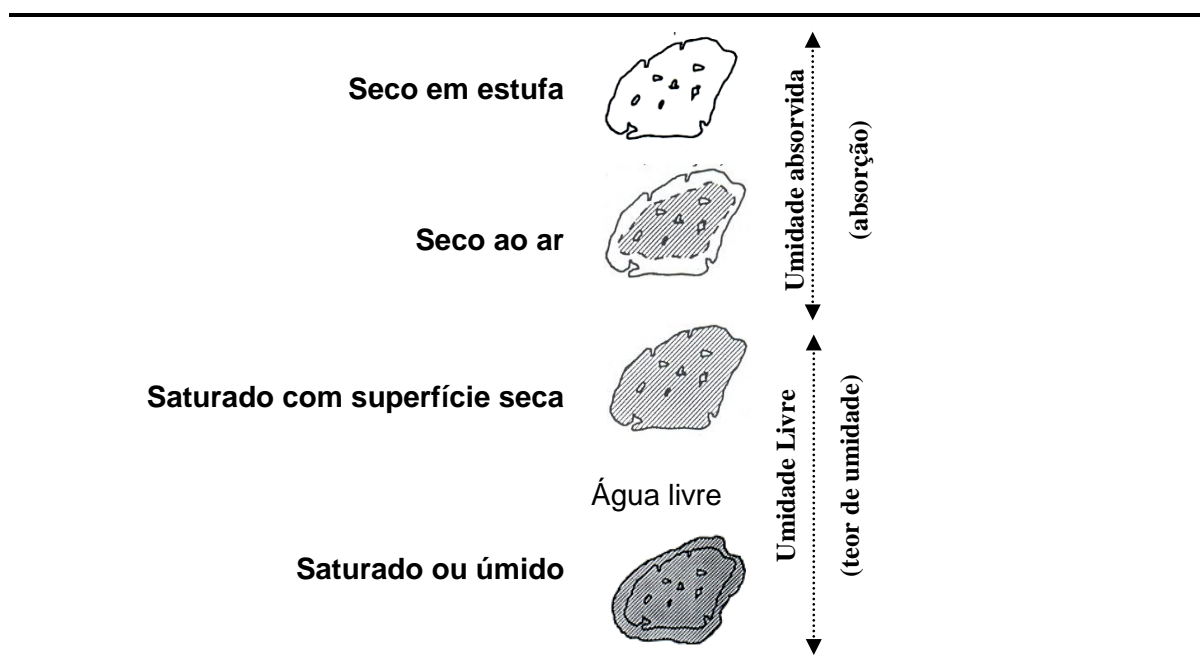


Figura 3.2 - Representação esquemática da umidade do agregado.

Fonte: Adaptado de Neville e Brooks (2013)

Inchamento do agregado miúdo

De acordo com Neville e Brooks (2013), no caso da areia, outro efeito da presença da umidade é o inchamento, que é o aumento de volume de uma determinada massa de areia causada pelo afastamento das partículas devido ao filme de água em torno do grão. O autor apresenta que apesar do inchamento por si mesmo não afetar o proporcionamento dos materiais em massa, nos casos em que o proporcionamento é realizado em volume, o inchamento resulta em menor massa de areia ocupando o volume fixo da caixa de medida ou padiola.

3.3.3 Aditivos, adições e fillers

De acordo com Metha e Monteiro (2008) o reconhecimento de que as propriedades do concreto, nos dois estados, fresco e endurecido, podem ser modificadas com adições de determinados materiais às misturas de concreto tem sido responsável pelo grande crescimento da indústria de aditivos e adições para concreto nos últimos 50 anos. Conforme Recena e Pereira (2011) as adições minerais se diferem dos aditivos, pois podem, além de apresentar atividade química, introduzir alterações eminentemente físicas, sendo sempre empregadas em quantidades significativamente maiores que aquelas definidas para os aditivos. Conforme Andrade e Tutikian (2011), de uma forma geral, pode afirmar que a incorporação das adições atua modificando a estrutura interna da pasta de cimento hidratada. Essas modificações podem ocorrer devido a dois efeitos: físico e químico.

Os aditivos são produtos químicos que, adicionados intencionalmente ao concreto, tem a finalidade de reforçar ou melhorar certas características, facilitando seu preparo e utilização, muitas vezes possibilitando a redução de custo (RECENA; PEREIRA, 2011). Os autores abordam que o uso de aditivos químicos permite a produção de materiais cimentícios para uma ampla variedade de aplicações, desde misturas com consistência seca até concreto autoadensável. Informam que os aditivos químicos podem ser classificados de acordo com a função que exercem, como: incorporadores de ar, redutores de água, retardadores de pega, modificadores de reologia, inibidores de corrosão, redutores de retração, redutores de permeabilidade, inibidores de reação álcali-sílica, pigmentos e outros de funções variadas, tais como agentes de formação de gás, agentes de coesão, agentes para bombeamento e agentes espumantes dentre outros.

Adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, normalmente adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, que variam de 20% a 70% por massa do material cimentício total, podendo ou não substituir parcialmente o cimento (METHA; MONTEIRO, 2008).

Conforme Kihara (1981) as adições minerais exercem grandes influências pelas características físicas e pela reatividade química. A alta finura das adições, quando incorporadas aos concretos, reduz o tamanho e o volume de vazios, dando uma melhoria na coesão, diminuindo a segregação e a exsudação. As pozolanas aumentam a plasticidade do concreto no estado fresco e diminuem a exsudação e a segregação.

Conforme Molin (1995) vários podem ser os efeitos físicos gerados pelas adições nos concretos. O autor aborda que o efeito microfíler ocasiona um aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições, cujo diâmetro médio deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento.

As adições melhoram certas características do concreto preparado com o cimento que as contém e preservam o ambiente ao aproveitar resíduos e diminuir a extração de matéria-prima e as emissões de gases de efeito estufa (BATTAGIN, 2010). De acordo com Molin (2011) as adições minerais, contribuem na produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas, já que estas modificam a estrutura interna da pasta de cimento hidratada e da zona de transição agregado/matriz, promovendo uma redução na porosidade capilar do concreto, responsável pelas trocas de umidade, íons e gases com o meio, além de diminuir o calor de hidratação e conseqüentemente, as fissuras de origem térmica. A autora aborda ainda que, as adições minerais quimicamente ativas são conhecidas por aumentar a resistência ao ataque de sulfatos e diminuir as expansões decorrentes das reações álcali-agregado. Conforme Andrade e Tutikian (2011), o efeito químico, conhecido como efeito pozolânico, relaciona com a reação das adições com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 oriundo do processo de hidratação do cimento, formando o silicato de cálcio hidratado C-S-H adicional, que é o principal componente responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas. Molin (2011) esclarece que as adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, podem ser classificadas em três grandes grupos: material pozolânico, material cimentante e fíler.

- Material pozolânico de acordo com a ABNT NBR 12653:2014 são materiais silicosos ou sílicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante (cimentante), mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes (cimentantes). Molin (2011) apresenta como exemplos de materiais pozolânicos a cinza volante com baixo teor de cálcio, a pozolana natural, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim.
- Material cimentante não necessita do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes como o C-S-H. No entanto, sua auto-hidratação é normalmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais. Quando usado como adição ou substituição em cimento Portland, a presença de hidróxido de cálcio e gipsita acelera sua hidratação, como é o caso da escória granulada de alto forno (MOLIN 2011).
- Filer é uma adição mineral finamente dividida sem atividade química, ou seja, sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (MOLIN, 1995; MOLIN, 2011). De acordo com Silva (2010) filer possui diâmetro médio próximo ao do cimento Portland, que, em decorrência da sua ação física, melhora algumas propriedades do concreto, quando em teores menores que 15% em relação a massa de cimento. Entre as propriedades melhoradas, podem citar a trabalhabilidade, a massa específica, a permeabilidade, a exsudação e a tendência à fissuração (NEVILLE; BROOKS, 2013; SILVA, 2010). Embora sejam, em geral, quimicamente inertes, não considera este fator como negativo, pois podem possuir algumas propriedades hidráulicas ou participarem de reações inofensivas com os produtos da pasta de cimento hidratada (NEVILLE; BROOKS, 2013). Conforme Andrade e Tutikian (2011), o efeito físico consiste basicamente no aumento da densidade do concreto em função do preenchimento dos vazios pelas partículas das adições, que normalmente apresentam elevada finura, refinando a

estrutura dos poros. Os autores abordam que há uma minimização da espessura da zona de transição pela redução da exudação, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água retida sob os agregados graúdos.

Segundo Neville e Brooks (2013) a cinza volante e dióxido de Titânio em forma de partículas menores que 1 μm , podem atuar como fillers promovendo pontos de nucleação e melhorando a hidratação do cimento Portland. De modo adicional ao papel de nucleação, o CaCO_3 se incorpora a fase C-S-H, o que tem efeito benéfico na estrutura da pasta de cimento hidratada. Os autores abordam que materiais considerados como filler podem ser de origem natural ou materiais processados inorgânicos, sendo essencial que tenham propriedades uniformes, em especial a finura, não devem aumentar a demanda de água quando utilizados em concretos e não devem causar uma diminuição da resistência no longo prazo da resistência do concreto. Os autores acrescentam que devido à reação dos fillers ser predominantemente física, eles devem ser fisicamente compatíveis com o cimento a que serão incorporados.

Conforme Isaias (2011) alguns resíduos podem ser utilizados como filler, desde que devidamente moídos, com efeitos nas propriedades mecânicas majorados principalmente em concretos de baixa resistência (≤ 20 MPa), e ambientalmente adequados, como lodo de estações de tratamento de esgoto calcinado em incineradores, cinza da combustão de eucalipto sem controle de temperatura, resíduos do corte de granito, dentre outros.

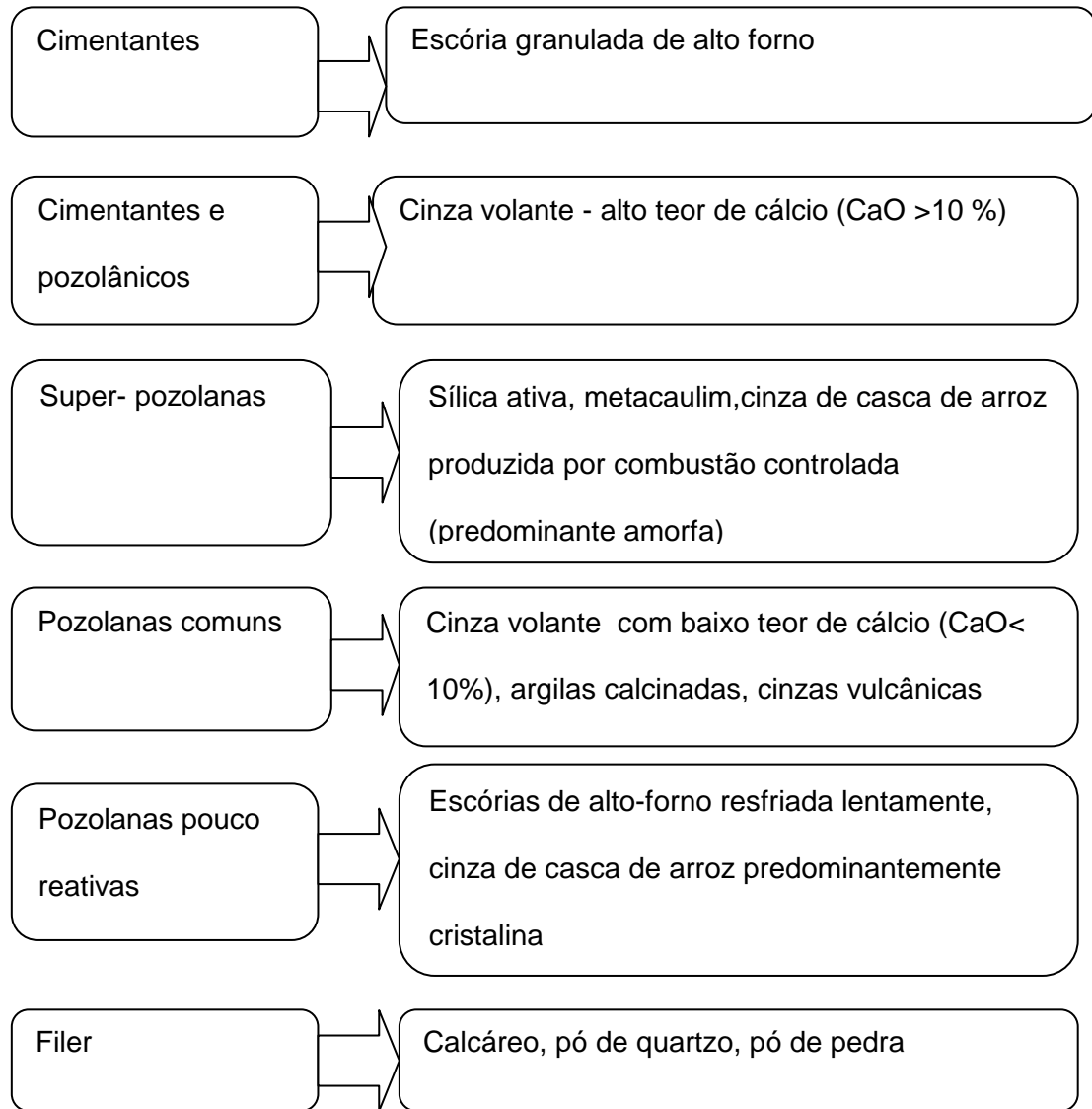


Figura 3.3 - Classificação das adições minerais para concreto estrutural.

Fonte: Adaptado Molin (2011)

3.3.4 Avaliação do desempenho de compostos cimentícios

A avaliação do desempenho de compostos cimentícios é comumente avaliada em pastas e argamassas/concretos pelas propriedades, algumas listadas a seguir:

Calor de Hidratação

Conforme Neville e Brooks (2013) assim como várias outras reações químicas, a hidratação do cimento é exotérmica, definindo o calor de hidratação como a quantidade de calor liberado em joules por grama de cimento anidro até a hidratação completa a uma dada temperatura. Segundo Santos *et al.* (2011) um aspecto que contribui para o aumento do calor de hidratação é a finura do cimento, uma vez que quanto mais fino, mais rápida são as reações de hidratação, considerando não só a maior superfície específica, que propicia condições mais favoráveis para as reações, como também a natural maior reatividade das menores partículas.

Conforme Neville e Brooks (2013) a temperatura em que ocorre a hidratação afeta fortemente a velocidade de desenvolvimento de calor, e para fins práticos é mais importante que o calor total de hidratação. Os autores abordam que ao reduzir as proporções de C_3A e C_3S o calor de hidratação (e a velocidade de liberação) do cimento pode ser reduzido.

A hidratação de materiais cimentícios em concretos é resultado de uma somatória de reações químicas exotérmicas dos compostos do cimento, liberando calor. O monitoramento da hidratação pode ser medido como total de calor acumulado, pela variação da temperatura ao longo do tempo em ensaios de calorimetria. Conforme Benini e Sandberg (2008) existem dois principais tipos de testes de calorimetria: isotérmico e adiabático. Na calorimetria isotérmica, o calor de hidratação é medido pela determinação do fluxo de calor da amostra, enquanto a amostra e o ambiente no qual está inserida são mantidos em temperaturas aproximadamente constantes. Em um teste em calorímetro adiabático, o calor de hidratação é medido pelo monitoramento do fluxo de calor da amostra, enquanto esta é mantida sobre uma condição de isolamento térmico ideal com mínima perda de calor para o ambiente. Na medida em que um sistema isotérmico ou adiabático “perfeito” é quase impossível de se obter sem o uso de equipamento e ambientes bastante delicados e de altíssimo custo, o uso de teste de calorímetro

semi-adiabático apresenta-se como uma aproximação adequada para fins práticos de aplicação sendo adotada com sucesso.

Conforme Cincotto (2011) o pico intenso na calorimetria apresenta a liberação de calor de alguns minutos, correspondente à molhagem das partículas, neutralização das cargas elétricas superficiais, o início da solubilização do silicato e crescimento na concentração do cálcio. Conforme o autor logo em seguida o calor diminui drasticamente indicando diminuição de reação, porém sem atingir o valor zero. Aborda ainda que, após o pico de aceleração, as partículas menores já se hidrataram, o C-S-H preencheu os espaços vazios, a água disponível para a hidratação diminuiu e o seu contato com as partículas anidras é dificultado, iniciando o processo de desaceleração na velocidade. Conforme o autor a evolução da hidratação também se processa em função do diâmetro das partículas: até 10 h são consumidas as partículas 3 μm ; até 24 h as de 7 μm ; as maiores do que 45 μm hidratam-se com dificuldade; as de diâmetro superior a 90 μm não se hidratam.

Cincotto (2011) apresenta que a evolução cinética da hidratação do C_3S é representada pela curva de liberação do calor de reação, juntamente com a variação da concentração de cálcio, na qual se observam quatro períodos distintos, como pré-indução, indução, aceleração, e desaceleração. O autor aborda que a pré-indução apresenta um pico intenso de liberação de calor, de alguns minutos, corresponde à molhagem das partículas, neutralização das cargas elétricas superficiais e de solubilização do silicato, com aumento na concentração de cálcio.

Conforme Neville e Brooks (2013) a temperatura em que ocorre a hidratação afeta fortemente a velocidade de desenvolvimento de calor, e para fins práticos é mais importante que o calor total de hidratação. Os autores abordam que ao reduzir as proporções de C_3A e C_3S o calor de hidratação (e a velocidade de liberação) do cimento pode ser reduzido.

Trabalhabilidade, consistência e plasticidade.

Neville e Brooks (2013) definem trabalhabilidade como a quantidade de trabalho interno útil necessário à obtenção do adensamento total, corresponde ao trabalho ou energia exigidos para vencer o atrito interno entre as partículas individuais do concreto. Metha e Monteiro (2008) abordam trabalhabilidade como a propriedade que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco, com a perda mínima de homogeneidade. Os autores esclarecem que trata de uma propriedade composta de pelo menos dois componentes principais: fluidez (relativa a mobilidade) e coesão (relativa a resistência à exsudação e à segregação).

A trabalhabilidade representa a facilidade com que os compósitos no estado fresco podem ser misturados, transportados, aplicados, consolidados e acabados (CARASEK, 2007). A consistência e a plasticidade são os principais fatores condicionantes da trabalhabilidade e, por isso, algumas vezes são confundidas. A consistência considera o comportamento reológico das argamassas, no que tange a maior ou menor fluidez, e está associada à capacidade da mistura em resistir ao escoamento. Portanto compósitos de consistência mais fluidas representam misturas com menores valores de tensão de escoamento, sendo verdadeira a recíproca (seja qual for o modelo reológico considerado) (CARASEK, 2007).

De acordo com Romano *et al.* (2011), a consistência tem a ver com a facilidade de escoamento do material e com a sua coesão, enquanto trabalhabilidade está relacionada com a adequação do concreto a todas as etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento. Sendo assim, consistência está contida dentro do conceito maior de trabalhabilidade, sendo relacionada diretamente com as características de lançamento do concreto.

Conforme Neville e Brooks (2013) a trabalhabilidade depende de vários fatores que interagem: a quantidade de água, o tipo e a granulometria dos agregados, a relação agregado/cimento, presença de aditivos e a finura do cimento. O principal

fator é o teor de água da mistura, considerando que com a adição de água melhora a lubrificação entre as partículas.

Tempo de pega

De acordo com Neville e Brooks (2013) este termo é utilizado para descrever o enrijecimento da pasta de cimento, que se refere a mudança do estado fluído para o rígido. Os autores abordam que a pega é causada principalmente pela hidratação do C_3A e C_3S e é acompanhada pela elevação da temperatura na pasta de cimento. O início de pega corresponde a uma rápida elevação da temperatura e o fim corresponde ao pico de temperatura.

Expansibilidade

Neville e Brooks (2013) apresentam que é essencial que a pasta de cimento após a pega não apresente alteração de volume e que não deve ocorrer expansão significativa, pois isso pode causar a desagregação da pasta de cimento endurecida. Essas expansões ocorrem em função de reações de cal livre, magnésio e sulfato de cálcio, e os cimentos que apresentam esse tipo de expansão, são classificados como expansivos. Os autores abordam que a cal livre está presente no clínquer, intercrystalizada com outros compostos e, em função disso, hidrata-se muito lentamente, ocupando um volume maior que óxido de cálcio livre original. Abordam que a cal livre não pode ser determinada por análise química do cimento, por não ser possível distinguir entre o CaO que não reagiu e o $Ca(OH)_2$ produzido pela hidratação parcial dos silicatos, quando o cimento é exposto ao ar. Apresentam que o magnésio (MgO) reage com água de maneira similar ao CaO , mas somente sua forma cristalina tem uma reação deletéria que causa expansibilidade. O sulfato de cálcio é o terceiro composto causador de expansão, pela formação de sulfoaluminato de cálcio (etringita) devido a reação com o sulfato de cálcio excedente, não utilizado pelo C_3A durante a pega.

Ocorrência da Reação Pozolânica

De acordo com Donatello *et al.* (2010) a atividade pozolânica pode ser avaliada por métodos diretos, por meio dos quais se calcula a variação do Ca(OH)_2 ao longo do tempo, ou por meio de métodos indiretos, que avaliam as propriedades físicas e mecânicas do material pozolânico ou de compostos confeccionados com uso do material pozolânico. Dentre os métodos diretos, tem-se o método do ensaio Chapelle Modificado, que conforme ABNT NBR 15895: 2010, determina a atividade pozolânica dos materiais por meio do teor do hidróxido de cálcio fixado pela amostra do material pozolânico. Esta Norma se aplica a materiais silicosos e sílico-aluminosos, cuja fase amorfa tenha a capacidade de fixar o Ca(OH)_2 , como as pozolanas naturais, as pozolanas artificiais, as argilas calcinadas, as cinzas volantes, a sílica ativa e o metacaulim.

Dentre os métodos indiretos tem-se o ensaio de Termogravimetria (TGA) e análise Termodiferencial (DTA) que permitem avaliar a perda e ganho de massa em função da temperatura durante as reações de desidratação. As curvas de derivação primeira da TGA (DrTGA) permitem identificar com maior exatidão as temperaturas de início das reações, ou seja, onde a velocidade da reação é máxima, com o local de pico da DrTGA representando a região onde a velocidade da decomposição é máxima. A análise conjunta das curvas de variação de massa e energia em função da temperatura permite identificar as regiões onde ocorrem as reações de desidratação. A análise comparativa do percentual de perda de massa na temperatura de decomposição da portlandita possibilita avaliar a ocorrência ou não da reação pozolânica. A análise quantitativa da extensão da reação pozolânica pode ser feita derivando-se as curvas obtidas na análise termogravimétrica e identificando-se as zonas de desidratação da portlandita de amostras com e sem adição de pozolanas (IONASHIRO, 2005). Diferentes trabalhos têm avaliado a atividade pozolânica dos materiais a partir de ensaios de termogravimetria (RODRIGUES *et al.*, 2010; Sales 2014).

Conforme Cincotto (2011) a evolução da hidratação é acompanhada pela determinação da água quimicamente combinada por aquecimento em termo

balança, em atmosfera inerte, comumente nitrogênio. O autor apresenta que a amostra é submetida a uma taxa de aquecimento programado a uma temperatura de 25°C a 1000°C e as perdas de massa (Δm) são registradas nas temperaturas em que ocorre a desidratação dos produtos. Essa determinação é feita em qualquer idade, após a secagem da amostra para eliminar a água livre, adsorvida e interlamelar, o que interrompe a hidratação.

De acordo com Cincotto (2011) as perdas de massa dos silicatos, sulfoaluminatos e aluminatos são sequenciais sendo somente diferenciadas pela DTG – curva termogravimétrica diferencial, que é traçada como a primeira derivada dos dados da TG; os eventos térmicos passam a ser indicados por picos em faixas características de temperatura, com respectiva perda de massa. Conforme o autor eles não representam de fato a perda de massa de fases individualizadas porque a transformação térmica de cada hidrato se dá numa faixa ampla de temperatura o que resulta numa superposição parcial dos picos. Objetivando acompanhar a evolução da hidratação, os ensaios são realizados com uma mesma massa de amostra, na mesma finura. Como a perda de massa é função do tempo de hidratação, os resultados relativos a cada idade são recalculados para uma base única sem voláteis, isto é, normalizado a 100%.

Massa específica

De acordo com Carasek (2007) a densidade de massa também denominada como massa específica, varia com o teor de ar incorporado, principalmente quando ocorre por meio de aditivos, e com a massa específica dos materiais constituintes, principalmente do(s) agregado(s).

A massa específica é definida como a massa do material, incluindo os poros internos, por unidade de volume. De acordo com Carasek (2007) a massa específica da argamassa endurecida é um pouco menor do que o valor do estado fresco, devido à saída de parte da água. É observada uma relação direta entre o teor de água da argamassa e a redução da densidade de massa com secagem.

Carrijo (2005) realizou estudo sobre a influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto e observou que nos concretos frescos a massa específica variou principalmente em função da massa específica do agregado utilizado, reduzindo à medida que se diminuiu o valor da massa específica dos agregados.

Porosidade

Conforme Paulon e Kirchheim (2011) a pasta de cimento hidratado é uma reunião relativamente heterogênea de partículas, filmes, microcristais e elementos sólidos, ligados entre si por uma massa porosa contendo, em seu estado nativo, espaços com soluções e alguns vazios como poros. Os autores abordam que os poros existentes no concreto convencional são considerados como parte integrante da matriz (pasta de cimento) e podem ser encontrados em diversos tamanhos, abrangendo uma escala abaixo de 2,5 μm e acima de 10.000 μm . Apresentam que o sistema de distribuição dos poros no concreto é fortemente influenciado por fatores como dosagem do concreto, principalmente pela relação água/cimento, cura, quantidade e tipo de adições e aditivos químicos. Os poros capilares tendem a ser preenchidos com os produtos de hidratação, dando origem a poros ainda menores entre as partículas dos produtos da hidratação e alguns prolongamentos de poros gel dentro deles.

Conforme Paulon e Kirchheim, (2011) a resistência às ações mecânicas de um material qualquer é diretamente proporcional a sua porosidade. Por conseqüência, a zona de transição, sendo mais porosa, torna-se mais fraca que a matriz de cimento hidratado. Conforme os autores o início e a propagação da fissuração é mais fácil em cristais de tamanho grande do que em sistemas de cristais de pequena dimensão e emaranhados apertados.

Conforme Neville (1997) a permeabilidade do concreto não é uma função simples da porosidade, mas depende também, das dimensões, distribuição e continuidade dos poros. Assim, embora a porosidade do gel de cimento seja de

28%, a sua permeabilidade é de apenas cerca de 7×10^{-16} m/s. O autor aborda que isto é devido à textura extremamente fina da pasta de cimento endurecida: os poros e as partículas sólidas são muito pequenos e numerosos, ao passo que nos minerais os poros, embora em pequena quantidade, são muito maiores e resultam em permeabilidade elevada. O autor apresenta que a permeabilidade da pasta de cimento é controlada pela sua porosidade capilar. A tabela 3.4 apresenta um comparativo entre a permeabilidade apresentada pelas rochas em relação ao fator água/cimento de pastas. O autor aborda que o granito tem permeabilidade comparável à de uma pasta com relação água/cimento igual a 0,70, isto é de uma qualidade não muito boa.

Tabela 3.4 – Comparação entre permeabilidade de rochas e pastas de cimento

Mineral	coeficiente de permeabilidade (m/s)	Relação água/cimento de pastas maduras com igual permeabilidade
Basalto denso	$2,47 \times 10^{-14}$	0,38
Quartzo diorito	$8,24 \times 10^{-14}$	0,42
Mármore	$2,39 \times 10^{-13}$	0,48
Mármore	$5,77 \times 10^{-12}$	0,66
Granito	$5,35 \times 10^{-11}$	0,70
Arenito	$1,23 \times 10^{-10}$	0,71
Granito	$1,56 \times 10^{-10}$	0,71

Fonte Neville 1997

Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade estático de um material sob tensão ou compressão é dado pela declividade da curva tensão-deformação para concreto e argamassas sob carga uniaxial, não sendo linear o que permite dividir este módulo em três tipos (MEHTA; MONTEIRO, 2008):

- módulo tangente refere a declividade de uma linha traçada de forma tangente à curva de tensão-deformação em qualquer parte desta curva;
- módulo secante refere a declividade de uma linha traçada da origem até um ponto da curva, que corresponde à tensão de 40% da carga de ruptura;
- módulo cordal refere a inclinação de uma linha traçada entre dois pontos da curva tensão-deformação, sendo o primeiro correspondente a 50 μ m e o segundo a 40% da carga de ruptura.

O módulo de elasticidade dinâmico correspondente a uma deformação instantânea muito pequena e é dado por aproximação pelo módulo tangente inicial. Geralmente é de 20% a 40% mais alto que o módulo de elasticidade estático (METHA; MONTEIRO, 2008). Andrade (2010) aborda que o valor do módulo de elasticidade dá a medida da rigidez do material, quanto maior o valor do módulo, menos deformável é o material.

Outras vezes o módulo é determinado de forma indireta através de fórmulas empíricas que relacionam a resistência à compressão e a massa específica. O módulo de Young (E) também é avaliado pela frequência natural de vibração do material. O princípio fundamental do método se baseia na teoria de propagação da velocidade do som (vibração mecânica) em meios sólidos. Existe uma correlação entre a velocidade de propagação do som (v) em uma amostra de determinado tamanho e forma, sua massa específica (ρ) e suas características elásticas.

Sun *et al.* (2002) estudaram o efeito da areia no módulo de elasticidade do concreto e observaram que o módulo de elasticidade é influenciado principalmente pelas propriedades da matriz, agregado, fino e agregado graúdo.

Resistência Mecânica

A resistência de um material é definida como a capacidade para resistir à tensão sem se romper. De acordo com Mehta e Monteiro (2008) em materiais multifásicos como o concreto, a porosidade de cada componente da microestrutura pode se tornar um fator limitante para a resistência. Os autores consideram que embora a relação água/cimento seja importante na determinação tanto da porosidade da matriz, quanto da zona de transição na interface e, portanto, na resistência do concreto, fatores como adensamento e condições de cura (grau de hidratação do cimento), mineralogia e dimensão do agregado, tipos de aditivos, adições, condições de umidade e geometria do corpo de prova, tipo de tensão e velocidade de carregamento podem também, ter efeito importante na resistência.

Conforme Isaia (2013) a essência da resistência mecânica do concreto encontra-se na qualidade e na quantidade de teor de sólidos representados pelos compostos hidratados da pasta cimentícia. Produtos de hidratação, especialmente os silicatos hidratados, possuem área específica muito pequena e se entrelaçam com os aluminados, ferro-aluminatos hidratados e outros compostos, formando um conjunto resistente e fortemente aderido entre si. Os autores abordam que no âmbito intramolecular predominam as forças das ligações químicas fortes, enquanto que nos espaços intermoleculares atuam as forças de Van der Waals (ligações secundária) que, geralmente são também altas devido às pequenas distâncias que separam as partículas hidratadas, embora de menor intensidade que as ligações químicas.

Conforme Andrade e Tutikian, (2011) a zona de transição, ou interface agregado-pasta caracteriza-se por apresentar uma grande quantidade de vazios, que pode ter comportamentos diferenciados quando o concreto é submetido a diferentes esforços.

Isaia *et al.* (2010) realizaram estudo sobre a viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural nas propriedades mecânicas e na microestrutura, a pesquisa envolveu o uso da casca em estado natural e moída quando foi verificado que a moagem prévia contribuiu no aumento da resistência à compressão axial pelo favorecimento da nucleação dos compostos hidratados.

Resistividade elétrica

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade que caracteriza a sua capacidade em resistir à passagem da corrente elétrica. Conforme Andrade (2010) o conhecimento da resistividade do concreto está relacionado com o problema da corrosão das armaduras. A resistividade é representada pela equação 3.1.

$$P = R \frac{A}{L} = \frac{V \cdot A}{L \cdot I} \quad (3.1)$$

Onde: ρ = resistividade elétrica (Ωm)

R= resistência elétrica do material através do qual a corrente esta passando (Ω -Ohm)

I = corrente (Amperes)

V = diferença de potencial (Volt)

L= distância entre dois pontos onde é medida a voltagem (m)

A= área da seção reta perpendicular à direção da corrente (m^2)

Conforme Santos (2006) a resistividade esta fundamentalmente relacionada à permeabilidade de fluidos e à difusividade de íons através dos poros do material. A autora aborda que o princípio de medida da resistividade baseia-se na aplicação de uma diferença de potencial entre os eletrodos posicionados em duas faces opostas e planas do material e a posterior medida da corrente resultante.

Carbonatação Acelerada

Conforme Neville e Brooks (2013) carbonatação corresponde a reação do CO_2 com o cimento hidratado. O gás CO_2 está presente na atmosfera, em concentração em torno de 0.03%, em volume, em ambiente rural; em laboratório não ventilado em 0,1%, e em cidades grandes em 0,3%. Na presença de umidade o CO_2 forma ácido carbônico, que reage com o $Ca(OH)_2$, formando $CaCO_3$.

De acordo com Taylor (1997, *apud* CASCUDO e CARASEK, 2011) o processo de carbonatação, tem como uma de suas etapas, a dissolução do dióxido de carbono (CO_2) na solução do poro da pasta de cimento, conforme a equação 3.2.



Paralelamente, íons de OH^- e Ca^{2+} vão sendo obtidos na solução do poro, oriundos principalmente da dissolução do hidróxido de cálcio, conforme a equação 3.3. Entretanto, eles podem ser decorrentes da decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e das fases aluminato.



E posteriormente, completando-se o processo, o CO_3^{2-} reage com o Ca^{2+} , formando o carbonato de cálcio, conforme equação 3.4.



Tal mecanismo refere-se à carbonatação do hidróxido de cálcio, todavia, há possibilidade de também ocorrer a carbonatação do C-S-H e das fases do aluminato.

Conforme Neville e Brooks (2013) a natureza do concreto, fortemente alcalina Ca(OH)_2 com pH em torno de 13, previne a corrosão da armadura pela formação de uma fina camada protetora na superfície do metal. Essa proteção é conhecida como passivação. Entretanto, caso o concreto seja permeável de modo que a carbonatação atinja o concreto em contato com o aço, ou que soluções com cloretos possam penetrar na armadura e existindo água e oxigênio será iniciado o processo de corrosão da armadura. Os autores abordam que a corrosão do aço ocorre devido à ação eletroquímica que normalmente, é encontrada quando dois metais diferentes estão em contato elétrico, na presença de umidade e oxigênio. Esclarecem que, entretanto, o mesmo processo ocorre no aço isolado, em função das diferenças entre o potencial eletroquímico na superfície, que formam regiões anódicas e catódicas conectadas pelo eletrólito na forma de solução salina no cimento hidratado. Os íons cloretos presentes na pasta de cimento que envolve a armadura reagem em regiões anódicas formando ácido clorídrico que destrói a camada de passivação no aço.

Conforme Richardson (1988, *apud* BARROSO, 2013) durante a hidratação do cimento Portland, há liberação de Ca(OH)_2 , que na fase aquosa, aliado a outros álcalis do clínquer, atribuem ao meio um pH alcalino, acima de 12, o que garante a passivação do metal e cria uma barreira natural contra a corrosão das armaduras. Conforme Barroso (2013) a proteção da armadura pela passivação poderá ser diminuída com o tempo, através da redução da alcalinidade do

concreto, o que altera as condições de estabilidade química da película passivante da armadura, favorecendo o início de um processo de corrosão generalizada. Este fenômeno pode ocorrer devido a uma lixiviação por circulação de águas puras ou ligeiramente ácidas; ou devido a reação do dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera e outros gases ácidos (SO₂ e H₂S), com os compostos alcalinos da hidratação do cimento (Ca(OH)₂, NaOH, KOH), resultando principalmente, na precipitação do carbonato de cálcio, como mostra a equação reduzida 3.5.



De acordo com Helene (1993, *apud* BARROSO, 2013), como a solubilidade do hidróxido de cálcio depende da concentração dos íons OH na solução dos poros, a reação se inicia através dos álcalis NaOH e KOH, que são mais solúveis. Assim, com a redução da concentração de íons OH, o Ca (OH)₂ solubiliza-se e passa a ser carbonatado, segundo a reação simplificada como foi mostrado na reação anterior (VIEIRA, 2003; *apud* BARROSO, 2013).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da influência da heterogeneidade dos resíduos, oriundos do beneficiamento a úmido das marmorarias, no desempenho de compostos de cimento Portland, ocorreu em três etapas distintas: caracterização dos resíduos, das pastas e dos compostos cimentícios (argamassas para fins estruturais). Os compostos e as pastas foram produzidos com substituição em 20% em massa do cimento por resíduos, que foram coletados em três marmorarias distintas de Belo Horizonte, localizadas em regionais diferenciadas, em duas épocas do ano.

4.1 Materiais

Foram utilizados resíduos de marmoraria, cimento Portland, agregado miúdo, e água. Para composição de uma amostragem mais representativa, optou-se pela utilização de resíduos provenientes de 3 empresas distintas de marmorarias, que se encontram localizadas em 3 regiões diferentes de Belo Horizonte. As coletas ocorreram em 2 épocas distintas do ano: setembro de 2014 e fevereiro de 2015.

Os resíduos coletados são oriundos das etapas do corte e do polimento de rochas ornamentais em marmorarias. Nesses processos se utiliza água em determinados equipamentos, o que proporciona a geração de uma lama densa com partículas em suspensão, que após secagem dá origem a um pó muito fino.

O cimento utilizado foi o Portland de alta resistência inicial CP V ARI – PLUS, fornecido empresa Holcim Brasil S.A. Este aglomerante foi escolhido por possuir menor teor de adições, o que minimiza as variáveis de controle do estudo. As principais características físicas e químicas do cimento atendem às especificações contidas na ABNT NBR 5733:1991, conforme Laudo Técnico do fabricante apresentado na Figura 4.1. De acordo com o fornecedor a massa específica do cimento é de $3,05 \text{ g/cm}^3$.


ENSAIOS		PERÍODO	17.01.2015 03.02.2015	05.02.2015 21.02.2015	24.02.2015	LIMITES NBR5733
ENSAIOS FÍSICOS						
	Média	2,2	2,4	2,3		
# 400 (%)	Dev. Pad.	0,53	0,31	0,34		
IT Holcim	Nº Amostras	8	8	4		
	Média					
# 325 (%)	Dev. Pad.					
NBR 9202	Nº Amostras					
	Média	4782	4801	4730		
Blaine (cm²/g)	Dev. Pad.	115	62	35		≥ 3000
NBR NM 76	Nº Amostras	8	8	4		
	Média	131	128	135		≥ 60
Início Pega (min)	Dev. Pad.	6	5	7		≥ 60
NBR NM 65	Nº Amostras	8	8	4		
	Média	185	181	190		≤ 600
Fim Pega (min)	Dev. Pad.	6	7	11		≤ 600
NBR NM 65	Nº Amostras	8	8	4		
	Média					≤ 5
Exp. Quente (mm)	Dev. Pad.					≤ 5
NBR 11582	Nº Amostras					
	Média	29,5	31,2			≥ 14,0
R 1 dia (MPa)	Dev. Pad.	0,59	0,89			≥ 14,0
NBR 7215	Nº Amostras	8	8			
	Média	41,5	42,5			≥ 24,0
R 3 dias (MPa)	Dev. Pad.	0,75	0,69			≥ 24,0
NBR 7215	Nº Amostras	8	8			
	Média	46,2	46,9			≥ 34,0
R 7 dias (MPa)	Dev. Pad.	0,65	0,36			≥ 34,0
NBR 7215	Nº Amostras	8	8			
	Média	55,0				
R 28 dias (MPa)	Dev. Pad.	0,74				
NBR 7215	Nº Amostras	8				
ANÁLISE QUÍMICA (%)						
PF 1000°C	NBR NM 18	3,61	3,45			≤ 4,5
SiO₂	NBR 14656	19,48	19,39			
R.I.	NBR NM 15	0,85	0,81			≤ 1,0
Al₂O₃	NBR 14656	4,99	5,04			
Fe₂O₃	NBR 14656	2,86	2,92			
CaO	NBR 14656	63,16	63,49			
MgO	NBR 14656	0,77	0,75			
SO₃	NBR 14656	2,94	3,07			≤ 4,5
CO₂	NBR NM 20	2,70	2,56			≤ 3,0
K₂O	NBR 14656	0,79	0,80			
PF 500°C	IT Holcim	0,68	0,71			
C₃A (Teórico)	Equação Bogue	7,94	8,10			
OBSERVAÇÕES:						
1. IT = Intrução de Trabalho						
2. Resíduo na peneira #200: ≤ 6,0% (NBR 11579)						
						
						Eng. Fabrício Carlos França Supervisor Técnico MG/ES
APL0_CP_V_ARI_PLUS_VENDAS.xls		5 março, 2015				

Figura 4.1 – Laudo Técnico do cimento CP V ARI fornecido pelo fabricante Holcim.

A água utilizada foi a água potável disponibilizada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA, na região metropolitana de Belo Horizonte.

4.2 Métodos

O programa experimental iniciou-se com a coleta e preparo dos resíduos para sua caracterização. Em seguida foram confeccionadas pastas e compostos cimentícios com e sem adição de resíduos. Posteriormente, realizou-se ensaios destrutivos e não destrutivos para avaliar as propriedades dos compostos no estado fresco e endurecido. Os ensaios foram realizados em Laboratórios da UFMG: Laboratório de Concreto, Laboratório de Análise Especial, Laboratório de Geotecnia, Laboratório da Engenharia de Minas e em Laboratórios da Engenharia Química. Também foram realizadas análises no Laboratório Tecnológico da Supermix-BH. A figura 4.1 apresenta o fluxograma do programa experimental.

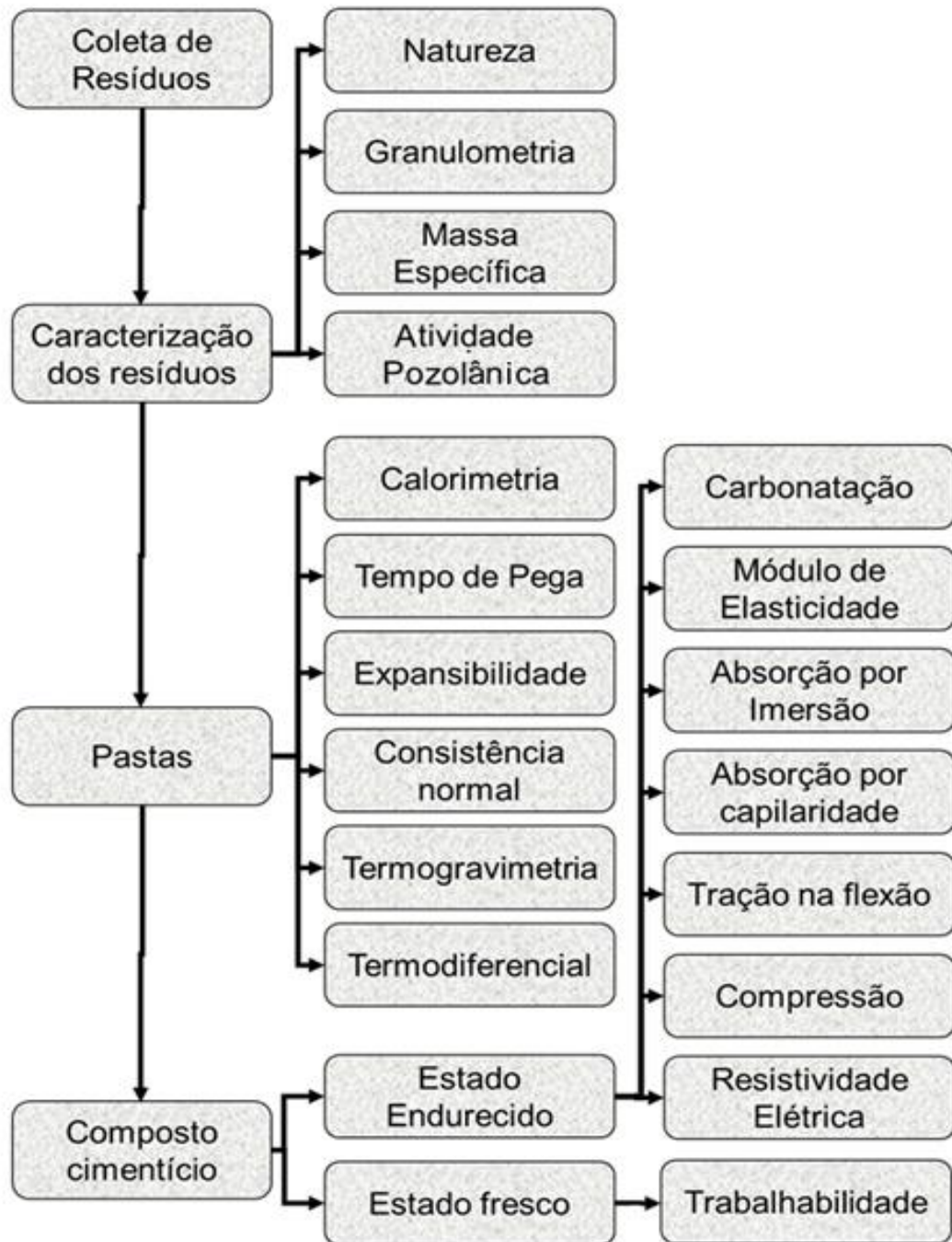


Figura 4.3 – Fluxograma do Programa Experimental.

4.2.1 Coleta e preparo do resíduo

Os resíduos coletados foram originados no processo de beneficiamento à úmido das rochas ornamentais, realizados por empresas de marmorarias, localizadas em Belo Horizonte. Estes resíduos possuem o aspecto de lama e contém os

diversos materiais processados nas empresas. Foram coletados em 3 empresas, que se localizam em 3 regiões distintas da cidade. A busca por uma maior diversidade de empresas localizadas em regiões distintas ao longo da cidade visou obter amostras mais representativas dos resíduos gerados. A Figura 4.4 apresenta a localização das empresas. As coletas ocorreram em 2 épocas distintas do ano, setembro de 2014 e fevereiro de 2015, o que proporcionou uma maior variabilidade dos resíduos. Para cada empresa foi aplicado um questionário com ficha específica, de forma a se identificar os tipos de rochas e materiais beneficiados dos quais se originaram os resíduos.



Figura 4.4 - Localização das empresas.
Fonte: Imagem Google polígono IBGE .

A coleta e o acondicionamento dos resíduos foram realizados com uso de vasilhames, armazenados em local adequado para evitar a contaminação dos mesmos. Cada amostra foi identificada e catalogada segundo sua ficha específica de coleta. Posteriormente foram transferidos para bandejas, previamente descontaminadas, conforme Figura 4.5, submetidos à secagem em estufa na temperatura de $(105^{\circ} \pm 5^{\circ})\text{C}$ por um período requerido para a desidratação completa. O tempo necessário para a secagem completa de cada amostra variou, conforme quantidade de água presente em cada amostra (verificada pela constância de massas). Após a secagem, cada amostra, foi destorroada manualmente, de forma a se obter uma mistura mais completa, homogênea e representativa. Em seguida foram colocadas em sacos plásticos e armazenadas.



Figura 4.5 – Resíduos antes e após secagem em estufa.

4.2.2 Caracterização dos resíduos

Os resíduos foram caracterizados de forma a identificar a natureza dos constituintes, granulometria, massa específica, e quanto à atividade pozolânica. Considerando que os resíduos foram coletados em 2 épocas diferentes do ano e em 3 empresas distintas, as análises ocorreram em 6 amostras com resíduos e um traço referência sem resíduos.

Quanto à natureza

Em função da complexidade na composição química devido à presença de diversas rochas e materiais cerâmicos, a natureza dos resíduos foi avaliada quanto a tipologia do material presente. A abordagem ocorreu por meio de questionário, composto de fichas específicas, preenchidas no momento da coleta. As fichas permitiram estimar qualitativamente a heterogeneidade dos resíduos.

Granulometria

A granulometria dos resíduos foi determinada pela técnica de sedimentação, conforme Instrução de Trabalho do Departamento de Engenharia de Transporte e Geotecnia da UFMG, segundo a ABNT NBR 7181:1988. A técnica fundamenta-se na Lei de Stokes, que infere a ação da gravidade em uma partícula em um meio fluido. O ensaio permitiu obter o tamanho dos grãos e suas respectivas porcentagens de ocorrência, conforme planilhas de cálculo adotadas no Departamento.

Após a secagem em estufa, os resíduos foram inicialmente destorroados, conforme Figura 4.6, e peneirados na malha de 0,074 mm. O ensaio de sedimentação com esse material, iniciou com o preparo das amostras, submetidas a imersão em água destilada com defloculante, por um período mínimo de 12 horas. Posteriormente fez-se a dispersão com uso de aparelho dispersor por 15 min, para promover a suspensão de todas as partículas. As amostras foram transferidas para uma proveta, onde foram realizadas as leituras por meio de um densímetro. Os resultados das percentagem sedimentadas foram obtidas por meio da equação 4.1, e dos diâmetros por meio da equação 4.2.

$$P_{sed} = \frac{(\rho_s \times L_c)}{(\rho_s - \rho_{disp}) \times M_{sed}} \times N \quad (4.1)$$

$$d = \sqrt{\frac{1800 \times \mu \times Z}{(\rho_s - \rho_{disp}) \times t}} \quad (4.2)$$

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

$L_c = L_l + R$ = leitura corrigida

L_l = leitura do densímetro

R = valor de correção

N = % que passa peneira # 2,00 mm

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

d = diâmetro máximo das partículas, em mm

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

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 4.6 – Destorroamento do resíduo.

Massa Específica

Para determinação da massa específica foi utilizada a técnica do picnômetro, conforme Instrução de Trabalho do Departamento de Engenharia de Transporte e Geotecnia da UFMG. A técnica envolve aplicar vácuo no picnômetro por meio de bombas, promovendo a retirada do ar presente nas amostras dos resíduos, conforme apresentado na figura 4.7. Inicialmente a amostra deve ficar imersa em água destilada por um período de 12 horas, posteriormente, levado ao dispersor para dispersar as partículas. O material foi transferido para o picnômetro e aquecido, após o resfriamento aplicou-se o vácuo para retirada do ar. A etapa final foi a secagem em estufa para se obter a massa seca do material das amostras. A massa específica foi calculada conforme equação 4.3.

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_1 - M_2 + M_s} \times \rho_w \quad (4.3)$$

Onde: ρ_s = massa específica dos sólidos ou dos grãos

M_1 = massa do picnômetro mais água à temperatura de ensaio

M_2 = massa do picnômetro + água + sólidos, à temperatura de ensaio

ρ_w = massa específica da água à temperatura de ensaio

M_s = massa de sólidos, obtida por secagem no final do ensaio



Figura 4.7 – Técnica do picnômetro por meio de bomba a vácuo.

Atividade pozolânica

A atividade pozolânica foi avaliada pelo método Chappelle Modificado, com base na normalização brasileira ABNT NBR 15895:2010. A figura 4.8 apresenta a etapa do banho-maria de umas amostras com resíduos. A técnica do ensaio avalia a capacidade do material em fixar o hidróxido de cálcio, na presença de uma solução aquosa com óxido de cálcio. Consiste em manter amostras com 2g de CaO, 1g de material pozolanico (resíduos) e 250g de água isenta de CO₂ aquecidas em banho-maria a (90±5)°C em agitação mecânica por (16±1) h. É mantido outro recipiente contendo 2g de CaO puro em 250 ml de água isenta de CO₂ considerado como ensaio em branco. Após este período os recipientes são resfriados até a temperatura ambiente. Posteriormente adiciona-se às misturas uma solução de sacarose. O teor de CaO livre é medido pela titulação de solução com HCl 0,1 mol/L e fenolftaleína (1g/l). A pozolanicidade do material será maior, quanto mais elevado for o índice de atividade pozolânica, dado pelo teor de óxido de cálcio fixado. A técnica seguiu procedimentos estabelecidos na normativa e conforme calculo da equação 4.4.

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

Onde:

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

V_2 - volume de HCl 0,1 mol/l, consumido no ensaio com amostra do material pozolanico em (ml)

V_3 - volume de HCl 0,1 mol/l consumido no ensaio em branco em (ml)

Fc - fator de correção do HCl

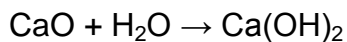
m_2 - massa do material pozolânico (g)

1,32 - relação molecular Ca(OH)₂/CaO

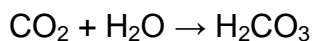
Considera-se que houve carbonatação no processo do ensaio quando no ensaio em branco ocorre entrada do CO₂. A amostra do ensaio em branco deve conter apenas a presença de CaO diluído em água isenta de CO₂.

Pode se considerar as seguintes etapas que promovem uma possível carbonatação:

➤ - Etapa 1



➤ - Etapa 2



➤ - Etapa 3



Figura 4.8 – Ensaio Chapelle etapa do banho-maria com amostra de resíduos e amostra em branco.

4.2.3 Confeccção e caracterização das pastas

As amostras das pastas foram confeccionadas com cimento CP V ARI – Plus água e com e sem substituição em massa de 20% de cimento por resíduo coletado. As pastas foram caracterizadas quanto a água de consistência normal, ao tempo de pega, expansibilidade e análises térmicas: calorimetria (DSC), termogravimétrica (TGA) e termodiferencial (DTA).

Consistência normal

Conforme Molin (2011) o consumo de água no concreto com adições minerais vai depender da forma, superfície específica de suas partículas e da quantidade utilizada como adição. De acordo com Metha e Monteiro (2008) quando se tem a pega a pasta adquire um volume estável que é aproximadamente igual ao volume de cimento mais água. Como a relação água/cimento é geralmente dada em massa, é necessário conhecer a massa específica do cimento para poder calcular o volume de água e o espaço total disponível, que representa a soma dos volumes de água e cimento.

Neste trabalho primeiramente se definiu o teor de água requerida através do ensaio de consistência normal para o traço referência e para os demais traços com resíduos. A identificação inicial quanto ao consumo da água, possibilitou identificar se a água exigida pelo traço com resíduos estava acima ou não do traço referência sem resíduos. Caso o consumo de água fosse maior seria indicativo de que os resíduos absorveriam mais água, o que poderia comprometer os resultados, pela escassez da água necessária para as reações de hidratação do cimento. Esta avaliação inicial foi definidora para estabelecer se o traço seria adotado em volume ou em massa, considerando as densidades do cimento de $3,05 \text{ g/cm}^3$ e que a dos resíduos variou entre $2,67 \text{ g/cm}^3$ a $2,79 \text{ g/cm}^3$.

A consistência foi determinada com uso do aparelho de Vicat, que mediu a profundidade de penetração de uma sonda de 10 mm de diâmetro (sonda Tetmajer) sob ação do peso próprio. A pasta de consistência normal foi estabelecida quando a sonda se situava a uma distância de (6 ± 1) mm da placa base após 30 s do instante em que foi solta, conforme procedimentos estabelecidos na normativa da ABNT NBR NM 43:2003.

Tempo de pega

De acordo com Neville e Brooks (2013) na determinação dos tempos do início e fim de pega e no ensaio de expansibilidade de Le Chatelier deverá ser utilizada

uma pasta de cimento pura com consistência padrão, com fator determinante a quantidade de água que produzirá essa pasta. As amostras das pastas para estes ensaios foram preparadas, conforme cada resíduo coletado, na proporção de 80% de cimento e 20% do resíduo.

O tempo de pega refere ao enrijecimento da pasta de cimento, com a mudança do estado fluido para o rígido. Conforme Neville e Brooks (2013) a pega é causada principalmente pela hidratação do C_3A e C_3S e é acompanhada pela elevação da temperatura na pasta de cimento. O início de pega corresponde a uma rápida elevação e o fim de pega corresponde ao pico da temperatura.

O tempo de pega foi determinado com uso do aparelho de Vicat utilizando pastas de cimento/resíduos de consistência normal para cada amostra, com base na ABNT NBR NM 65:2003.

Expansibilidade

Conforme Neville e Brooks (2013) é essencial que a pasta de cimento, após a pega, não sofra uma grande alteração de volume, pois pode ocasionar desagregação da pasta endurecida. Essas expansões podem ser causadas devido às reações de cal livre, magnésio e sulfato de cálcio, e os cimentos. Segundo os autores a cal livre esta presente no clínquer, intercrystalizada com outros compostos e, em função disso, hidrata-se muito lentamente, ocupando um volume maior que óxido de cálcio livre e original.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Especiais da UFMG, por meio do uso das agulhas de Le Chatelier, para cada tipo de pasta com resíduo, com base na normalização brasileira ABNT NBR 11582:1991. Os moldes das agulhas foram preenchidos com a pasta com água de consistência normal e cobertos com duas placas de vidro, comprimidos por um pequeno peso e mantidos em um recipiente contendo água a $(20^\circ \pm 1^\circ)C$ durante 24 horas, conforme figura 4.9. Decorrido este prazo, as agulhas foram inseridas em outro vasilhame, no qual permitiu elevar a temperatura da água a $100^\circ C$, após esse tempo mediu-se o

afastamento entre as duas agulhas, mantendo-se depois esta temperatura por mais três horas, onde foi realizada a medição e novamente após duas horas. A diferença registrada entre a primeira e a última medição representa a expansibilidade da pasta de cimento, que não deve exceder, de acordo com a norma, o valor de 10 mm.

Segundo Neville e Brooks (2013) o ensaio de Le Chatelier, descrito pela BS EN 196-3:1995, somente possibilita verificar a expansibilidade devido a cal livre. Conforme os autores a ASTM C 151-05 especifica o ensaio em autoclave sensível à determinação tanto do magnésio quanto da cal livre. Apresentam que nenhum ensaio é válido para determinar a instabilidade devido ao excesso de sulfato de cálcio, mas seu teor pode ser determinado por análise química.

O aquecimento pode causar expansão, que sob restrição, promovem tensões de compressão. O efeito térmico, tensão aplicada e a umidade no concreto podem pela interação serem componentes indutores de fissuração (METHA, MONTEIRO, 2008).



Figura 4.9 – Ensaio expansibilidade com a pasta de resíduo dentro da agulha Le Chatelier coberta com placas de vidro e submersa em água.

Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A hidratação dos compostos de cimentos envolve reações exotérmicas que geram calor e aumentam a temperatura do concreto massa. Segundo Molin (2011) a técnica da calorimetria exploratória diferencial (DSC) fornece informações quantitativas sobre as mudanças que ocorrem na amostra analisada com o aumento ou decréscimo da temperatura. A técnica mede a diferença de energia fornecida à amostra e a um material de referência, em função da temperatura, enquanto a amostra e o material são submetidos a uma programação controlada de temperatura. Ou seja, mede a quantidade de calor envolvida nas transformações endotérmicas ou exotérmicas que a amostra sofre durante as alterações de temperatura.

O ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC) permite conhecer o calor de hidratação das amostras e avaliar a evolução da temperatura ao longo do tempo, nas pastas confeccionadas com e sem resíduos. O ensaio, que não é normatizado, consistiu em acompanhar a evolução contínua das reações que ocorrem na pasta de cimento, em um sistema fechado, isotérmico, por meio de aquecedores individuais que medem a diferença de potencial de entrada dos aquecedores. O calor advindo da hidratação do cimento, por meio das reações, é registrado durante o processo. A DSC possibilitou conhecer os dados quantitativos da temperatura envolvida nas reações químicas ou físicas das amostras e dessa forma inferir sobre o calor da reação.

Os ensaios foram realizados por meio do equipamento semi-adiabático Calmetrix Inc. F-Cal 4000/8000 Field Calorimeter for Concrete and Cement - Grace Adiacal Calorimeter for Cement. Cada amostra de pasta foi preparada dentro de um molde padrão, adotado no laboratório. As pastas foram produzidas com substituição em 20% do cimento por resíduo. O molde, com capacidade de 200 g de material, foi preenchido com 160 g de cimento 40 g de resíduo e 80 g de água. Nessa técnica as amostras com e sem resíduos foram introduzidas no equipamento composto por uma caixa lacrada e canais que permitiram o registro

da temperatura das amostras, que foram mantidas a mesma temperatura, conforme figura 4.10.



Figura 4.10 – Equipamento utilizado no ensaio de calorimetria.

Termogravimetria (TGA)- Termodiferencial (DTA)

A termogravimetria (TGA) é utilizada para determinar as mudanças na massa de uma amostra, em função da temperatura ou do tempo, quando aquecida lentamente em um forno, com atmosfera controlada. As mudanças podem resultar de transformações químicas ou físicas (MOLIN, 2010; CINCOTTO, 2011).

O registro da técnica termodiferencial (DTA) resulta em uma curva que conforme Haspark (2005 *apud* MOLIN, 2010) a análise permite avaliar mudanças endotérmicas e/ou exotérmicas, que ocorrem com a temperatura em um material, proporcionando informações importantes, como a temperatura de fusão e cristalização, reações de decomposição, mudança de fase, oxidação, entre outras.

Conforme Metha e Monteiro (1998) o efeito da temperatura na pasta de cimento depende do grau de hidratação e do estado de umidade. Uma pasta de cimento bem hidratada consiste principalmente de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), hidróxido de cálcio e sulfoaluminatos de cálcio hidratados. Uma pasta saturada

contém grandes quantidades de água livre e água capilar, além de água adsorvida. Os diversos tipos de água são perdidos rapidamente com o aumento da temperatura no concreto. Os autores abordam que na temperatura em 300°C a água interlamelar do C-S-H, parte da água quimicamente combinada do C-S-H e dos sulfoaluminatos hidratados também se perderão. Uma posterior desidratação da pasta de cimento devida à decomposição do hidróxido de cálcio começa a cerca de 500°C e temperaturas da ordem de 900°C são necessárias para a decomposição completa do C-S-H.

Conforme Ionashiro (2005) a análise comparativa do percentual de perda de massa na temperatura de decomposição da portlandita possibilita avaliar a ocorrência ou não da reação pozolânica. A análise quantitativa da extensão da reação pozolânica pode ser feita derivando-se as curvas obtidas na análise termogravimétrica e identificando-se as zonas de desidratação da portlandita de amostras com e sem adição de pozolanas.

Para os ensaios foram preparadas 10 g de pasta, com substituição em 20% do cimento por resíduos, colocadas em cápsulas para encaminhar para análise, conforme Figura 4.11. Fixou o consumo de água conforme consistência normal. As amostras ficaram em cura por 28 dias, vedadas em sacos plásticos, para evitar a perda da água no processo de cura. Posteriormente foram trituradas e submetidas a acetona, para estabilizar possíveis reações até a data de se realizar o ensaio.



Figura 4.11 – Cápsulas com e sem resíduos preparados para ensaio de termogravimetria.

4.2.4 Confeção e análise do desempenho dos compostos cimentícios

O desempenho dos compostos cimentícios foi avaliado no estado fresco e no estado endurecido. No estado fresco analisou-se a trabalhabilidade e no estado endurecido as propriedades mecânicas e indicadores durabilidade, através de ensaios de compressão, tração na flexão, módulo de elasticidade, absorção de água por capilaridade e por imersão, porosidade superficial e resistividade elétrica e carbonatação.

Estado Fresco – Trabalhabilidade

Neville e Brooks (2013) apresentam a trabalhabilidade como a quantidade de trabalho interno útil necessário à obtenção do adensamento total e que na prática é difícil de medir. Segundo os autores outro termo utilizado para descrever o estado fresco do concreto é a consistência, que se refere a resistência da forma de uma substância ou a facilidade com que ela flui. Neste trabalho o estado fresco foi avaliado pela trabalhabilidade por meio da técnica *Flow Table* com abatimento do tronco de cone, quando se determinou o índice de consistência. O procedimento foi realizado conforme ABNT NBR 13276:2005, com as amostras com e sem resíduos preparadas e inseridas no molde tronco cônico, conforme especificações da normativa. As medições foram realizadas com uso de paquímetro, conforme apresentado na figura 4.12.



Figura 4.12 – Medição índice de consistência com paquímetro.

Moldagem e cura dos Corpos de Prova

Conforme Isaia (2011) a cura do concreto com água é o meio mais efetivo para prevenir fissuração prematura e desenvolvimento adequado das reações de hidratação nas primeiras idades. A manutenção da superfície do concreto saturada de água previne a sua difusão do interior para o meio ambiente e, portanto, impede o aparecimento de retração plástica ou retarda a retração hidráulica, fornecendo à microestrutura da pasta tempo suficiente para resistir aos esforços de tração dela provenientes.

A necessidade de cura vem do fato de que a hidratação do cimento somente pode ocorrer em capilares preenchidos com água, sendo essa a razão de prevenção da perda de água pelos poros. Conforme Neville e Brooks (2013) a água perdida internamente pela autodessecação deve ser substituída pela água do exterior, ou seja, deve ocorrer o ingresso de água no concreto.

Segundo Isaia (2011) as reações de hidratação diminuem de velocidade com o tempo, porque se processam do exterior para o interior do grão de cimento. Assim as propriedades resultantes dependem do tempo, isto é, do grau de hidratação do cimento em dada idade, além de outros fatores como disponibilidade de água para a continuidade das reações, condições de cura, condições ambientais e outras. Para que a hidratação do cimento seja completa, deve haver quantidade de água suficiente para que as reações se processem integralmente. O autor aborda que o fator água/cimento (a/c) em 0,40 é considerado como valor chave de relação, para que a hidratação seja completa.

Na determinação da quantidade dos materiais a serem utilizados partiu-se inicialmente do traço 1:3 com a/c de 0,48, com padronização da relação aglomerante/agregado de 1/3, com substituição em 20% do cimento por resíduo. Assim, adotou-se a proporção de 0,8 de cimento; 0,2 de resíduo; 3 de areia e 0,48 para água, o que em traço significou 1:0,25:3,75:0,60, respectivamente para o cimento, o resíduo, a areia e a água. Foram moldados corpos de prova prismáticos com dimensões de (4x4x16) cm, cilíndricos com dimensões de (5x10)

cm e (10x20) cm. O molde foi preparado, revestido internamente com uma fina camada de óleo mineral. A cura foi realizada ao ar, nas primeiras 24 horas, após esse período os corpos de prova foram desmoldados e submetidos à cura em câmara úmida. Os corpos de prova foram ensaiados a 7,14 e 28 dias. As tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam proporcionamento, traço e tipologia dos corpos de prova.

Tabela 4.2 – Proporcionamento do material

	Cimento	Resíduo	Areia	Água
Proporção	0,8	0,2	3	0,48

Tabela 4.3 – Traço dos corpos de prova

	cimento	Resíduo	Areia	Água
Referência	1	0	3	0,48
Resíduo	1	0,25	3,75	0,6

Tabela 4.4 – Ensaios realizados e tipo de corpos de prova

Ensaio	Tipo de CP	Dimensão do CP (cm)	Idade	CPs/Idade
Resistência a Compressão Axial	Cilíndrico	5x10	7/14/28	4
Resistência a Compressão simples	prismático	4x4x16	07/28	3
Resistência a tração	prismático	4x4x16	07/28	3
Absorção por Capilaridade	Cilíndrico	5x10	28	4
Absorção por Imersão	Cilíndrico	5x10	28	4
Módulo de Elasticidade	Cilíndrico	10x20	28	4
Carbonatação	Cilíndrico	10x20	28	2
Resistividade Elétrica	Cilíndrico	10x20	28	3

Absorção de água por capilaridade e por imersão

A absorção de água por capilaridade, apresentado na figura 4.13 foi realizada conforme Norma ABNT NBR 9779:1995 e apresenta a quantidade de água absorvida pelo corpo de prova através da ascensão por capilaridade. Os resultados foram determinados conforme equação 4.5. O coeficiente de capilaridade foi calculado, segundo ABNT NBR 15259 (2005), conforme equação 4.6. As medições das massas foram realizadas em 10 min., 90 min., 3 h, 6 h, 24h, 48 h e 72 horas, após a exposição das amostras à lamina de água.

$$A_c = \frac{A - B}{S} \quad (4.5)$$

Onde: A_c = absorção de água por capilaridade, em g/cm^2

A = massa do corpo de prova que permanece na água em g

B = massa do corpo de prova seco, em g

S = área da seção transversal em cm^2

$$C = m_{90} - m_{10} \quad (4.6)$$

Onde: C = coeficiente de capilaridade em $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

m_{90} = massa dos corpos de prova a 90 minutos

m_{10} = massa dos corpos de prova a 10 minutos

O índice de absorção por imersão foi calculado pela variação percentual da massa antes e após a imersão. O ensaio consiste em colocar os corpos de prova na água inicialmente a um terço de altura por um período 4 horas, mantê-los a dois terço de altura por mais 4 horas e completamente submersos por 64 horas restantes. Posteriormente mediu-se a massa, após decorrer 24h, 48h, e 72h de imersão, realizado com o corpo de prova com a superfície seca. O valor da absorção foi calculado pela equação 4.7.

$$A_i = \frac{M_{sat} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100 \quad (4.7)$$

Onde: A_i - absorção de água por imersão (%)

M_{sat} - massa do corpo de prova superfície seca, ficou imerso na água (g)

M_{seca} - massa do corpo seco (g)

A porosidade foi calculada conforme equação 4.8

$$P = - \frac{M_{sss} - M_s}{M_{sss} - M_i} \times 100 \quad (4.8)$$

Onde: P - porosidade (%)

M_{SSS} - massa corpo de prova saturado superfície seca (g)

M_s - massa corpo de prova seco (g)

M_i - massa corpo de prova imerso em água (g)

Para os ensaios de absorção por capilaridade e imersão foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.



Figura 4.13 – Absorção de água por capilaridade.

Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade expressa a rigidez do concreto no estado endurecido, promovido pela hidratação do cimento presente e pelo travamento entre as partículas dos agregados devido à forma e às rugosidades dos grãos e pelo teor de material pulverulento (SILVA, 2006).

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado pelo método de frequência ressonante forçada no modo longitudinal, conforme Figura 4.14. Foi utilizado o equipamento de frequência ressonante forçada no modo longitudinal – Erudite MKII Ressonante Frequency Test System. A geometria do corpo de prova foi de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O módulo foi calculado considerando a

freqüência de ressonância, a massa e dimensões do corpo de prova, conforme Equação 4.9.

$$E_D = 4n^2 L^2 \rho \times 10^{-12} \quad (4.9)$$

Onde: L – comprimento do corpo de prova (mm)

n – freqüência do modo fundamental da vibração longitudinal (Hz)

ρ – densidade (Kg/m^3)

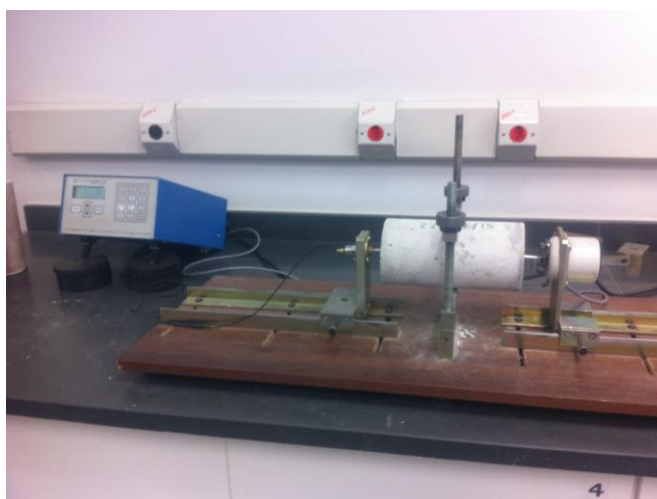


Figura 4.14 – Equipamento medição da frequência ressonante forçada.

Carbonatação acelerada

A carbonatação consiste em transformar íons alcalinos como os cátions de sódio, potássio e, sobretudo, de cálcio, em sais de carbonatos desses elementos, pela ação ácida do dióxido de carbono presente no ar (CARASEK, 2011). Conforme o autor com a carbonatação há uma precipitação principal de carbonato de cálcio (CaCO_3) na pasta de cimento endurecida do concreto, contudo outros compostos podem também precipitar-se como resultado do processo global, como o sulfato de cálcio e os géis de sílica e de alumina. Informa ainda que é de se esperar que, com a precipitação desses compostos, principalmente o CaCO_3 , haja uma alteração física da pasta de cimento ao nível de sua microestrutura.

Conforme Barroso (2013) a proteção da armadura pela passivação poderá ser diminuída com o tempo, pela redução da alcalinidade do concreto, o que altera as condições de estabilidade química da película passivante da armadura, favorecendo o início de um processo de corrosão generalizada. Este fenômeno pode ocorrer devido a uma lixiviação por circulação de águas puras ou ligeiramente ácidas; ou devido a reação do dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera e outros gases ácidos (SO_2 e H_2S), com os compostos alcalinos da hidratação do cimento ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , KOH), resultando principalmente, na precipitação do carbonato de cálcio, conforme Equação (4.10).



A carbonatação acelerada constitui em uma das técnicas para se avaliar a durabilidade do concreto, e existem vários procedimentos e técnicas utilizadas para o estudo da carbonatação. Quando se deseja indução acelerada do processo em laboratório, utilizam-se câmaras de carbonatação, para reproduzir um ambiente favorável à ocorrência das reações de carbonatação, neste trabalho foi adotado este procedimento. Após o período na câmara utiliza-se uma solução como indicador de pH à base de fenolftaleína. Conforme Carasek (2011) este indicador em contato com a solução alcalina do concreto, rica em hidróxido de cálcio, adquire coloração típica, a partir de uma faixa de pH da solução. Trata-se de um método colorimétrico. Como a carbonatação é um fenômeno que se dá de fora para dentro, mediante a difusão do CO_2 , a realização de uma cura efetiva passa a ser uma ferramenta importante para que se possa garantir a durabilidade da estrutura quanto à carbonatação (CARASEK, 2011).

Um dos fatores que afetam a carbonatação é relação água/cimento, devido ao transporte do CO_2 através dos poros existentes na pasta de cimento endurecida. O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reage mais rápido com o CO_2 e resulta no CaCO_3 , que se refere a carbonatação que interessa aos concretos confeccionados com cimento Portland (NEVILLE,1997). Conforme Carasek (2011) a relação a/c influencia a porosidade do cimento (quantidade, dimensões e conectividade dos poros) e, portanto a facilidade ou não para a penetração do CO_2 .

Para realizar o ensaio fez-se uso da câmara climatizada da marca Thermo Fisher Scientific, modelo RCO 3000 T-5 VBC. Foram utilizados 2 corpos de prova na condição seca com dimensões de (10x20) cm com resíduos e sem resíduos. As amostras permaneceram por 55 dias na câmara com 100% de umidade, temperatura de 25⁰C e 5% de CO₂. Após esse período as amostras foram seccionadas no sentido longitudinal e submetidas a aplicação de aspersão de solução de 70% de álcool absoluto, 29% de água destilada e 1% de fenoftaleína, posteriormente fez a leitura com uso de paquímetro em cada face do corpo de prova nas quatro bordas de cada face.

A verificação da carbonatação ocorre pela percepção na alteração da cor após aspersão de solução de fenoftaleína. Na região mais externa, onde há presença dos carbonatos, considerada região carbonatada, a amostra não muda de cor. A velocidade de propagação da frente de carbonatação depende da velocidade com a qual o CO₂ consegue penetrar no interior do concreto.

Resistividade elétrica

Metha e Monteiro (2008) apresentam que a resistividade é um parâmetro importante na avaliação da corrosão de estrutura de concreto armado pois a corrosão de armadura do concreto é geralmente decorrente da alcalinidade (carbonatação), da lixiviação dos álcalis ou presença dos íons cloretos em quantidade significativa.

No ensaio da resistividade elétrica foram realizadas leituras da corrente elétrica contínua, gerada para cada corpo de prova, por uma diferença de potencial aplicada, entre dois eletrodos colocados sobre a superfície dos corpos de prova. Foi utilizado o equipamento Gerador de Função Digital FG -8102 da Politem, conforme Figura 4.15. Para a realização do ensaio foram utilizados corpos de prova de (10X20) cm, com tempo de cura de 60 dias. A fim de se obter o mesmo grau de umidade em todas as amostras, submergiu-as em uma caixa com água por um período de mais de 24 horas. Este procedimento foi adotado com fins de

manter umidade dos corpos de prova, que é necessária, para realizar o ensaio. O teor da umidade do corpo de prova (seco ou úmido) influi na leitura de diferença de potencial. Com base na lei de Ohm obteve os resultados da resistividade das amostras conforme equação 4.11.

$$\rho = R \frac{A}{L} = \frac{V \cdot A}{L \cdot I} \quad (4.11)$$

Onde: ρ = resistividade elétrica (Ωm)

R = resistência elétrica (Ω -Ohm)

I = corrente (Amperes)

V = diferença de potencial (Volt)

L = Comprimento da amostra (m)

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



Figura 4.15 – Equipamento ensaio de resistividade elétrica.

Resistência a compressão

Conforme Metha e Monteiro (2008) os pequenos cristais de C-S-H, sulfoaluminatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados hexagonais possuem grandes áreas superficiais e adesividade. Esses produtos de hidratação do cimento tendem a aderir fortemente não apenas entre si, como

também aos sólidos de área superficial reduzida, como hidróxido de cálcio, grãos de clínquer anidro e partículas e agregado miúdo e graúdo.

Conforme Molin (2011) a resistência final do concreto com adições minerais e sua evolução com o tempo dependem, entre outros fatores da quantidade e características da adição mineral como tamanho das partículas e quantidades de SiO_2 em forma amorfa, do proporcionamento do concreto como tipo e consumo de cimento, relação água/cimento, presença de superplastificante, e das condições de cura.

Os corpos de prova cilíndricos de (5x10) cm foram ensaiados a 7,14 e 28 dias. O molde foi preparado, anteriormente a moldagem, com revestimento interno com uma fina camada de óleo mineral. Após a confecção dos compostos, foi realizada a moldagem manual dos corpos de prova. A cura foi realizada ao ar, nas primeiras 24 horas, após esse período os corpos de prova foram desmoldados e submetidos à cura em câmara úmida até as idades específicas de rompimento. Os corpos de prova foram moldados no Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG e posteriormente transferidos para a câmara úmida da empresa SUPERMIX, permanecendo ali até a data do rompimento. Na data do rompimento os corpos de provas foram preparados com capeamento das bordas. Utilizou a Prensa Pavitec modelo PCE-20D, capacidade de 20 TF, conforme Figura 4.16 Os procedimentos seguiram a normativa ABNT NBR 5738:2015, ABNT NBR 5739:2007 e ABNT NBR 13279:2005.



Figura 4.16 – Ensaio de compressão Prensa Pavitec.

Resistência à tração na flexão

Conforme Molin (2011) as adições minerais causam redução na porosidade da matriz e da zona de transição. Esse fato leva à melhora geral na resistência à compressão e resistência à tração na flexão do concreto, mas, aparentemente, a magnitude do aumento na resistência à tração se mantém relativamente pequena até que a resistência intrínseca dos produtos de hidratação da zona de transição seja majorada. Portanto a resistência à tração do concreto com uma zona de transição com menor porosidade continuará a ser fraca, enquanto um grande número de cristais orientados de hidróxido de cálcio estiver presente no local. Conforme o autor o aumento da resistência à compressão decorrente do efeito microfíler não corresponderá a um aumento proporcional na resistência à tração. Um aumento significativo na resistência à tração se dará somente quando ocorrerem as reações pozolânicas das adições minerais, com conseqüente redução do tamanho e concentração dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição.

Conforme Figura 4.17 o ensaio para avaliar a tração na flexão foi realizado por meio de corpos de prova prismáticos de dimensões em (4x4x16) cm em idades de 7 e 28 dias, conforme ABNT NBR 12142:2010.



Figura 4.17 - Equipamento ensaio de tração.

5 RESULTADOS

Os resultados estão apresentados em três blocos, conforme metodologia estabelecida no programa experimental. Foram avaliadas as características dos resíduos, das pastas e dos compostos cimentícios. Na quantificação de parâmetros, para os quais foram realizadas mais de uma amostra, optou-se por apresentar os resultados obtidos como média \pm erro padrão.

5.1 Caracterização dos Resíduos

Os resíduos foram caracterizados quanto a natureza, granulometria, massa específica e atividade pozolânica. No programa experimental adotou-se, conforme Quadro 5.1, a identificação das amostras com os resíduos, segundo localização da empresa e data em que se realizou a coleta.

Quadro 5.1 – Identificação das amostras com resíduos

Localização Empresa	Data da coleta	Identificação do resíduo
Av. Andradas	Setembro	F1 set.
	Fevereiro	F1 fev.
Av. Cristiano Machado	Setembro	F2 set.
	Fevereiro	F2 fev.
Av. Olinto Meireles	Setembro	F3 set.
	Fevereiro	F3 fev.

5.1.1 Quanto à natureza

O Quadro 5.2 mostra a distribuição da composição dos resíduos oriundos da lama do beneficiamento à úmido, conforme coleta e informações apresentadas por cada empresa pesquisada.

Quadro 5.2 – Composição dos resíduos quanto a natureza

Amostra	Natureza do resíduo
F1 set e F1 fev	Granito, Mármore, Ardósia, Quartzito, Cerâmica, Porcelanato, Ardósia e Pedra São Tomé.
F2 set e F2 fev	Granito e Mármore
F3 set e F3 fev	Granito, Mármore, Porcelanato, Silestone

Os dados acima mostram que os resíduos, oriundos da lama do beneficiamento, não variaram a tipologia, se mantiveram os mesmos em cada empresa nas duas datas de coleta. No entanto, observa-se uma diversidade de materiais: granito, mármore, ardósia, pedra São Tomé, quartzito, cerâmica, porcelanato e silestone, sendo que a heterogeneidade ocorre pela diversidade das empresas. Essa heterogeneidade dos resíduos, em função da origem, torna mais abrangente os resultados obtidos neste trabalho, que se propõe a avaliar a influência do uso da lama de marmoraria (independente da origem) no desempenho do compostos cimentícios com ela produzidos.

5.1.2 Granulometria

As Tabelas 5.1 a 5.3 apresentam resultados obtidos pelos ensaios de sedimentação, técnica adotada na avaliação da granulometria, onde d representa o diâmetro das partículas dos resíduos em milímetros (mm) e P_{sed} representa percentagem sedimentada.

Os resultados são apresentados graficamente conforme Figura 5.1, para as 2 datas de coletas realizadas em cada empresa. Observa-se uma similaridade nos valores, o que promove uma sobreposição das curvas da mesma empresa, à exceção dos resíduos da empresa F3.

Tabela 5.1 – Granulometria resíduos empresa F1

Data	d (mm)	P _{sed} (%)	Data	d (mm)	P _{sed} (%)
F 1 set	0,0616	93,72	F 1 fev	0,0616	92,53
	0,0442	88,11		0,0444	85,85
	0,0321	80,27		0,0321	79,18
	0,0234	69,06		0,0232	70,29
	0,0170	58,97		0,0168	61,39
	0,0127	48,88		0,0126	53,39
	0,0092	39,91		0,0092	44,27
	0,0066	33,18		0,0066	35,37
	0,0048	23,09		0,0048	28,26
	0,0034	17,93		0,0035	22,69
	0,0024	15,92		0,0025	18,47
	0,0014	9,19		0,0015	13,35

Tabela 5.2 – Granulometria resíduos empresa F 2

Amostra	d (mm)	P _{sed} (%)	Amostra	d (mm)	P _{sed} (%)
F 2 set	0,0620	95,60	F 2 fev	0,0640	96,74
	0,0443	91,06		0,0458	92,18
	0,0318	86,52		0,0331	85,33
	0,0230	78,57		0,0239	77,35
	0,0169	66,99		0,0177	65,49
	0,0126	59,04		0,0133	54,08
	0,0092	45,42		0,0097	41,53
	0,0067	34,75		0,0070	31,26
	0,0049	23,39		0,0051	22,14
	0,0035	18,17		0,0036	17,57
	0,0025	13,85		0,0026	13,23
	0,0015	9,31		0,0015	9,13

Tabela 5.3 – Granulometria resíduos empresa F 3

Data	d (mm)	P _{sed} (%)	Data	d (mm)	P _{sed} (%)
F 3 set	0,0602	95,82	F 3 fev	0,0625	94,73
	0,0434	89,14		0,0443	92,46
	0,0312	84,68		0,0316	90,20
	0,0226	75,77		0,0228	83,40
	0,0165	66,42		0,0165	74,33
	0,0122	59,73		0,0124	66,40
	0,0090	46,36		0,0091	55,76
	0,0065	37,44		0,0066	46,24
	0,0047	29,64		0,0048	38,09
	0,0033	22,06		0,0035	31,06
	0,0024	18,05		0,0025	25,62
	0,0014	14,71		0,0015	18,14

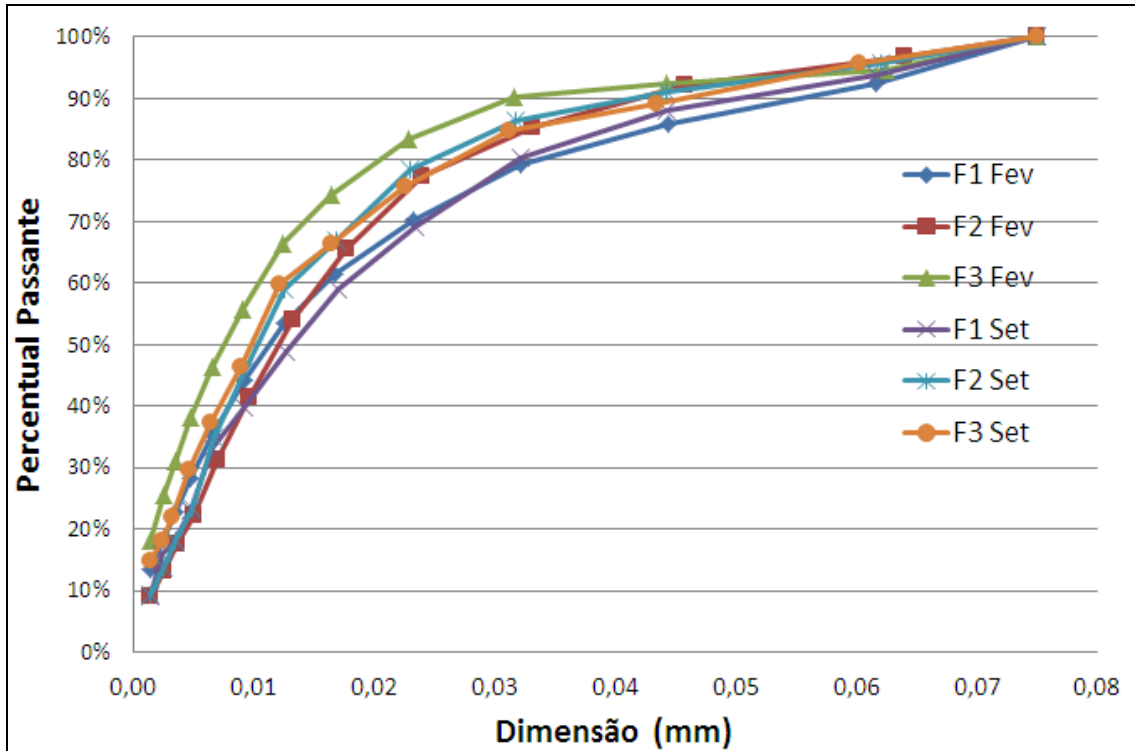


Figura 5.1 – Resultado do ensaio granulometria por sedimentação.

Com base nos resultados da granulometria, obtidos pelo ensaio de sedimentação, foram calculados os valores para D_{10} , D_{50} e D_{90} , conforme Tabela 5.4. A variação apresentada se refere a diferença entre as datas de coletas, setembro e fevereiro, para a mesma empresa.

Tabela 5.4 - Porcentagens de D_{10} , D_{50} e D_{90} dos diâmetros dos resíduos.

Resíduo	Data	D_{10} (μm)	(%)*	D_{50} (μm)	(%)*	D_{90} (μm)	(%)*
F1	Set	1,5	25	13,2	13	50,0	10
	Fev	1,2		11,3		55,1	
F2	Set	1,6	0	10,3	16	41,4	0
	Fev	1,6		12,0		41,7	
F3	Set	1,0	22	9,9	30	45,6	44
	Fev	0,8		7,6		31,6	

* Variação das coletas na mesma empresa.

Observa-se que os diferentes resíduos apresentam D_{10} , D_{50} e D_{90} na mesma ordem de grandeza. Isto se deve provavelmente ao processo de obtenção da lama que é o mesmo para todas as empresas (corte e polimento a úmido).

Alves (2008) realizou ensaio de granulometria a laser para resíduo de lama de de rocha granítica e encontrou para D_{10} o valor de 1,81 μm , para D_{50} o valor de 12,11 μm e para D_{90} o valor de 39,19 μm . O autor aborda que este material possui granulometria similar à do cimento CP V Ari utilizado em sua pesquisa que possuía para D_{50} o valor de 9,74 μm . Gonçalves (2000) apresenta o diâmetro médio para o resíduo de corte de granito em 6,74 μm . Observa-se aqui neste trabalho que o D_{50} variou de 13,2 μm a 7,6 μm para todas as amostras dos resíduos, e D_{90} variou de 55,1 μm a 31,6 μm , o que demonstra tratar-se de um material fino e com granulometria semelhante a do cimento. Por outro lado Petrucci (1987) apresenta que partículas compreendidas entre 5 a 75 μm , como agregados muito finos podem atuar como filler na adição ao cimento. Observa-se que os resíduos apresentam granulometria próxima à do cimento e que, dessa forma, poderiam atuar como filler. Por se tratar de um material com alta superfície favoreceria o empacotamento das partículas.

5.1.3 Massa Específica

O ensaio para caracterizar a massa específica foi realizado pela técnica do picnômetro (Tabela 5.5 e Anexo A), que resulta em 3 valores distintos de massa específica para cada amostra com resíduo, dos quais se obtém os valores apresentados na Tabela 5.5. Verifica-se que os resultados variaram em uma faixa de dispersão considerada pequena.

Tabela 5.5 – Massa específica média das amostras

Amostra	Massa Específica Média (g/cm^3)	Desvio Padrão	Erro
F1 set	2,75	0,01	0,01
F2 set	2,69	0,02	0,01
F3 set	2,78	0,01	0,01
F1 fev	2,79	0,01	0,01
F2 fev	2,67	0,03	0,03
F3 fev	2,70	0,00	0,00

Com os dados obtidos traçou-se o gráfico apresentado na Figura 5.2, que representa a variação da massa específica dos resíduos em função das

amostras, assim como a massa específica do cimento CP V Ari Plus (Ref.), conforme descrito no item 4.1.

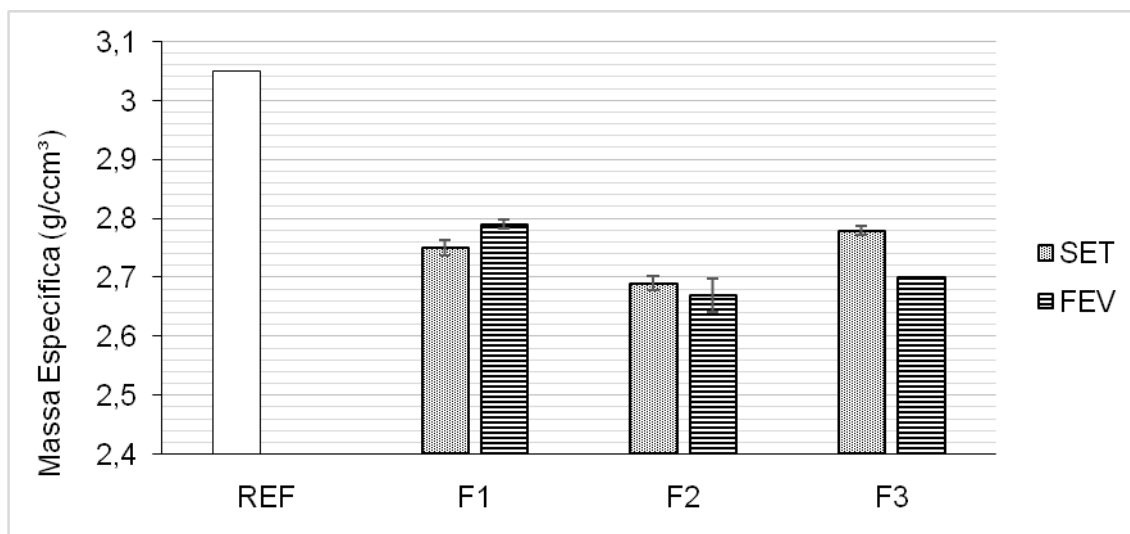


Figura 5.2 – Comparativo entre resultados do ensaio massa específica.

Os resultados indicam que os resíduos, apesar de terem constituintes distintos, apresentam massa específica próximas, com valor mínimo de $2,67 \text{ g/cm}^3$ e máximo de $2,79 \text{ g/cm}^3$. Conforme Neville (1997) 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 $2,8 \text{ g/cm}^3$ e conforme Sanchez (2009) a densidade relativa aparente do silestone é de $2,38 \text{ g/cm}^3$. Observa-se, também, que os resíduos são ligeiramente mais leves que o cimento.

5.1.4 Atividade Pozolânica

A atividade pozolânica das amostras com resíduos foi avaliada por meio da técnica Chapelle Modificado pela determinação do teor do hidróxido de cálcio fixado. Na Tabela 5.6 são apresentados os primeiros resultados obtidos para o ensaio. Após realizar esta primeira amostragem fez-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos pelas amostras com resíduos de setembro e com resíduos de fevereiro. Sendo que os resultados das amostras de setembro apresentaram como não pozolânicos e com valor bem abaixo das amostras de fevereiro, que se apresentaram como pozolânicos. Assim, o procedimento com os

resíduos de fevereiro foi rejeitado e repetido o ensaio, tendo em vista a possibilidade de carbonatação na amostragem de fevereiro.

Tabela 5.6 – Primeira amostragem do ensaio Chapelle Modificado

Amostras Resíduos	Hidróxido de Cálcio fixado (mg/g)	Amostras Resíduos	Hidróxido de Cálcio fixado (mg/g)
F1 set	117,72	F1 fev	558,08
F2 set	107,021	F2 fev	543,49
F3 set	171,234	F3 fev	525,25

Os resultados obtidos no novo procedimento são apresentados na Tabela 5.7. Observa-se que o teor de cálcio fixado varia em função da amostra e da data de coleta, o que se justifica pela heterogeneidade dos resíduos (quadro 5.2).

Tabela 5.7 – Segunda amostragem do ensaio Chapelle Modificado

Amostras Resíduos	Hidróxido de Cálcio fixado (mg/g)	Amostras Resíduos	Hidróxido de Cálcio fixado (mg/g)
F1 set	117,72	F1 fev	18,26
F2 set	107,021	F2 fev	54,78
F3 set	171,234	F3 fev	76,69

A ABNT NBR 15895:2010, que trata do ensaio Chapelle Modificado, não estabelece valor como parâmetro de medida para classificar a atividade pozolânica. Conforme Raverdy *et al.* (1980), o material é considerado pozolânico a partir de 330 mg hidróxido de cálcio fixado por grama de material analisado. Para a sílica ativa Sales (2014) encontrou um consumo de 615,45 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$. Os resultados obtidos pelos ensaios realizados nesta pesquisa demonstram valores inferiores a 330 mg para o hidróxido cálcio fixado por todas as amostras com resíduos, o que infere a uma característica não favorável à atividade pozolânica pelos mesmos.

Conforme Alves (2008) o resíduo de rochas graníticas não é um material pozolânico. O autor aborda que, embora se verifique tal fato a adição do resíduo de rocha granítica é possível atuar como efeito fíler ou material cimentante, portanto capaz de melhorar o desempenho de concretos. Gonçalves (2000) em

seu estudo com lama de resíduos de granito apresenta que os resíduos não apresentaram propriedades pozolânicas, porém, a adição do resíduo melhorou o desempenho do concreto, aumentando sua resistência à compressão e à tração, pela atuação como efeito fíler.

Conforme Rosa (2005) a continuidade das reações secundárias na hidratação do cimento depende da quantidade de CH gerada pela reação do cimento Portland, de modo que, em elevadas substituições do cimento Portland por adições minerais a quantidade de CH produzida poderá ser insuficiente, que neste caso, ocasiona uma interrupção no processo de formação de C-S-H secundário, sob pena de parte da adição mineral desempenhar apenas o efeito fíler (físico) de preenchimento de vazios.

5.2 Caracterização das Pastas

As pastas foram caracterizadas quanto à consistência normal, tempo de pega, expansibilidade, calorimetria diferencial, análise termogravimétrica (TGA) e análise térmica diferencial (DTA).

5.2.1 Consistência normal

Os resultados dos ensaios para avaliar a demanda de água requerida, por cada pasta confeccionada com e sem substituição parcial de 20% de cimento por resíduos, são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Consistência normal

Amostra	% fator água/aglomerante	Amostra	% fator água/aglomerante
Referência	32		--
F1 set	32	F1 fev	32
F2 set	32	F2 fev	32
F3 set	32	F3 fev	32

Pelos resultados pode-se observar que a demanda de água para se obter a consistência normal foi a mesma para todos os resíduos, o que permite inferir que a substituição do cimento na proporção de 20% não influenciou na quantidade de água requerida para obtenção da pasta na consistência normal. Aliabdo *et all* (2014) apresentam que na pesquisa com amostras de resíduos de pó de mármore, em substituição ao cimento nas proporções 0,0%, 5,0%, 7,5%, 10,0% e 15,0% não houve variação na água requerida dentre as amostras com e sem o resíduo.

Segundo Neville e Brooks (2013) o material que atua como filer não deve aumentar a demanda de água quando utilizados em concretos e não deve causar uma diminuição da resistência no longo prazo da resistência do concreto. O que indicaria ser os resíduos passíveis de atuação como filer, dependendo do ensaio de resistência à compressão

5.2.2 Tempo de Pega

A Tabela 5.9 aborda os resultados obtidos para o tempo de pega, requerido pelas pastas de consistência normal, confeccionadas com e sem resíduos. Este tempo se refere ao tempo gasto para enrijecimento da pasta de cimento, com a mudança do estado fluido para o rígido. A pega é causada pela hidratação do C_3A e C_3S , sendo que o início da pega corresponde a uma rápida elevação da temperatura e o fim corresponde ao pico de temperatura. O início da solidificação chamado de início de pega marca o ponto em que a pasta se torna não trabalhável.

Tabela 5.9 – Tempo de pega

Amostras	Tempo (min)		
	Início de pega	Fim de pega	Pega
Referência	130	180	50
F1 set	125	180	55
F1 fev	130	180	50
F 2 set	125	190	65
F 2 fev	140	180	40
F 3 set	135	200	65
F 3 fev	135	195	60

Para o início de pega, algumas amostras com resíduos se anteciparam (4%), enquanto outras apresentaram valores no máximo de 8% acima do traço referência. Para o fim de pega os valores registrados foram iguais ou no máximo 11% acima do traço referência. A partir dos resultados verifica valores iguais ou muito próximos entre as amostras com resíduos, tal fato permite deduzir que os resíduos não influenciaram nos tempos de pega, o que permite inferir que os fenômenos de enrijecimento gradual foram similares.

O tempo de pega inicial para o cimento CP V ARI Plus utilizado na pesquisa, conforme laudo apresentado pelo fornecedor, variou de 131 min. a 135 min. e o fim de pega variou de 181 min. a 190 min. Neville (2013) apresenta o tempo de pega no mínimo em 60 min. para o início da pega prescrito pela ASTM C 150-05, e o fim de pega no tempo máximo de 10 horas para os cimentos Portland.

5.2.3 Calorimetria exploratória diferencial

Nas Figuras 5.3 e 5.4 encontram os resultados obtidos pelas amostras com e sem resíduos, no ensaio de calorimetria, expressos pela variação da temperatura ao longo do tempo. Os resultados obtidos são típicos de uma curva de calorimetria de cimento (Concreto). A linha verde representa o compartimento com amostra do traço referência, isto é, sem resíduos. Os resultados permitem avaliar a evolução da cinética de hidratação dos cimentos nas primeiras 72 horas, período que abrange os tempos de início e fim de pega (CINCOTTO, 2011). Conforme Neville (1997) a hidratação dos compostos do cimento é exotérmica, chegando a liberação de até 120 cal/g de cimento. Conforme Metha e Monteiro (2008) a hidratação das pastas das amostras começam a ocorrer imediatamente após o contato do cimento com a água, levando a formação inicial da etringita, o que não pode ser detectado pela técnica da calorimetria ALARCON *et al.*, (2005).

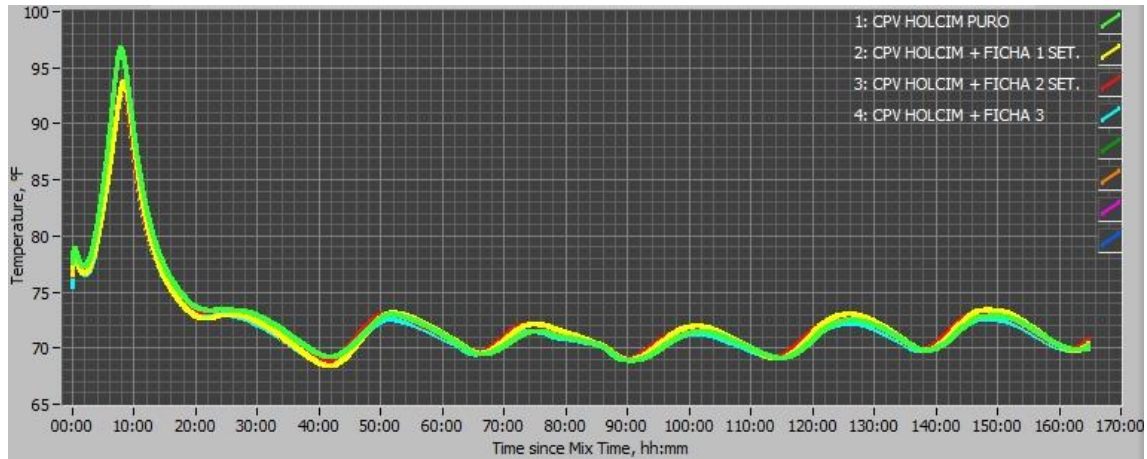


Figura 5.3 – Resultado do ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) das pastas sem substituição e com substituição em 20% do cimento por resíduo coletado em setembro.

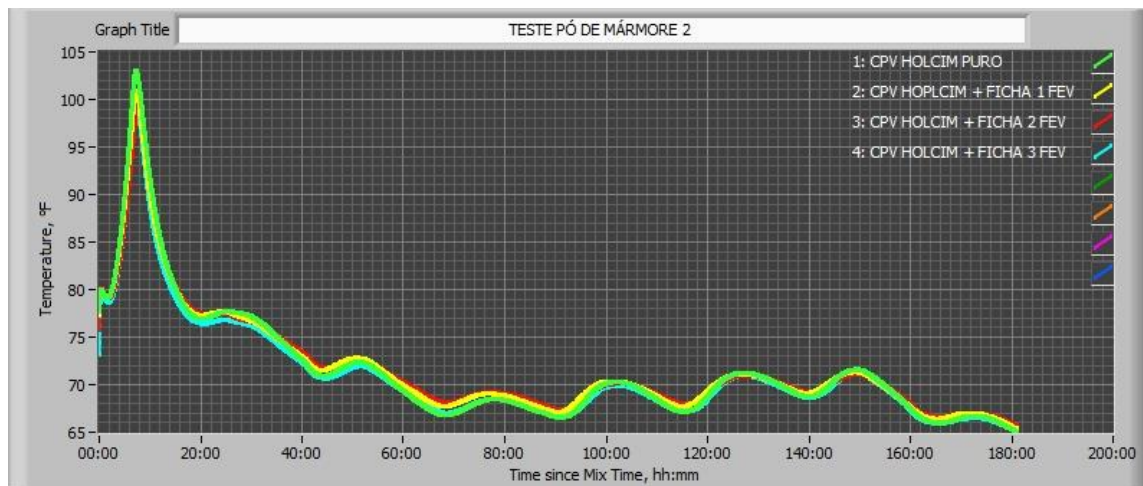


Figura 5.4 – Resultado do ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) das pastas sem substituição e com substituição em 20% do cimento por resíduo coletado em fevereiro.

Conforme abordado por Bianchini (2010), Benini e Sandberg (2008) a hidratação do cimento Portland pode ser abordada em estágios com o processo marcado por aumento e redução do fluxo de calor conforme a taxa de hidratação do cimento:

- Estágio I - Imediatamente após o contato com a água, uma rápida dissolução iônica de íons de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , OH^- e SO_4^{2-} presente no cimento solubiliza, completamente nos primeiros segundos promovendo a formação simultânea dos

primeiros hidratos. O cimento é dissolvido e reage com os íons de Ca^{2+} e SO_4^{2-} presentes na fase líquida, formando a etringita, que também se precipita na superfície da partícula de cimento. Este estágio se refere a um período muito curto da reação, o que dificulta a medição pelo ensaio de calorimetria.

- Estágio II (período de indução/dormência) – Durante este estágio até o início do período de aceleração o comportamento dos materiais cimentícios é determinado, particularmente, quanto às suas propriedades reológicas e de pega. A curva de liberação de calor de hidratação nesta etapa é praticamente nula, correspondendo ao estado fresco do concreto. À medida que a dissolução dos íons continua com o tempo, a concentração de C_3S precipitado aumenta representando o término do período de dormência e iniciando o estágio III.

- Estágio III (período de aceleração) – Neste período, vários hidratos atingem a condição de supersaturação, o progresso da hidratação é acelerado novamente e torna-se controlado pela nucleação e crescimento dos produtos de hidratação, com formação de C-H e C-S-H. A taxa de hidratação do C_3S aumenta e do C-S-H, ou "segundo estágio" começa a ser formado. Quantidades significativas são formadas dentro de 3 h e os grãos apresentam-se totalmente cobertos após 4 h. As camadas internas crescem externamente e, em aproximadamente, 12 h possuem a espessura de 0,5-1,0 μm , estágio também conhecido como ponto de coesão, coincidindo com a taxa de liberação máxima, que corresponde aproximadamente ao término da pega. A estrutura interconectada das camadas é considerada importante na definição das propriedades mecânicas e outras propriedades, também dependentes da distribuição de partículas e cimento.

- Estágios IV e V (períodos pós-aceleração) - Neste período, a taxa de hidratação diminui gradualmente, uma vez que a quantidade de material a reagir diminui e a taxa de hidratação passa a ser controlada pela difusão. A fase C-S-H continua a ser formada através da contribuição da hidratação contínua de C_2S e C_3S . A contribuição do C_2S aumenta com o tempo e como consequência a taxa na qual o hidróxido de cálcio é formado diminui. Com a contínua diminuição da permeabilidade da camada hidratada formada, C-S-H começa a depositar-se

internamente, e o crescimento da superfície em direção ao núcleo anidro ocorre mais rapidamente que a reação da alita.

Conforme resultados obtidos, para as amostras com e sem resíduos observa que provavelmente há um período de incubação de aproximadamente 2 horas, valor similar ao descrito na literatura para compostos cimentícios com e sem sílica ativa ou cinza volante LANGAN (2002). Após este período, verifica-se um aumento da temperatura das amostras de forma acelerada, provavelmente pela formação de hidróxido de cálcio e dos silicatos de cálcio hidratado. A temperatura máxima é atingida em aproximadamente 8 horas para as amostras com e sem resíduos. O procedimento foi realizado em duas etapas distintas, inicialmente o ensaio foi realizado com as amostras de setembro e posteriormente com as de fevereiro. Na primeira amostragem a pasta referência, sem resíduos obteve uma temperatura máxima de 36^oC (97^oF), enquanto para as pastas com resíduos de setembro a temperatura máxima registrada ficou entre 33,8^o (93^oF) e 34,4^oC (94^oF). Na segunda etapa a temperatura máxima da pasta referência foi de 39,4^oC (103^oF), e as pastas com resíduos de fevereiro registraram uma temperatura máxima entre 37,2^o (99^oF) e 38,3^o C (101^oF). Observa-se que nos compostos com resíduos essa elevação é menos acelerada e resulta numa temperatura mais baixa que o traço referência, o que promove um menor calor de hidratação, esta situação demonstra comportamento similar nas pastas coletadas tanto em setembro quanto nas de fevereiro. Tal fato pode ser atribuído a uma menor quantidade de cimento nas amostras com resíduos, portanto, com menos clínquer.

Os dados obtidos pela calorimetria corroboram com os resultados encontrados para o tempo de pega, no qual pode ser observado que a temperatura das reações de hidratação apresentaram valores similares ou abaixo do traço referência.

5.2.4 Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise Termodiferencial (DTA)

As Figuras 5.5 a 5.11 apresentam os dados obtidos para as pastas nos ensaios da TGA, DTA e as curvas de derivação primeira da TGA (DrTGA), que permitem identificar com maior exatidão as temperaturas de início das reações, ou seja, onde a velocidade da reação foi máxima. O local de pico da DrTGA representa a região onde a velocidade da decomposição é máxima. De forma a explicitar essas regiões foram traçadas os gráficos das Figuras 5.12 e 5.13 com escalas diferentes. A análise conjunta das curvas de variação de massa, derivada e energia em função da temperatura permitiu identificar as regiões onde ocorreram as reações de desidratação que são apresentadas na tabela 5.10.

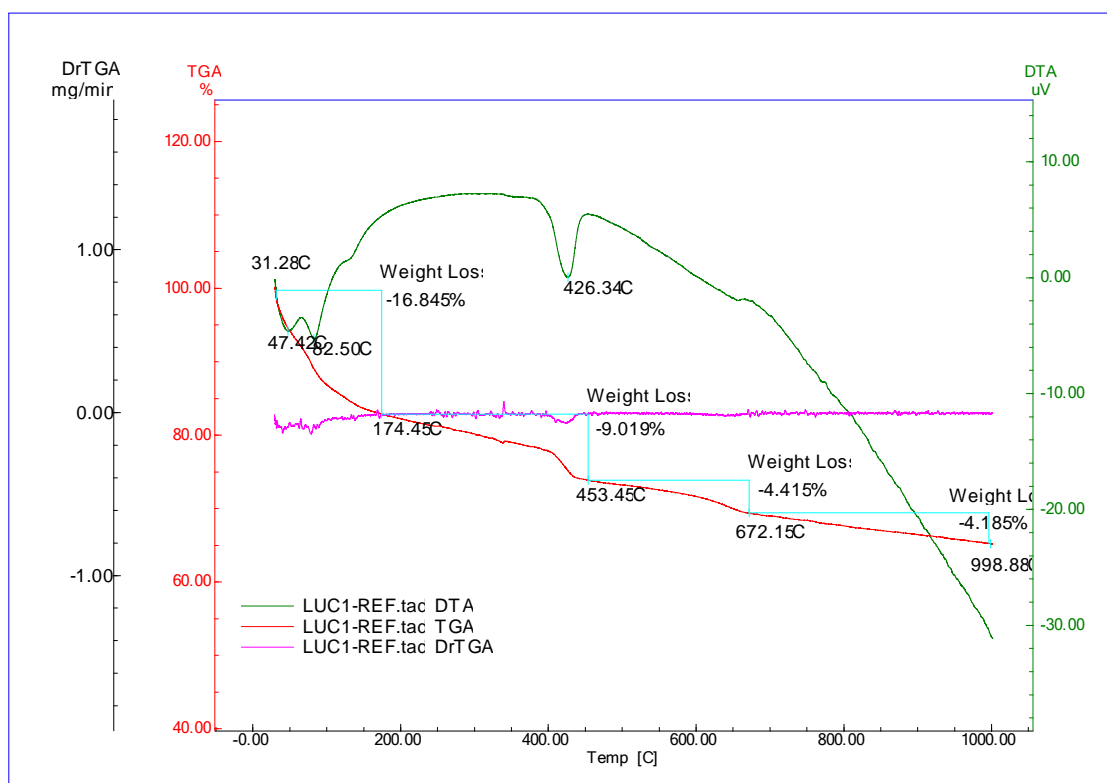


Figura 5.5 - Resultados dos ensaios da TGA - DrTGA- DTA para pasta do traço referência.

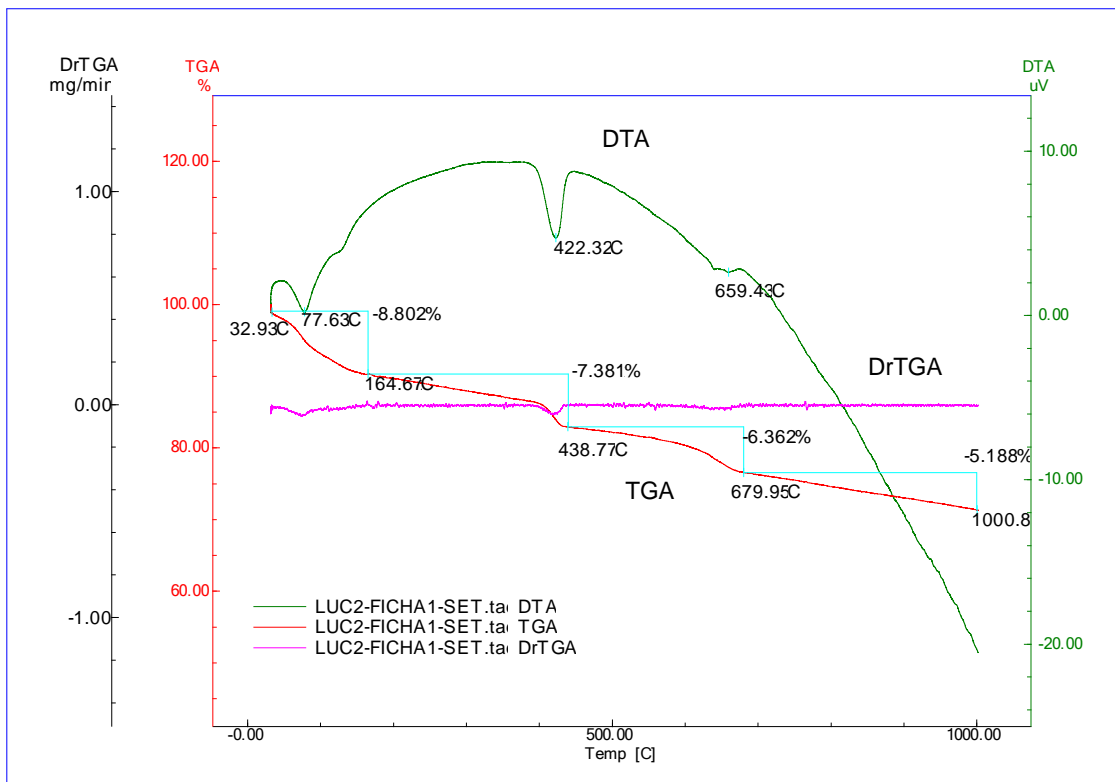


Figura 5.6 – Resultados dos ensaios da TGA – DrTGA – DTA para pasta com resíduo da empresa F1 set.

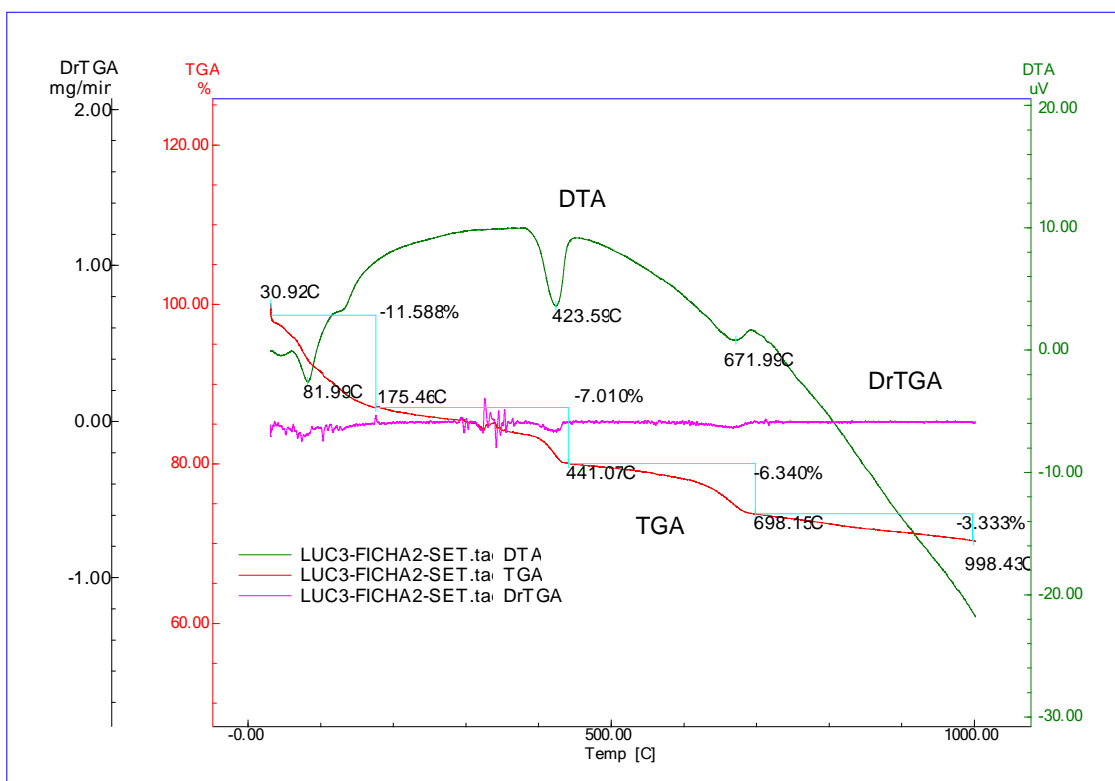


Figura 5.7 - Resultados dos ensaios da TGA – DrTGA – DTA para pasta com resíduos da empresa F2 set.

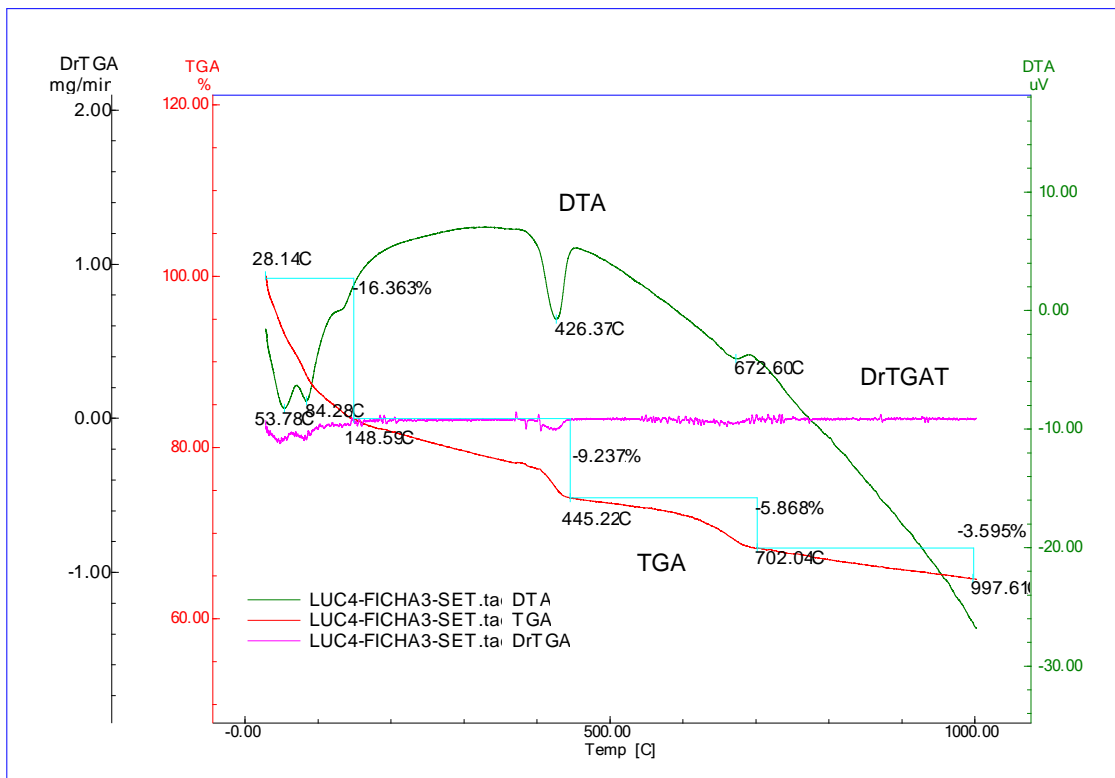


Figura 5.8 – Resultados dos ensaios da TGA – DrTGA – DTA para pasta com resíduo da empresa F3 set.

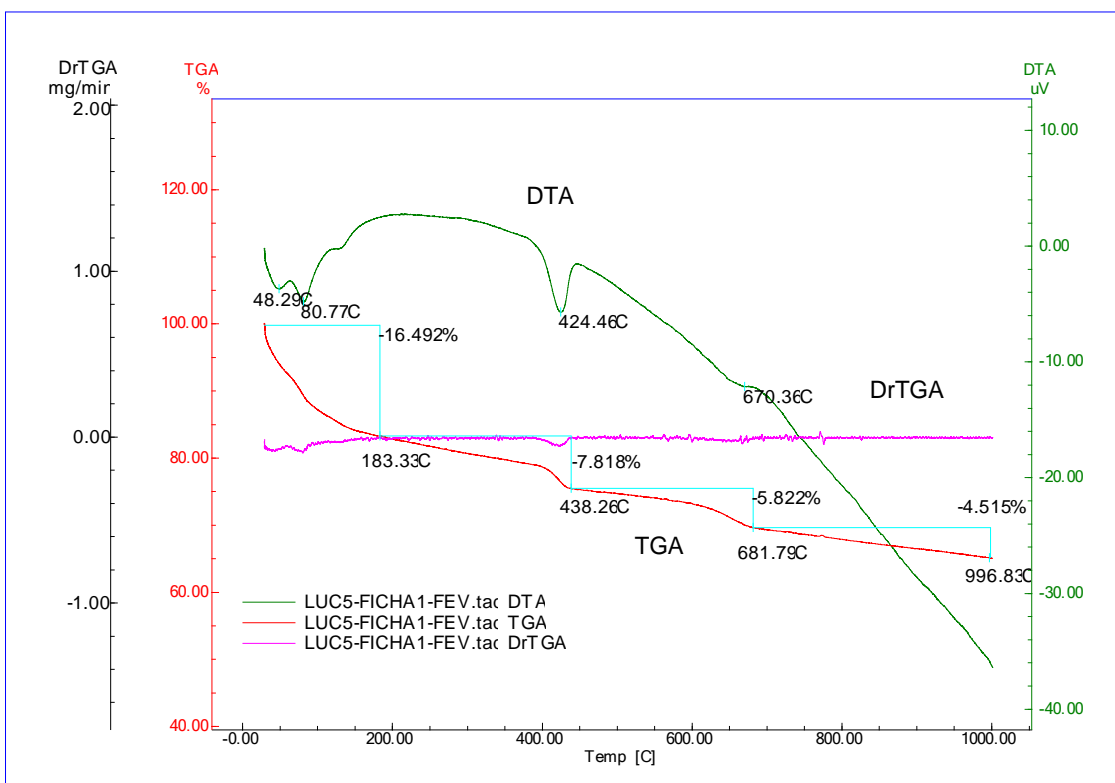


Figura 5.9 - Resultados dos ensaios da TGA – DTG – DTA para pasta com resíduos da empresa F1 fev.

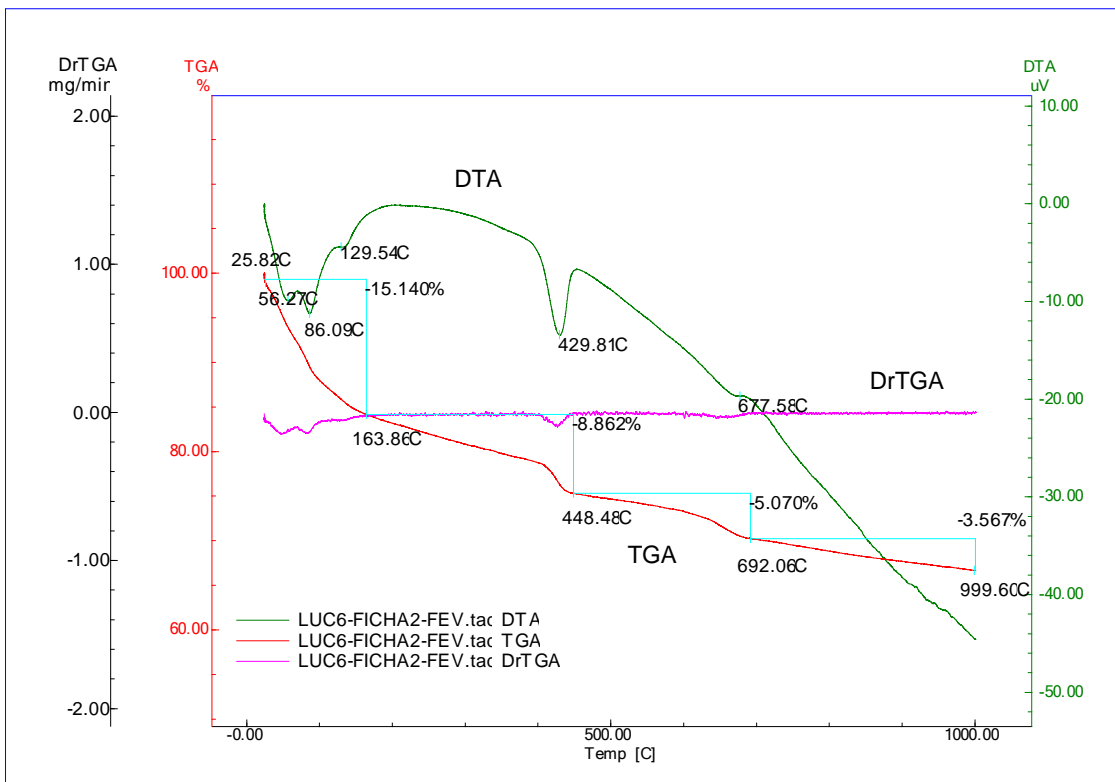


Figura 5.10 – Resultados dos ensaios da TGA – DrTGA – DTA para pasta com resíduos da empresa F2 fev.

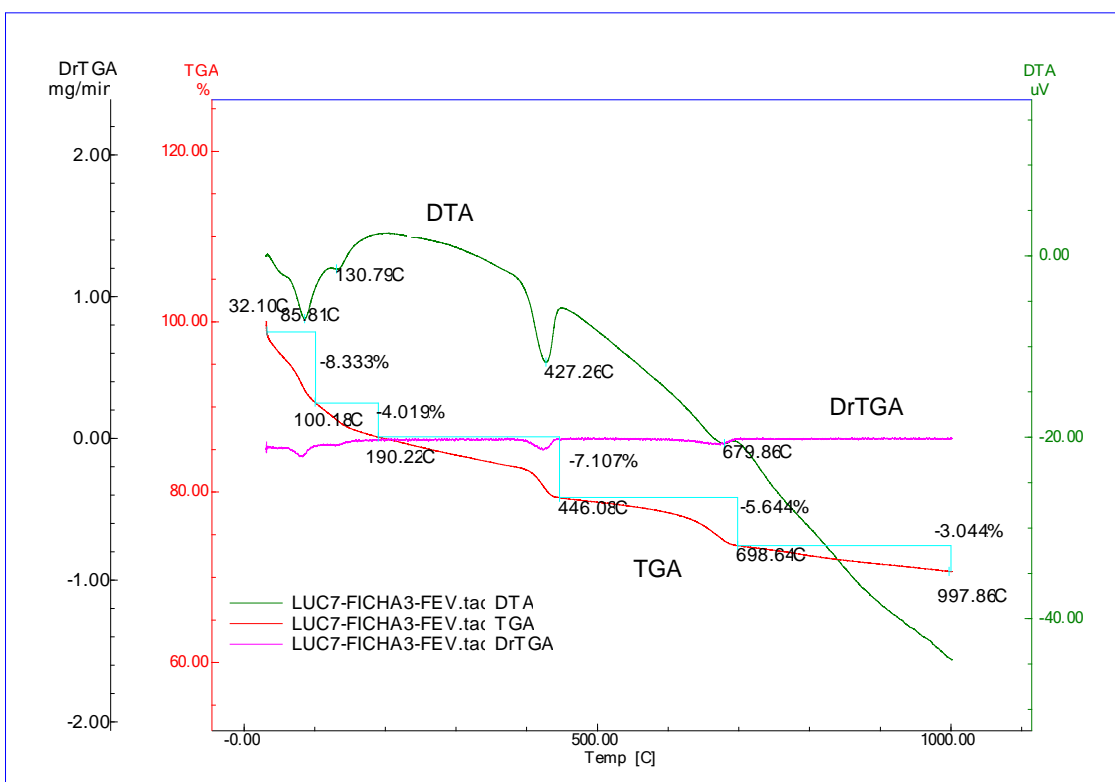


Figura 5.11 – Resultados dos ensaios da TGA – DrTGA – DTA para pasta com resíduos da empresa F3 fev.

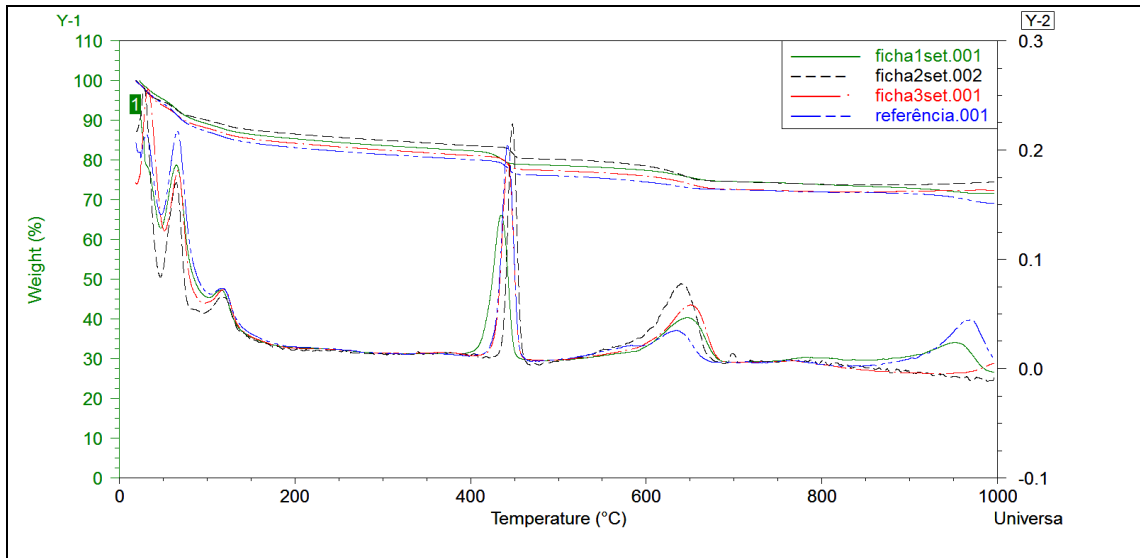


Figura 5.12- Resultados dos ensaios da TGA e DrTGA para pasta com resíduos das empresas referentes às coletas realizadas em setembro.

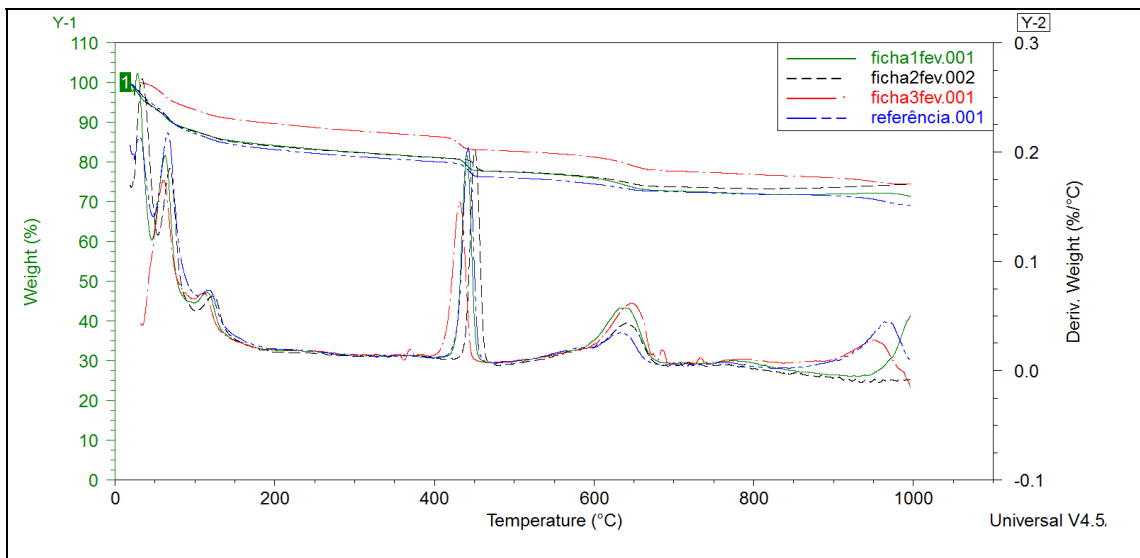


Figura 5.13 - Resultados dos ensaios da TGA e DrTGA para pasta com resíduos das empresas referentes às coletas realizadas em fevereiro.

Tabela 5.10 – Resultados Termogravimetria e Termodiferencial em pontos relevantes das reações

Material	Intervalo de temperatura (°C)	Perda de Massa Δm (%)
Referência	31,280 - 174,45	16,845
	174,45 - 453,45	9,019
	453,45 - 672,15	4,415
	672,15 - 998,88	4,185
F1 set	32,930 - 164,67	8,802
	164,67 - 488,77	7,380
	488,77 - 679,95	6,362
	679,95 - 1000,0	5,188
F 1 fev	48,290 - 183,33	16,492
	183,33 - 438,26	7,818
	438,26 - 681,79	5,822
	681,79 - 996,83	4,515
F2 set	30,920 - 175,46	11,588
	175,46 - 441,07	7,010
	441,07 - 698,15	6,340
	698,15 - 998,43	3,333
F2 fev	25,820 - 163,86	15,140
	163,86 - 448,48	8,862
	448,48 - 692,06	5,070
	692,06 - 999,60	3,567
F3 set	28,140 - 148,55	16,363
	148,59 - 445,22	9,237
	445,22 - 702,04	5,868
	702,04 - 997,61	3,595
F3 fev	32,100 - 100,18	8,333
	100,18 - 190,22	4,019
	190,22 - 446,08	7,107
	446,08 - 698,04	5,644
	698,04 - 997,88	3,044

As temperaturas em que ocorrem as reações de desidratação devido ao aquecimento, abordadas em literatura (ALARCON-RUIZ *et al.*, 2005; DWECK *et al.*, 2000; KNOPF *et al.*, 1999; PAYA *et al.*, 2003; RODRIGUES *et al.*, 2010) comumente apresentam uma variação em função dos estudos. De modo geral, ocorre a perda da água livre ou armazenada na estrutura dos capilares na temperatura da faixa de 30°C-105°C, e até 120°C ocorre o esgotamento completo dessa água. A decomposição da gipsita acontece na faixa de 110°C -180°C e na faixa de 180°C-240°C ter-se-ia a desidratação dos aluminatos de cálcio e aluminossilicatos hidratados. A perda de água combinada do silicato de cálcio hidratado ocorre entre 50°C a 300°C; a desidratação desse silicato no que se refere à água interlamelar se daria a 350°C; a saída da água adsorvida do silicato de cálcio hidratado seria em torno de 400°C; entre 410°C-580°C seria detectada

a desidratação do hidróxido de cálcio; e de 520°C a 900°C a decomposição do carbonato de cálcio.

Os resultados mostram que as reações devido ao aquecimento da pasta com e sem resíduos ocorrem basicamente em faixas de temperatura semelhantes, com exceção do F3 fev onde foi identificada uma reação a mais na faixa de 100°C a 450°C. A perda de massa é praticamente a mesma para as amostras com e sem resíduos. Pelos resultados observa-se uma variação significativa apenas no início do aquecimento. Isto poderia estar relacionado com a umidade da amostra uma vez que nas temperaturas iniciais se observa perda da água livre ou armazenada na estrutura dos capilares do gel. Para cada faixa de temperatura envolvida se tem a mesmo tipo de variação de energia (absorção ou liberação).

Os resultados obtidos para perda de massa das amostras com resíduos, na faixa de temperatura de 400°C a 600°C, zona referente a possível perda de água do Ca(OH)_2 pela desidratação do hidróxido de cálcio, portlandita, resultaram em valores similares ao traço referência. Rodrigues (2010) aborda que uma análise comparativa do percentual de perda de massa na temperatura de decomposição da portlandita possibilita avaliar a ocorrência ou não da reação pozolânica.

Como, os dados aqui obtidos, não apresentam indicativo de que houve uma perda maior no teor de concentração do Ca(OH)_2 nas pastas com resíduos do que no traço referência, se deduz a não pozolanicidade dos resíduos, fato este verificado no ensaio Chapelle Modificado.

5.2.5 Expansibilidade

Conforme Neville (1997) as expansões da pasta de cimento podem ser decorrentes de reações de hidratação, retardada ou lenta, ou a outra reação de alguns compostos presentes no cimento endurecido como a cal, magnésio e sulfato de cálcio livres. O autor apresenta que a expansibilidade do cimento se manifesta meses ou anos após a fabricação dos compostos cimentícios, para

tanto é importante determinar a expansão pelo método acelerado por meio do ensaio de Le Chatelier. Os resultados obtidos para este ensaio são apresentados, conforme Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Resultados dos ensaios de expansibilidade volumétrica das pastas

Pastas	Medições dos afastamentos entre as agulhas (mm)			Média (mm)
	Primeira	Segunda	Terceira	
Referência	0	0	0	0
F 1	Set	0	0	0
	Fev	0	0	0
F 2	Set	0	0	0
	Fev	0	0	0
F 3	Set	0	0	0
	Fev	0	0	0

Os resultados demonstram uma característica não expansiva das pastas com e sem resíduos. Na literatura pesquisada não foram encontrados resultados sobre a influência de resíduos, oriundos do beneficiamento de rochas ornamentais, na expansibilidade de pastas cimentícias. Segundo Sales (2014), na pesquisa realizada no Brasil, não foi detectado a abertura das agulhas para todas as pastas com e sem adição de partículas de vidro incolor e âmbar, inclusive para a pasta de controle, o que resultou em expansibilidade 0 mm. O autor comparou os resultados com o cimento, fornecidos pelo fabricante, que atestou a expansibilidade do cimento em 0 mm.

A diferença registrada entre a primeira e a última medição representa a expansibilidade da pasta de cimento, que conforme Neville (1997) não deve exceder em 5 mm.

5.3 Caracterização dos Compostos Cimentícios no Estado Fresco-Trabalhabilidade

O estado fresco foi avaliado pelo método *Flow Table*, o que permitiu verificar a fluidez das amostras com e sem resíduos. Os resultados encontram-se expressos na Tabela 5.12 e na Figura 5.14. Os valores médios não diferiram, para cada

amostra, em mais de 5 mm, conforme prescreve a normalização brasileira ABNT NBR 13276:2005 e o desvio padrão e o erro demonstram uma baixa dispersão dos resultados.

Tabela 5.12 – Resultados ensaio índice de consistência.

Amostras	Índice de Consistência IC (mm)	IC médio (mm)	Desvio padrão	Erro
Refer	192	194	2	2
	196			
	195			
F 1 set	190	189	1	1
	188			
	189			
F 1 fev	189	192	2	2
	193			
	193			
F 2 set	183	184	1	1
	185			
	183			
F 2 fev	183	184	1	1
	185			
	183			
F 3 set	190	190	1	1
	192			
	189			
F 3 fev	192	193	1	1
	193			
	193			

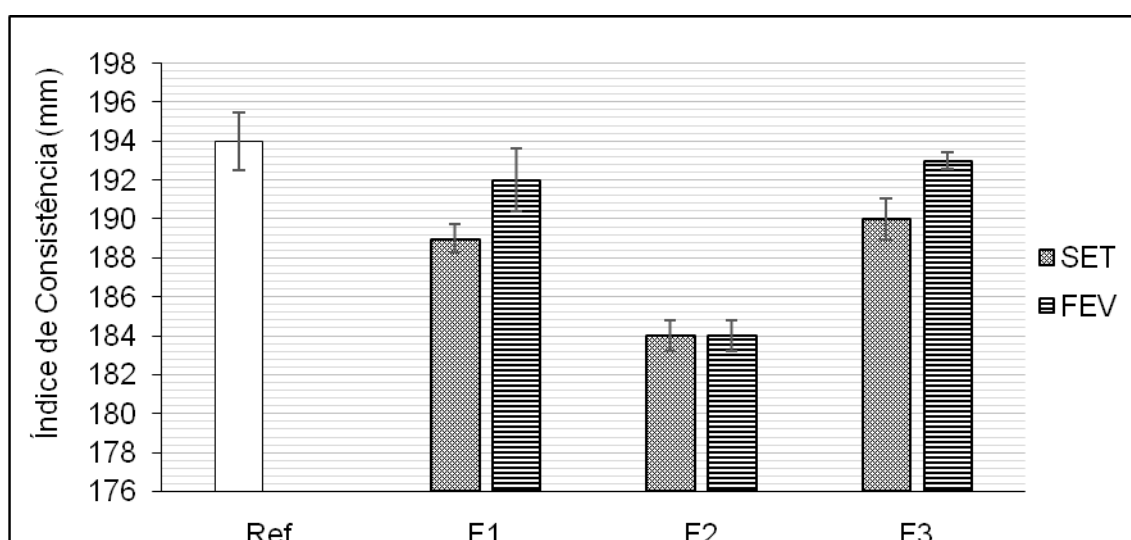


Figura 5.14 – Resultados ensaio índice de consistência.

Os resultados das amostras com resíduos apresentam valores abaixo do traço referência com variação máxima de 5% em relação ao traço referência. Calmon

et al. (2013) observaram uma redução na trabalhabilidade do concreto, pelo uso de resíduos de lama de rochas ornamentais em substituição ao cimento em 5%,10% e 15% e que o concreto perde trabalhabilidade à medida que aumenta o percentual de substituição do cimento. Allam *et al.* (2014) realizou pesquisa com lama granítica em substituição de cimento e areia e concluiu que a alta finura do material apresenta efeito insignificante na variação da trabalhabilidade entre as misturas pesquisadas. Os resultados do ensaio de consistência demonstram que mantendo o fator água cimento *a/c* em 48% para os valores obtidos (189 ± 5) mm, a variabilidade apresentada foi muito baixa para a característica da trabalhabilidade.

Verifica-se que para as amostras referentes aos resíduos da empresa F2 os resultados obtidos apresentaram mesmo valor, o que pode ser atribuído aos resíduos desta empresa serem compostos somente pelo granito e mármore, o que não ocorre nas demais empresas.

5.4 Caracterização dos Compostos Cimentícios no Estado Endurecido

Os compostos no estado endurecido foram avaliados quanto a absorção por imersão e capilaridade, módulo de elasticidade, resistividade elétrica, carbonatação, esforços mecânicos: tração na flexão, compressão simples e axial.

5.4.1 Resistência à Compressão Axial

Os resultados dos ensaios de compressão axial para as idades de 7 dias, 14 dias e 28 dias são apresentados na Tabela 5.13, onde pode se verificar os valores obtidos para a resistência a compressão, as médias, o desvio padrão e o erro. Os desvios padrões e erros apresentam a baixa dispersão em que os resultados se encontram. Na Figura 5.15 é apresentada graficamente a análise comparativa das médias obtidas para cada amostra e idade.

Tabela 5.13 - Resultado da resistência à compressão axial em MPa

Amostra	7 dias	Média 7 dias	Erro	14 dias	Média 14 dias	Erro	28 dias	Média 28 dias	Erro
REF	44,2	44,0	0,1	46,0	47,0	0,6	56,4	56,4	0,1
	43,9			47,4			56,3		
	44,0			47,7			56,5		
F1 set	37,6	29,8	1,3	47,2	41,9	2,5	46,1	44,2	0,8
	25,9			37,2			43,4		
	40,6			39,5			43,8		
	40,8			43,5			43,3		
F1 fev	37,0	36,9	0,1	44,2	43,7	0,2	50,7	50,5	0,1
	36,6			43,2			50,2		
	36,9			43,5			50,4		
	37,1			43,8			50,7		
F2 set	41,2	40,6	0,3	46,4	46,4	0,3	52,1	52,2	0,1
	40,2			46,9			52,5		
	40,6			45,8			52,3		
	40,2			46,6			51,9		
F2 fev	36,0	36,1	0,6	43,6	43,0	0,3	49,7	49,8	0,2
	34,8			42,5			49,9		
	37,2			42,7			50,1		
	36,3			43,0			49,4		
F3 set	35,1	35,5	0,2	38,0	38,6	0,3	43,0	43,8	0,3
	35,4			38,6			43,8		
	36,0			38,7			44,1		
	35,6			39,1			44,1		
F3 fev	45,5	44,9	0,4	45,6	45,8	0,2	48,3	48,4	0,2
	45,6			46,2			48,6		
	44,3			45,7			48,9		
	44,2			45,8			47,9		

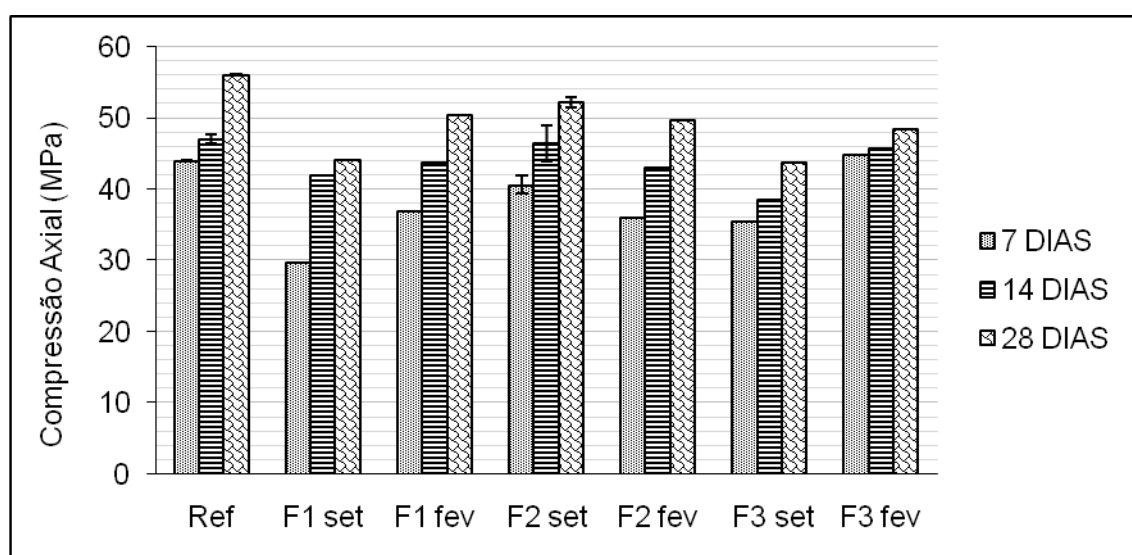


Figura 5.15 – Comparativo ensaio compressão axial.

Verifica-se que a resistência média à compressão axial na idade de 7 dias obtidas pelas amostras com resíduos apresentaram o valor mínimo de 29,8 MPa e o valor máximo de 44,9 MPa, enquanto o traço referência apresentou o valor de 44,0 MPa. Para a idade de 28 dias obtidas as amostras com resíduos apresentaram o valor mínimo de 43,8 MPa e o valor máximo de 52,2 MPa, enquanto o traço referência apresentou o valor de 56,4 MPa. Para todas as amostras observa-se uma evolução da resistência à compressão ao longo das idades de rompimento. Os resultados obtidos pelas amostras da empresa F2 foram aqueles que apresentaram melhor desempenho.

Observa-se que na idade inicial de 7 dias as amostras com resíduos apresentaram uma variação de até 32% abaixo do traço referência. No que se refere a idade de 28 dias a substituição do resíduo por cimento apresentou uma variação máxima de 29% e mínima de 7% abaixo do traço referência.

Considerando os resultados do ensaio Chappelle Modificado, da termogravimetria, da água de consistência normal é possível considerar que os resíduos apresentam efeito filer, o que sugere estar relacionado ao empacotamento da pasta e contribuir para uma maior compacidade da matriz.

Calmon *et al.* (2013) substituíram cimento por lama, oriunda de resíduos de rochas ornamentais, na confecção de concreto. Observaram que no concreto com relação a/c de 0,45 e com substituição em 5%, os resultados apresentaram maior resistência a compressão axial que o traço referência. Para a substituição em 10% os valores apresentados foram muito próximos ao traço referência. Observou ainda, que para o concreto com substituição em 15% a resistência diminuiu. No entanto Allam *et al.* (2014) realizou pesquisa com lama granítica em substituição de cimento e areia e concluiu que houve uma diminuição da resistência à compressão em todas as idades, com qualquer proporção da substituição pesquisada.

Alves (2008) observou na pesquisa com a lama granítica um aumento na resistência a compressão axial na idade de 28 dias de 39,4 MPa do traço referência para 46,5 MPa para amostras com 20% de adição de resíduos e a/c 0,65. Barros (2008) utilizou em sua pesquisa resíduo de lama abrasiva de mármore e granito, cujos resultados para o ensaio de compressão, apresentaram um melhor desempenho das amostras com resíduos, em relação aos concretos convencionais de mesmo fator a/c e mesmo consumo de cimento. O autor aborda que a utilização da adição proporcionou melhor preenchimento dos vazios da estrutura do concreto endurecido. Gonçalves (2000) estudou a utilização de resíduo do corte de granito, como adição mineral nos concretos em percentuais de 10% e 20% da massa do cimento e obteve resultados muito satisfatórios com melhor desempenho das amostras com resíduos.

5.4.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico

A Tabela 5:14 e a Figura 5.16 apresentam os resultados do ensaio módulo de elasticidade dinâmico para amostras com e sem os resíduos. Os dados mostram que os resultados obtidos se encontram próximos da média considerando os desvios padrões e os erros com valores baixos.

Tabela 5.14 – Resultado ensaio módulo de elasticidade dinâmico

Amostra	CP	Peso (g)	ρ (kg/m ³)	ρ (kg/m ³)	Frequência (kHz)	Módulo elast. (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Erro
Refer.	1	3450,9	2196,91	2202,59	9,49	31,64	31,53	0,41	0,23
	2	3465,7	2206,33		9,53	32,06			
	3	3473,5	2211,29		9,40	31,26			
	4	3449,2	2195,82		9,42	31,17			
F1 set	1	3428,3	2182,52	2161,77	9,09	28,85	28,9	0,40	0,23
	2	3410,5	2171,19		9,18	29,27			
	3	3379,9	2151,71		9,20	29,14			
	4	3364,1	2141,65		9,10	28,37			
F2 set	1	3440,5	2190,29	2160,82	9,21	29,72	28,57	0,99	0,57
	2	3374,3	2148,14		9,00	27,84			
	3	3410,4	2171,12		9,15	29,08			
	4	3351,7	2133,75		9,00	27,65			
F3 set	1	3369,9	2145,34	2159,01	9,00	27,8	28,58	0,92	0,53
	2	3384,1	2154,38		9,29	29,74			
	3	3387,7	2156,67		8,99	27,89			
	4	3423,8	2179,65		9,10	28,87			
F1 fev	1	3379,0	2151,13	2152,01	8,90	27,26	27,71	1,12	0,64
	2	3387,2	2156,35		8,95	27,63			
	3	3395,7	2161,76		9,02	29,28			
	4	3359,6	2138,78		8,83	26,68			
F2 fev	1	3465,5	2206,2	2183,09	9,19	29,81	28,96	0,88	0,51
	2	3438,2	2188,82		9,10	29			
	3	3377,0	2140,05		9,00	27,74			
	4	3451,5	2197,28		9,13	29,3			
F3 fev	1	3410,6	2171,25	2150,16	9,14	29,02	28,06	0,94	0,54
	2	3357,8	2137,64		8,90	27,09			
	3	3347,2	2130,89		8,97	27,43			
	4	3394,3	2160,87		9,11	28,69			

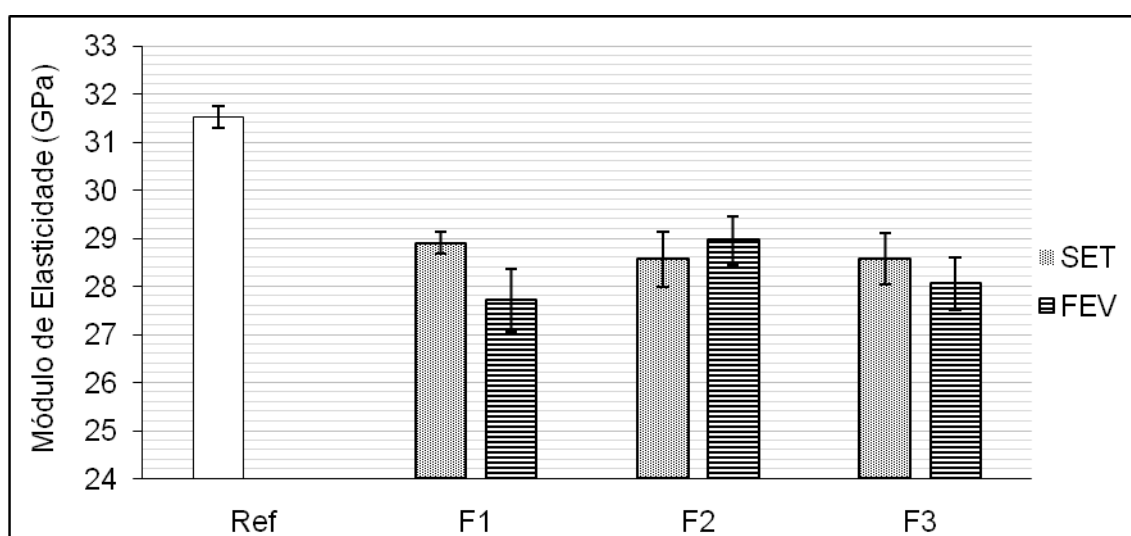


Figura 5.16 – Resultados do ensaio módulo de elasticidade dinâmico

Os módulos de elasticidade dinâmicos apresentaram uma pequena queda em relação ao traço referência. Não observa-se influência da heterogeneidade dos resíduos nos resultados. O traço referência apresentou 31,53 GPa e as amostras com resíduos apresentaram o menor valor de 27,71 GPa e o valor máximo de 28,96 GPa. Observa-se uma similaridade entre os resultados obtidos pelas amostras com resíduos, o que infere dizer que a heterogeneidade do material não acarretou modificações neste ensaio para a substituição de 20% do cimento por resíduos nas idades analisadas. Nobrega (2014) realizou pesquisa sobre incorporação de resíduo pó de pedra ornamental em argamassa para revestimento, com substituição parcial do cimento nas porcentagens de 5%, 10%, 20% e 50%, quando pode ser observada uma diminuição dos valores do módulo de elasticidade estático à medida que aumentava a proporção de resíduos inseridos na mistura.

De forma similar à resistência mecânica na compressão, observa-se que o uso de resíduos em substituição ao cimento praticamente não afeta o módulo de elasticidade. Considerando que o módulo é influenciado pela força das ligações e pelo empacotamento dos cristais/partículas pode-se inferir que o efeito filler foi o responsável pela manutenção do módulo mesmo quando se diminui o teor do cimento (Molin, 1995).

5.4.3 Resistência à Tração na Flexão

Os resultados dos ensaios de tração na flexão para as idades de 7 e 28 dias são apresentados nas Tabelas 5.15 e 5.16 e na Figura 5.17, onde podem ser observadas as cargas compressivas, as tensões, os valores médios, desvio padrão e os erros. Os dados mostram a baixa dispersão dos resultados.

Tabela 5.15 – Resultados do ensaio de tração na flexão aos 7 dias

Amostra	Carga compressiva (kgf)	Carga Compressiva (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Erro
Ref.	353,98	3461,90	8,26	8,82	0,51	0,36
	383,00	3745,71	8,93			
	397,28	3885,43	9,27			
F1	390,94	3823,37	9,12	8,68	0,52	0,37
	347,56	3399,12	8,11			
	378,23	3699,10	8,82			
	368,19	3600,89	8,59			
	366,22	3581,63	8,54			
	354,23	3464,34	8,26			
F2	364,53	3565,09	8,50	8,07	0,37	0,26
	335,46	3280,75	7,82			
	338,60	3311,47	7,90			
	321,93	3148,44	7,51			
	350,45	3427,38	8,17			
	348,36	3407,00	8,12			
F3	381,71	3733,08	8,90	8,85	0,24	0,17
	388,41	3798,67	9,06			
	368,19	3600,89	8,59			
	412,51	4034,33	9,62			
	353,95	3461,63	8,26			
	368,12	3600,23	8,59			

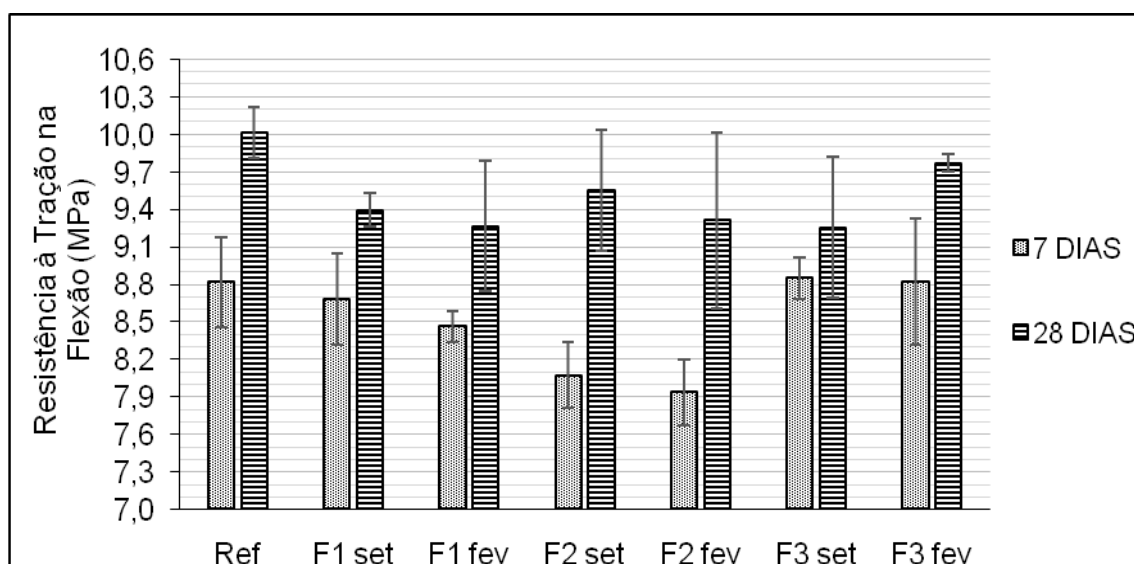


Figura 5.17 – Resultados ensaio de tração na flexão

Tabela 5.16 – Resultados ensaio de tração aos 28 dias

Amostra	Carga Compressiva (kgf)	Carga Compressiva (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Erro	
Ref.	425,46	4161,00	9,92	10,02	0,29	0,20	
	419,92	4106,77	9,79				
	443,50	4337,43	10,34				
F1	394,33	3856,53	9,20	9,40	0,19	0,14	
	403,77	3948,85	9,42				
	410,64	4016,02	9,58				
	Fev	423,41	4140,96	9,88	9,27	0,73	0,52
		406,22	3972,88	9,47			
		362,42	3544,45	8,45			
F2	425,96	4165,90	9,93	9,55	0,68	0,48	
	426,80	4174,09	9,95				
	375,68	3674,18	8,76				
	Fev	444,34	4345,61	10,36	9,32	1,00	0,70
		394,63	3859,48	9,20			
		359,26	3513,61	8,38			
F3	376,35	3680,68	8,78	9,26	0,80	0,56	
	436,37	4267,70	10,18				
	377,85	3695,36	8,81				
	Fev	415,80	4066,55	9,70	9,77	0,09	0,07
		417,84	4086,48	9,75			
		423,50	4141,87	9,88			

Para a idade de 7 dias o traço referência registrou o valor médio de 8,82 MPa e para as amostras com resíduos registrou o valor mínimo de 7,94 MPa e o valor máximo de 8,85 MPa. Para a idade de 28 dias o traço referência registrou o valor médio de 10,02 MPa e para as amostras com resíduos registrou o valor mínimo de 9,27 MPa e o valor máximo de 9,77 MPa. Observa-se uma similaridade nos valores para cada idade, o que demonstra uma não influência da heterogeneidade dos resíduos neste ensaio. Gonçalves (2000) estudou a utilização de resíduo do corte de granito, como adição mineral nos concretos e observou que a resistência aos esforços de tração na flexão se elevaram em proporções inferiores ao ganho promovido na resistência a compressão. Para a idade de 28 dias o traço com 20% de resíduos apresentou para o ensaio de tração na flexão o valor de 9,1 MPa e o referência apresentou o valor de 8,2 MPa para o a/c de 0,40.

O valor máximo apresentado pelos resultados das amostras com resíduos para ensaio de tração na flexão aos 28 dias corresponde a 9,77 MPa, e para o ensaio de compressão axial na mesma idade foi de 52,2 MPa, o que demonstra uma variação na relação, entre ambos (ensaio de tração e ensaio de compressão) da

ordem de grandeza de 18%. Conforme Metha e Monteiro (2008) tipicamente as resistências à tração na flexão são da ordem de 10% a 20%, respectivamente, da resistência à compressão, tal fato é atribuído à heterogênea e complexa microestrutura do concreto.

5.4.4 Absorção por imersão

A Tabela 5.17 e a Figura 5.18 apresentam os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão. Este ensaio permitiu avaliar a porosidade aberta e a capacidade máxima do material em absorver água, por meio da relação entre a massa seca e saturada das amostras com e sem resíduos. Os valores de erro e desvio padrão apresentam a baixa dispersão dos resultados.

Tabela 5.17 – Resultados do ensaio absorção de água por imersão e porosidade

Amostra	Média absorção por imersão (%)	Desvio padrão	Erro	Porosidade (%)	Desvio padrão	Erro
Refer.	5,46	0,22	0,13	11,95	0,44	0,25
F 1	Set	6,15	0,33	13,27	0,67	0,39
	Fev	6,25	0,28	13,47	0,53	0,31
F 2	Set	6,21	0,23	13,34	0,46	0,27
	Fev	5,82	0,25	12,69	0,54	0,31
F 3	Set	6,39	0,28	13,70	0,53	0,31
	Fev	6,22	0,37	13,36	0,71	0,41

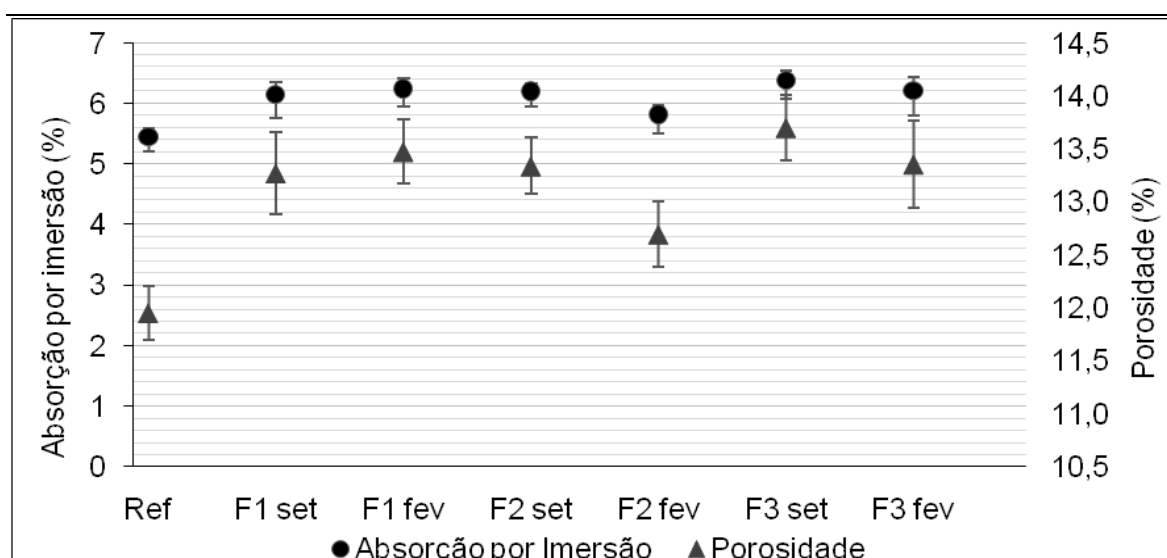


Figura 5.18 - Resultados ensaio de absorção por imersão e porosidade.

Pelos resultados obtidos no ensaio pode ser observado que a absorção por imersão nas amostras com resíduos apresentam valores muito próximos entre si e ao traço referência (aumento máximo de 17,08% para F3 set), não sendo observada a influência da heterogeneidade dos resíduos nos resultados. Conforme Metha e Monteiro (2008) a taxa de absorção de água é um bom indicativo da qualidade de um concreto e de sua durabilidade potencial, quando exposto a ambientes agressivos. Baixos valores de absorção indicam que íons agressivos terão dificuldade de penetrar no concreto. Conforme Neville (1997) um concreto de boa qualidade tem absorção abaixo de 10%. Conforme resultados obtidos no ensaio, a absorção máxima com uso dos resíduos foi de 6,3%.

A porosidade para o traço referência apresentou um valor de 11,95% e para as amostras com resíduos obteve-se valores um pouco acima, mínimo de 12,69% e máximo de 13,70%, o que justifica a pequena variação na resistência mecânica e no módulo de elasticidade medido. A variação máxima se refere ao F3 set com um aumento de 14,64% em relação referência. Observa uma similaridade entre os valores das amostras com os resíduos, o que demonstra a não variabilidade da porosidade, que representa o volume total dos vazios capilares, pela heterogeneidade dos resíduos. Alves (2008) em pesquisa da lama granítica observou que o concreto com fator a/c de 0,45, sofreu pouca influência em sua porosidade com a adição mineral, passando de 12,18% para 12,00%, uma variação inferior a 1,5% em sua porosidade.

5.4.5 Absorção por capilaridade

A Tabela 5.18 e a Figura 5.19 apresentam a média dos resultados da absorção de água por capilaridade com e sem o uso do resíduo ao longo do tempo. A Tabela 5.19 apresenta a média dos coeficientes de capilaridade para as amostras com e sem resíduos. O desvio padrão e o erro apresentam que os resultados obtidos estão próximos da média.

Observando os valores obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, representados na Figura 5.18 verifica a evolução da absorção ao longo do tempo, com uma maior absorção na fase inicial do ensaio. Verifica-se uma tendência na continuidade de crescimento das curvas, tal fato induz a uma provável continuidade do processo de absorção em todas as amostras com resíduos, por uma possível interligação dos condutos e a uma maior força de sucção devido ao refinamento dos poros.

Tabela 5.18 – Absorção de água por capilaridade por amostras ao longo do tempo

Amostra	Absorção por capilaridade	To (g)	10 min (g)	90 min (g)	3 h (g)	6 h (g)	12 h (g)	24 h (g)	72 h (g)
Ref	Média da massa (g)	0,00	0,03	0,10	0,16	0,24	0,36	0,49	0,78
	Erro	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05
	Desvio Padrão	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,10
F1 set	Média da massa (g)	0,00	0,03	0,10	0,16	0,25	0,39	0,57	1,00
	Erro	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,08
	Desvio Padrão	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,15
F1 fev	Média da massa (g)	0,00	0,04	0,13	0,19	0,29	0,43	0,62	0,98
	Erro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04
	Desvio Padrão	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,07
F2 set	Média da massa (g)	0,00	0,03	0,08	0,13	0,22	0,34	0,50	0,84
	Erro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04
	Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,08
F2 fev	Média da massa (g)	0,00	0,04	0,13	0,19	0,28	0,40	0,58	0,91
	Erro	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,10
	Desvio Padrão	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,07	0,11	0,21
F3 set	Média da massa (g)	0,00	0,04	0,12	0,18	0,27	0,40	0,58	0,91
	Erro	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05
	Desvio Padrão	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,10
F3 fev	Média da massa (g)	0,00	0,04	0,11	0,18	0,27	0,40	0,56	0,89
	Erro	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,07
	Desvio Padrão	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06	0,14

Tabela 5.19 – Resultado da média do coeficiente de capilaridade para amostras com e sem resíduos

Amostra		Média do Coeficiente de Capilaridade g/cm ²	Desvio padrão	Erro
Refer.		1,3	0,32	0,16
F 1	set	1,4	0,23	0,12
	fev	1,7	0,15	0,07
F 2	set	1,1	0,08	0,04
	fev	1,8	0,35	0,18
F 3	set	1,5	0,33	0,17
	fev	1,5	0,22	0,11

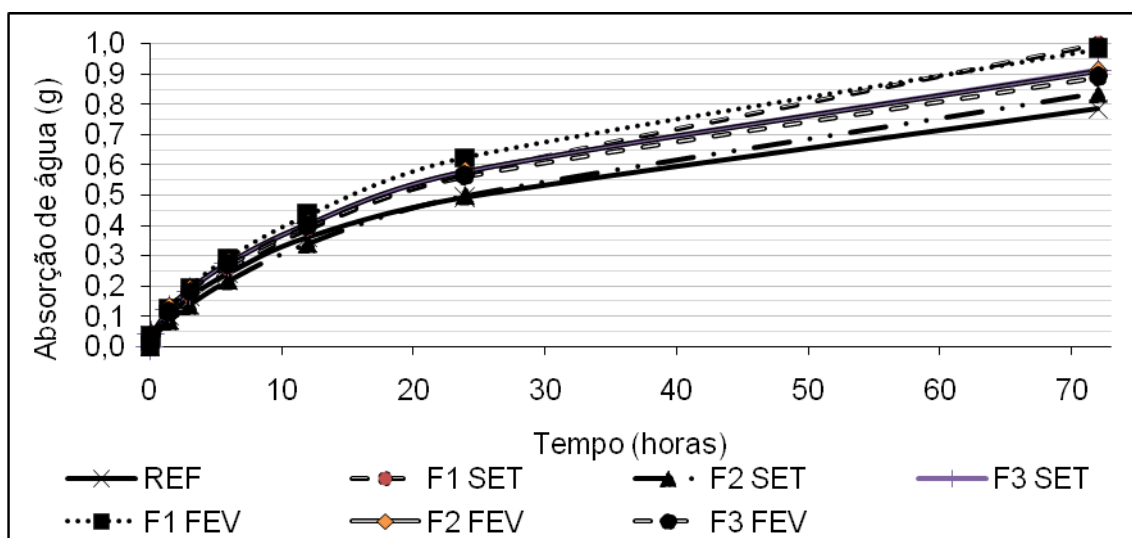


Figura 5.19 – Resultado ensaio Absorção por Capilaridade.

Analisando os resultados do coeficiente de capilaridade obtidos pelo ensaio de absorção de água por capilaridade, verifica-se que apresentaram valores similares ao traço referência, porém o F2 fev apresentou 38% de variação e F1 fev apresentou 31% em relação referência. Gonçalves (2000) em sua pesquisa com resíduos do corte de granito, como adição mineral em concreto, apresenta que com a movimentação da água pelos capilares, deixado pelos resíduos, há uma contribuição no refinamento da estrutura dos poros, criando caminhos preferenciais para a água o que favorece a absorção por sucção capilar. Conforme Andrade e Tutikian (2011) as adições minerais podem ter um efeito físico e contribuir no aumento de densidade do concreto, em função do preenchimento dos vazios pelas partículas dessas adições, por normalmente apresentarem elevada finura, e causam um refinando na estrutura dos poros.

Segundo Coutinho (1994 *apud* Gonçalves, 2000), uma elevada percentagem de finos, sem atividade química, favorece o aumento da absorção capilar, o que pode ter contribuído para os resultados obtidos neste ensaio.

5.4.6 Resistividade elétrica

Os resultados para o ensaio de resistividade elétrica encontram-se apresentados na Tabela 5.20 e na Figura 5.20. com Erro e Desvio Padrão.

Estes resultados obtidos pelas amostras com e sem resíduos, demonstram valores muito próximos, não sendo significativa a variação em relação ao traço referência e entre si. O valor da resistividade média para o traço referência foi de 50,85 Ωm , o resultado máximo para as amostras com resíduos foi de 58,44 Ωm e o resultado mínimo foi de 49,85 Ωm , isto indica que a substituição do cimento em 20% por resíduos não alterou a resistividade elétrica. Metha e Monteiro (2008) apresentam que a resistividade é um parâmetro importante na avaliação da corrosão de estrutura de concreto armado pois a corrosão de armadura do concreto é geralmente decorrente da alcalinidade (carbonatação), da lixiviação dos álcalis ou presença dos íons cloretos em quantidade significativa. Conforme Whiting e Nagi (2003), a faixa de corrosão muito alta corresponde a resistividades menores que 5 $\text{k}\Omega\text{.cm}$, a faixa de corrosão alta é de 5 a 10 $\text{K}\Omega\text{.cm}$, a faixa de corrosão moderada a baixa é de 10 a 20 $\text{K}\Omega\text{.cm}$ e a baixa faixa de corrosão é acima de 20 $\text{k}\Omega\text{.cm}$.

Tabela 5.20 - Resistividade elétrica

Amostra	CP	Rshunt (Ω)	V1 (V)	V2 (V)	R (Ω)	ρ (Ω m)	Media (Ω m)	Media (Ω m)	Desvio Padrão	Erro
Ref	1	216,95	7,85	1,120	1303,64	51,19	50,16	50,85	0,97	0,98
		2173,00	7,98	4,990	1302,06	51,13				
		21790,00	8,07	7,640	1226,40	48,16				
	2	216,95	7,84	1,140	1275,06	50,07	51,54			
		2173,00	7,98	5,010	1288,19	50,59				
		21790,00	8,09	7,610	1374,40	53,97				
F1 set	1	216,95	7,82	0,993	1491,56	58,57	57,25	58,44	1,69	1,69
		2173,00	7,95	4,620	1566,25	61,51				
		21790,00	8,08	7,620	1315,41	51,66				
	2	216,95	7,81	0,994	1487,66	58,42	59,63			
		2173,00	7,96	4,580	1603,66	62,98				
		21790,00	8,10	7,590	1464,15	57,50				
F2 set	1	216,95	7,85	1,040	1420,61	55,79	52,85	53,21	1,69	1,69
		2173,00	7,97	4,700	1511,85	59,37				
		21790,00	8,08	7,690	1105,08	43,40				
	2	216,95	7,86	1,080	1361,96	53,48	53,57			
		2173,00	7,97	4,710	1504,03	59,06				
		21790,00	8,07	7,640	1226,40	48,16				
F3 set	1	216,95	7,90	1,240	1165,23	45,76	49,89	50,30	0,58	0,58
		2173,00	7,98	4,780	1454,73	57,13				
		21790,00	8,10	7,680	1191,64	46,80				
	2	216,95	7,88	1,220	1184,33	46,51	50,72			
		2173,00	7,96	4,750	1468,49	57,67				
		21790,00	8,10	7,670	1221,60	47,97				
F1 fev	1	216,95	7,88	1,300	1098,10	43,12	49,92	50,37	0,64	0,64
		2173,00	7,98	4,770	1462,33	57,43				
		21790,00	8,09	7,650	1253,28	49,22				
	2	216,95	7,86	1,290	1104,93	43,39	50,83			
		2173,00	7,97	4,720	1496,24	58,76				
		21790,00	8,10	7,650	1281,76	50,33				
F2 fev	1	216,95	7,85	1,280	1113,56	43,73	49,97	49,85	0,08	0,08
		2173,00	7,96	4,730	1483,89	58,27				
		21790,00	8,11	7,680	1220,01	47,91				
	2	216,95	7,85	1,260	1134,68	44,56	49,85			
		2173,00	7,97	4,740	1480,76	58,15				
		21790,00	8,09	7,670	1193,19	46,86				
F3 fev	1	216,95	7,88	1,250	1150,70	45,19	49,47	50,60	1,60	1,60
		2173,00	7,99	4,770	1466,89	57,60				
		21790,00	8,10	7,690	1161,76	45,62				
	2	216,95	7,87	1,240	1159,98	45,55	51,74			
		2173,00	7,99	4,750	1482,21	58,21				
		21790,00	8,11	7,650	1310,25	51,45				

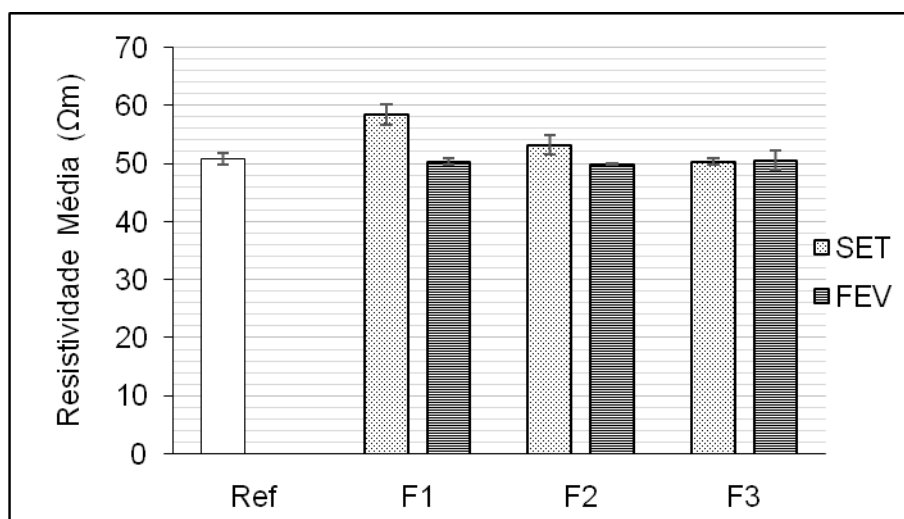


Figura 5.20 – Resultados ensaio de resistividade.

Hoppe (2005) ressalta a alta sensibilidade da resistividade aos diversos fatores intrínsecos como relação água/aglomerante, consumo e tipo de cimento, o agregado e adições minerais e aditivos, pois os mesmos promovem alterações no tamanho e distribuição dos poros, teor de umidade interna, pH, entre outras (LUBECK, 2008). Está relacionada, também, aos íons presentes na solução aquosa dos poros, sua concentração e mobilidade. A composição química e teor de cimento, relação água/aglomerante, presença de adições minerais, ativadores químicos e aditivos também influenciam a resistividade através de alterações na microestrutura da pasta e água dos poros. Pelos resultados obtidos no ensaio nas amostras com e sem resíduos pode-se inferir que a presença do CH através do Ca(OH)_2 nas amostras com resíduos e sem resíduos podem estar em concentrações muito próximas, conforme observado pelos resultado da termogravimetria.

Conforme Rosa (2005) a substituição de parte do cimento por adições minerais implica em consumo parcial do CH (Hidróxido de Cálcio) para formação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), diminuindo assim a concentração do OH (íon hidroxila), isto reduz a condutividade elétrica específica em concreto contendo adição mineral, quando comparado a concreto sem adição. McCarte *et al.* (1981

apud KARHUNER, 2010) apresentam que pode ocorrer uma variação na resistividade de 15 Ω m a 35 Ω m para um concreto com idade de 0 a 120 dias.

Hope e Ip (1987 *apud* LUBECK, 2008) avaliaram a resistividade elétrica de cimento Portland e escória de alto forno, observando um aumento na resistividade, o que foi atribuído pelos autores a uma maior compacidade da estrutura de poros, e menor alcalinidade em relação a uma pasta de cimento Portland puro. Segundo Santos (2006) a variação da resistividade no concreto com o tempo está relacionada à hidratação da pasta de cimento. Durante o processo de hidratação do cimento os compostos formados passam a preencher, de forma progressiva, parte dos vazios inicialmente ocupados pelo eletrólito, alterando a estrutura de poros da pasta. Taylor e Arulanadan (1974 *apud* SANTOS, 2006) abordam que este efeito de preenchimento, provocado pelos produtos de hidratação do cimento, diminui a conectividade dos capilares.

5.4.7 Carbonatação acelerada

Os resultados obtidos no ensaio de carbonatação acelerada encontram-se apresentados na Tabela 5.21 e na Figura 5.21, quando se pode perceber a frente de carbonatação apresentada pelas amostras com resíduos e sem resíduos.

Pelos resultados obtidos pode perceber uma frente de carbonatação mais acentuada nas amostras com resíduos, o que pode ser atribuído ao fato destas amostras conterem menos cimento pela substituição do mesmo. Esses resultados corroboram com os resultados encontrados para o ensaio de absorção por capilaridade. Conforme Neville e Brooks (2013) a carbonatação ocorre da superfície para o interior em processo extremamente lento. A taxa real da carbonatação depende da permeabilidade do concreto, seu teor de umidade, teor de CO₂ e umidade relativa do meio ambiente. Considerando os resultados do ensaio de que avaliam a porosidade aberta e que as condições de ensaios são as mesmas os resultados poderiam estar relacionados ao teor de cimento. Conforme Carasek e Cascudo (2011) geralmente quanto maior o teor de adição empregado,

maior a profundidade carbonatada, segundo os autores o fato é explicado pela queda da reserva alcalina mediante redução do teor de cimento.

Tabela 5.21 - Resultados ensaio.de carbonatação

Amostra	Lado A (mm)	Lado A (mm)	Média (mm)	Desv. Pad.	Erro	Lado B (mm)	Lado B (mm)	Média (mm)	Desv. Pad.	Erro
Refer. CP 1	0,32	0,26	0,39	0,13	0,08	0,4	0,3	0,48	0,26	0,28
	0,4	0,56				0,35	0,87			
Refer. CP 2	0,7	0,42	0,33	0,3	0,17	0,9	0,31	0,38	0,38	0,22
	0,21	0				0,32	0			
F 1 CP 1	1,15	1,2	1,18	0,02	0,01	1,18	1,1	1,15	0,04	0,66
	1,18	1,19				1,17	1,15			
fev	1,08	1,2	1,29	0,35	0,2	0,93	1	1,18	0,34	0,68
	1,07	1,81				1,1	1,68			
F1 CP 2	1,08	1,99	1,25	0,51	0,29	1,07	0,92	1,05	0,1	0,06
	0,84	1,1				1,09	1,15			
fev	1,2	1,7	1,28	0,28	0,16	1	0,91	1,04	0,11	0,06
	1,07	1,16				1,16	1,1			
F 2 CP 1	1,27	0,94	1,17	0,2	0,12	0,94	1,2	1,24	0,25	0,72
	1,39	1,08				1,56	1,27			
fev	0,88	1,3	1,23	0,31	0,18	1,1	1	1,13	0,26	0,65
	1,1	1,62				0,9	1,5			
F 2 CP 2	1,08	0,96	0,98	0,07	0,04	0,9	0,99	0,95	0,05	0,03
	0,98	0,91				1	0,91			
fev	0,9	1,3	1,09	0,16	0,09	0,8	1,45	1,14	0,29	0,17
	1,06	1,1				1	1,3			
F 3 CP 1	0,78	0,65	0,84	0,22	0,13	1,16	1,74	1,2	0,38	0,69
	1,15	0,76				0,98	0,9			
fev	1,14	0,9	1,1	0,14	0,08	1,1	0,83	1,02	0,16	0,59
	1,1	1,24				1,2	0,95			
F 3 CP 2	1,23	0,78	0,89	0,23	0,13	1,09	1	1	0,06	0,04
	0,8	0,76				0,96	0,95			
fev	0,8	1,12	0,98	0,16	0,09	1	1,16	1,01	0,16	0,09
	0,9	1,1				0,8	1,1			



Figura 5.21 – Resultado de amostra com e sem resíduos com propagação da frente de carbonatação.

Como o ensaio de carbonatação não é padronizado existem diferentes parâmetros para a realização do ensaio de carbonatação acelerada. Por este motivo é difícil comparar os resultados obtidos entre os diversos trabalhos publicados sobre este assunto (Pauletti, 2004). Além do mais o ensaio não foi realizado nas condições ideais de umidade, condição que pode ter dificultado a difusão do CO_2 nos poros. A velocidade da carbonatação depende do teor de umidade do concreto e da umidade relativa do ambiente NEVILLE (1997).

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para o estudo sobre a influência da heterogeneidade dos resíduos oriundos do beneficiamento à úmido de marmorarias no desempenho de compostos de cimento Portland, produzidos com a substituição em 20% do cimento Portland pelos resíduos permitem apresentar as seguintes conclusões:

- a) Os resíduos de marmoraria não apresentaram atividade pozolânica;
- b) Os resíduos de marmoraria provavelmente agem como filler, quando utilizados em substituição a 20% ao cimento;
- c) O uso dos resíduos oriundos do beneficiamento à úmido das marmorarias em substituição ao cimento parece não afetar:
 - Tempo de pega;
 - Temperatura das reações de hidratação;
 - Expansibilidade;
 - Fluidez quanto a trabalhabilidade;
 - Esforço mecânico quanto à resistência a tração na flexão;
 - Módulo de elasticidade dinâmico;
 - Porosidade aberta;
 - Absorção de água por capilaridade;
 - Resistividade elétrica;
- d) O uso dos resíduos oriundos do beneficiamento à úmido das marmorarias em substituição 20% ao cimento torna mais susceptível ao efeito da carbonatação;
- e) O uso dos resíduos oriundos do beneficiamento à úmido das marmorarias em substituição 20% ao cimento torna menos resistente ao esforço mecânico de compressão axial.

Sugestões de trabalhos futuros

- a) Estudo da composição química dos resíduos oriundos do beneficiamento à úmido das marmorarias;

- b) Estudo da microestrutura das pastas fabricadas com resíduos oriundos do beneficiamento à úmido das marmorarias;
- c) Avaliação de reação álcalis-agregado dos resíduos oriundos do beneficiamento à úmido das marmorarias.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALARCON-RUIZ, L. *et al.* The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 609-613, 2005.

ALIABDO A.A., ELMOATY A.M., AUDA E. M. *Re-Use of Waste Marble Dust in the Production of Cement and Concrete* In *Construction and Building Materials* 2014 n° 50 p. 28–41

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS – ABIRROCHAS. *Abirrochas em notícias - Boletim Informativo Ano1n°1, janeiro/março de 2015*. Disponível em <[http:// www.abirochas.com.br](http://www.abirochas.com.br)> Acesso em 19 marc. 2015

ALLAM, M.E., BAKHOUM, E. S., GARAS, G.L. *Re-Use of Granite Sludge in Producing Green Concrete* In: *Arpn Journal of Engineering and Applied Sciences* v.9 n° 12, dez/ 2014

ALBUQUERQUE, A. S. Agregados. In: *Materiais de Construção Bauer, L.A.F.* 5ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2009 v.1 p.63-120

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.

ANDRADE J. J. O. Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais. In: *IBRACON Matérias de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2ª ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2010 v.1 p. 207 – 239.

ANDRADE J.J.; TUTIKIAN B.F. Resistência Mecânica do Concreto In: *Concreto: Ciência e Tecnologia* 1ª ed. São Paulo: G.C. Isaia., 2011 v.1 p. 626, 627

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos*. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água*. Rio de Janeiro, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado*. Rio de Janeiro, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido*. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15258: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração*. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade*. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia*. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11582: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier*. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12989: Cimento Portland branco – Especificação*. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5732: Cimento Portland comum*. Rio de Janeiro, 1991.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15577-1: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto*. Rio de Janeiro, 2008

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11578: Cimento Portland composto – Especificação*. Rio de Janeiro, 1997

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos*. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias*. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 65: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega*. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 43: Cimento Portland – determinação da pasta de consistência normal*. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778: Argamassa e Concreto Encurecido – Determinação da Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778: Argamassa e Concreto Encurecido – Determinação da Absorção por Capilaridade*. Rio de Janeiro, 2012.

BARROS, P.G.S., Avaliação das Propriedades de Durabilidade do Concreto Auto-Adensável Obtido com Resíduo de Corte de Mármore e Granito, Dissertação em Mestrado, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

BARROSO, L.F.S *Avaliação da Resistividade Elétrica de Concretos com Adição de Metacaulim*, Curso de Graduação, Universidade da Amazônia, Belém, 2013

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN I. L. S. O Cimento Portland no Brasil In: *IBRACON Matérias de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2ª ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2010 v.1 p. 778 -781

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland In: *Concreto: Ciência e Tecnologia* 1ª ed. São Paulo: G.C. Isaia., 2011 v.1 p. 216.

BENINI, H.; SANDBERG P. *O Uso da Calorimetria como uma Técnica de Controle Tecnológico de Materiais* In: *IBRACON Concreto e Construções*. 51º ed São Paulo: 2008 v. 22 p 39-40

BIANCHINI, M. *Análise da Influência dos teores de Sílica Ativa na produção de Concretos de Alta Resistência em Central Dosadora de Concreto*. Dissertação Mestrado Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

BRAGA F. S.; BUZZI D. C.; COUTO M. C. L.; LANGE L. C. *Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais*. In: *Engenharia Sanitária Ambiental*, V.15 n.3. Rio de Janeiro jul/set 2010 p. 237-244.

CALLISTER, W. D., RETHWISCH , D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais*, 8ª ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2012.

CALMON, J. L.; VIEIRA G.L.; BASTOS, R. S.; ULIANA J. G.; DEGEN M. K.; *Concretos produzidos com resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial ao cimento* In: *Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto*, outubro de 2013.

CARASEK, H. Argamassas In: *IBRACON Matérias de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 1ª ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2007 v.2 p. 863 - 904

CARRIJO, P. M. *Análise da Influência da Massa Específica de Agregados Graúdos Provenientes de Resíduos de Construção e Demolição no Desempenho Mecânico do Concreto*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CASCUDO, O.; CARASEK H.; HASPARYK, N. P. Microestrutura dos Materiais Cerâmicos. In: *IBRACON Matérias de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2ª ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2010 v.1 p. 326 - 353

CASCUDO, O.; CARASEK H.; *Ação da Carbonatação no Concreto* In: *Concreto: Ciência e Tecnologia* 1ª ed. São Paulo: G.C. Isaia., 2011 v.1 p. 850, 851, 875.

CASCUDO, O. Estrutura Atômica e Molecular dos Materiais. In: *IBRACON Matérias de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2ª ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2010 v.1 p. 169, 172.

CEUKELAIRE, L.; NIEUWENBURG, V. Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 23, p. 442-452, 1993.

CHIODI, F. C. Aspectos de Interesse Sobre Rochas Ornamentais e de Revestimento: Identificação, Especificação e Utilização, 2002 In: *ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais*. Disponível em <<http://www.abirochas.com.br>> Acesso em: 01 set. 2014.

COURA, V. G. *Análise Experimental sobre a Substituição do Agregado Miúdo por Mármore Triturado na Confecção de Concreto*. Tese Doutorado Universidade Federal Fluminense, Niterói: 2009.

DESCHAMPS, E., MAIA J. B., COSTA C. S., SANTOS, M. G. V., KELLER, W. S., CARVALHO FILHO, C. A., DAMASCENO, M. A. P., PINTO, C. L. L. Controle Ambiental na Mineração de Quartzito Pedra São Tomé. In: *Projeto Minas Ambiente*. Belo Horizonte: Editora Segrac Editora e Gráfica Limitada, 2002. 63, 70 p.

DONATELLO, S; TYRER, M; CHEESEMAN, C.R. *Comparison of test methods to assess pozzolanic activity*. *Cement & Concrete Composites* v 32. p. 121-127, 2010.

DWECK, J. *et al. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate*. *Thermochimica Acta*, v. 346, p. 105-113, 2000.

FERREIRA, R. T. L. *Influência da requeima na pozolanicidade de cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar de Diferentes Características*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015

FRASCÁ, M. H. B. O. Rocha como Material de Construção. In: *IBRACON Matérias de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2ª ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2010 v.1 p. 439 – 480.

GONÇALVES, J. P. *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos*. Dissertação Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000.

HOPPE, T.F. *Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz*. 2005. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005

ISAIA, G.C. A Água no Concreto. In: *Concreto: Ciência e Tecnologia* 1ª ed. São Paulo: G.C. Isaia., 2011 v.1 p. 326

ISAIA, G.C., GUERRA A.L.; MEIRA, L.; DUART M.; ZERBINO R. *Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura*, In *Ambiente Construído*, v. 10 p 121-137, jan/mar. Porto Alegre, 2010

IONASHIRO, M. G., *Fundamentos de transferência de calor e de massa* 6^aed. Rio de Janeiro: LTC, 2008 p.643

KARHUNEN, K.; SEPPANEN A.; LEHIKONEN A.; MONTEIRO P. J. M. Electrical Resistance Tomography imaging of concrete In: *Cemente and Concrete Research* 40 p.137-145, 2010 Disponível em <http://ees.elsevier.com/CEMCON/default.asp>

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.

KITAMURA S. *Estudo Experimental Sobre a Influência da Substituição do Agregado Miúdo Natural Por Granito Triturado Nas Propriedades do Concreto de Cimento Portland* Tese de Doutorado – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.

KNOPF, F.C. *et al. High-Pressure Molding and Carbonation of Cementitious Materials*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 38, n.7, p. 2641-49, 1999.

LANGAN, B.W.; WENG, K.; WARD, M.A. *Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland Cement*. *Cement and Concrete Research*, v. 32, 2002

LUBECK, A. *Resistividade elétrica de concreto de Cimento Portland Branco e elevados teores de teores de escória de alto forno*. 2008. Dissertação Mestrado Universidade Federal Santa Maria, Santa Maria 2008.

MAIA, C. M.; HEDER, M. *Rochas Ornamentais e de Revestimento*. 2013. Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/EconomiaMineral/SumarioMineral2013/RochasOrnamentaisedeRevestimento>> Acesso em: 10 jul. 2014.

MELO, L. S. C. *Gestão Ambiental de Resíduos Sólidos Gerados em Empresas de Beneficiamento de Rochas Ornamentais*. Monografia na Especialização em Tecnologia Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2009. p.59

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto Microestrutura, Propriedades, e Materiais* 3^a ed. São Paulo: Pini. 2008 p. 259-287

MOLIN, D. C. C. *Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssilica*. São Paulo, 1995. Tese Doutorado em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MOLIN, D. C. C. D. Técnicas Experimentais para Estudo da Microestrutura In: *IBRACON Matérias de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2^a ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2010 v.1 p. 411 - 415

MOLIN, D. C. C. D. Adições Mineraias In: *Concreto: Ciência e Tecnologia* 1^a ed. São Paulo: G.C. Isaia., 2011 v.1 p. 261 - 263, 284, 291, 292, 294.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. S. Utilização do Resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajota para piso. *Sitientibus*. Feira de Santana. n. 26 p 49-61 jan/jun 2002

MOURA, W. A.; LEITE, M.B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. *Escola de Minas*. Ouro Preto, v. 64, n. 2, p. 147-154, abr/jun 2011.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto* 2ª ed São Paulo: Pini 1997 p. 125-187.

NEVILLE, A. M.; BROOKS J. J. *Tecnologia do Concreto* 2ª ed. Porto Alegre: Bookman 2013 p. 2, 12 – 22, 63, 78 – 80, 88, 157 - 158, 235 – 236, 268 - 269.

NOBREGA A.K.C.; AS, 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

PARROT, L.J. *A review of carbonation in reinforced concrete*. C&CA – Cement and concrete association, 1987. 42 p

PAULETTI, C. *Análise Comparativa de Procedimentos para Ensaios Acelerados de Carbonatação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A. P. Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido In: *Concreto: Ciência e Tecnologia* 1ª ed. São Paulo: G.C. Isaia., 2011 v.1 p. 585- 602.

PAYA, J. *et al. Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue (FC3R), Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes*. *Cement Concrete Research*, v. 33, p. 603-609, 2003.

PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de Cimento Portland*, 11ª ed. Rio de Janeiro, Globo, 1987, p. 38-72; 252-253.

PETRUCCI, E. G. R. *Materiais de Construção*, 12ª ed. São Paulo: Globo, 2007, p. 262-290.

QUEIROZ, F.C.; FRASCÁ, M. H. B. O. Estudo para o aproveitamento de resíduos pétreos de marmorarias, como agregados para concreto de cimento Portland. *Exacta*. São Paulo, v. 6, n. 1, p. 83-92, jan./jun. 2008.

RAVERDY, M. *et al* Appreciation de l' actvite pouzzolanique dos constituents secondaires. In: 7th International Congresso on the Chemistry of cement, Paris, 1980, v.3,p36-41. Anais...1980

RECENA, A. P.; PEREIRA F.M. Produção e Controle de Concreto em Obras In: *Concreto: Ciência e Tecnologia* 1^a ed. São Paulo: G.C. Isaia., 2011 v.1 p. 547-548.

RELATÓRIO TÉCNICO 33 *Perfil de Rochas Ornamentais e de Revestimento - Ministério de Minas e Energia, Julho de 2009*. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_mineracao_brasileira/P23_RT33_Perfil_de_Rochas_Ornamentais_e_de_Revestimento.pdf>. Acesso em 20 abr. 2015

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

ROMANO, R. C. O.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI R. G. Propriedades do Concreto no Estado Fresco In: *Concreto: Ciência e Tecnologia* 1^a ed. São Paulo: G.C. Isaia., 2011 v.1 p. 456.

ROSA, D.W. *Resistividade elétrica de concreto com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico*. 2005. Dissertação Mestrado Universidade Federal Santa Maria, Santa Maria 2005.

RUBIO, M.C.; MENENDEZ A.; MORENO F.; BELMONTE A.; RAMIREZ A. *Mechanical Properties of Hot Bituminous Mixes Manufactured With Recycled Aggregate of Silestone Waste*. *Materiales de Construcción* v 61, 301, p 49-60, 2011

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

SALES, F. A. *Estudo da Atividade Pozolânica de Micropartículas de Vidro Soda-cal, Incolor e Âmbar, e sua Influência no Desempenho de Compostos de Cimento Portland*, Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2014.

SANTOS, M. M. A.; DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. In: *Matéria*. Rio de Janeiro v. 18, n. 4, out./dez. 2013.

SANTOS, S. B.; BITTENCOURT, R. M.; GRAÇA, N. G. Efeitos da Temperatura sobre o Concreto In: *Concreto: Ciência e Tecnologia* 1^a ed. São Paulo: G.C. Isaia., 2011 v.1 p. 708.

SANTOS, W. J. Argamassa de Alto Desempenho; Tese de Mestrado Universidade Federal de Juiz de Fora; Juiz de Fora, 2011.

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 de Mestrado Universidade de Brasília; Brasília, 2006

SHEHATA, L. C. D. Propriedades Elasto-Plásticas do Concreto In: *Concreto: Ciência e Tecnologia* 1ª ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2011. v.1 p. 653 – 671.

SILVA, N. G. *Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária*. 2006. 164f. Dissertação Mestrado Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006

SILVA, M. G. Cimento Portland com Adições Minerai In: *IBRACON Matérias de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2ª ed. São Paulo: G.C.Isaia, 2010 v.1 p. 809

SOUZA, C. A. *Utilização de Resíduo de Concreto como Agregado Miúdo para Argamassa de Concretos Estruturais Convencionais*; Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Minas Gerais; Belo Horizonte, 2006.

SUN, J.K.; CHO,S.W.; YANG,C.C.; HUANG,R.. *Effect of Sand Ratio on the Elastic Modulus of Self-Compacting Concrete*. *Journal of Marine Science and Thechnology*, vol. 10 n^o 1, p 8-13, 2002.

TEIXERA, S. M. F. *Determinação da Influência do Aditivo Superplastificante no Desempenho de um Concreto Estrutural Autoadensável de Resistência de 40 MPa* Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 2014.

WHITING, D.A.; NAGI, M.A. *Electrical resistivity of concrete: A literature review*. R&D Serial n. 2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003.

8 ANEXO A – MASSA ESPECÍFICA

Massa Específica dos Grãos - Ficha 1 set				
Início ensaio : 23/02/2015 - Término ensaio 26/02/2015				
Determinação no Bequer		2	3	4
Picnômetro no		30	33	36
$M_2 = M_{pic+s+w}$	(g)	712,6	730,4	715,2
T= Temperatura	(°C)	30,5	31,0	31,0
$M_1 = M_{pic+w}$ a T°C	(g)	680,93	698,14	683,93
ρ_w a T°C	(g/cm ³)	0,9955	0,9954	0,9954
Mrecipiente+solo	(g)	164,44	156,2	156,83
Mrecipiente	(g)	114,66	105,73	107,14
Ms	(g)	49,78	50,47	46,69
Massa espec dos grãos (ρ_s)	(g/cm ³)	2,74	2,76	2,69
utilizar valor na média		s	s	n
ρ_s (para compor a média)	(g/cm ³)	2,74	2,76	ñ utilizado
Massa espec média (ρ_{smed})	(g/cm ³)		2,75	

Massa Específica dos Grãos - Ficha 1 fev				
Início ensaio : 23/02/2015 - Término ensaio : 26/02/2015				
Determinação n° Bequer		2	3	4
Picnômetro n°		30	33	36
$M_2 = M_{pic+s+w}$	(g)	713,17	730,16	716,17
T= Temperatura	(°C)	28	29	29,5
$M_1 = M_{pic+w}$ a T°C	(g)	681,29	698,42	684,15
ρ_w a T°C	(g/cm ³)	0,9963	0,996	0,9958
$M_{recipiente+solo}$	(g)	161,4	154,15	156,8
$M_{recipiente}$	(g)	111,79	104,72	107,29
M_s	(g)	49,61	49,43	49,51
Massa espec dos grãos (ρ_s) (g/cm ³)		2,79	2,78	2,82
utilizar valor na média		S	S	N
ρ_s (para compor a média) (g/cm ³)		2,79	2,78	N
Massa espec média (ρ_{smed}) (g/cm ³)			2,79	

Massa Específica dos Grãos - Ficha 2 set				
Início ensaio : 06/03/2015 - Término ensaio 10/03/2015				
Determinação n° Bequer	2	3	4	6
Picnômetro n°	20	30	33	36
$M_2 = M_{\text{pic+s+w}}$ (g)	715,2	712,7	729,9	715,7
T= Temperatura (°C)	28	28	28	28
$M_1 = M_{\text{pic+w}}$ a T°C (g)	683,42	681,29	698,56	684,35
ρ_w a T°C (g/cm ³)	0,9963	0,9963	0,9963	0,9963
$M_{\text{recipiente+solo}}$ (g)	164,7	160,77	153,17	157,25
$M_{\text{recipiente}}$ (g)	114,73	110,79	103,56	107,4
M_s (g)	49,97	49,98	49,61	49,85
Massa espec dos grãos (ρ_s) (g/cm ³)	2,74	2,68	2,71	2,68
utilizar valor na média	N	S	S	S
ρ_s (para compor a média) (g/cm ³)	N	2,68	2,71	2,68
Massa espec média (ρ_{smed}) (g/cm ³)	2,69			

Massa Específica dos Grãos - Ficha 2 fev				
Início ensaio :11/03/2015 - Término ensaio 16/03/2015				
Determinação n° Bequer	11	12	13	
Picnômetro n°	30	33	36	
$M_2 = M_{\text{pic+s+w}}$ (g)	712,42	729,69	715,33	
T= Temperatura (°C)	28,5	28,5	28,5	
$M_1 = M_{\text{pic+w}}$ a T°C (g)	681,22	698,49	684,28	
ρ_w a T°C (g/cm ³)	0,9961	0,9961	0,9961	
$M_{\text{recipiente+solo}}$ (g)	164,14	160,75	152,65	
$M_{\text{recipiente}}$ (g)	115,19	110,79	103,29	
M_s (g)	48,95	49,96	49,36	
Massa espec dos grãos (ρ_s) (g/cm ³)	1,08	2,65	2,69	
utilizar valor na média	N	S	S	
ρ_s (para compor a média) (g/cm ³)	N	2,65	2,69	
Massa espec média (ρ_{smed}) (g/cm ³)	2,67			

Massa Específica dos Grãos - Ficha 3 set			
Início ensaio :10/03/2015 - Término ensaio 13/03/2015			
Determinação n° Bequer	2	3	4
Picnômetro n°	30	33	36
$M_2 = M_{\text{pic+s+w}}$ (g)	713,14	730,44	716,1
T= Temperatura (°C)	29	28,5	28,5
$M_1 = M_{\text{pic+w}}$ a T°C (g)	681,15	698,49	684,28
ρ_w a T°C (g/cm ³)	0,996	0,9961	0,9961
$M_{\text{recipiente+solo}}$ (g)	164,89	160,77	153,16
$M_{\text{recipiente}}$ (g)	114,95	110,86	103,72
M_s (g)	49,94	49,91	49,44
Massa espec dos grãos (ρ_s) (g/cm ³)	2,77	2,77	2,79
utilizar valor na média	S	S	S
ρ_s (para compor a média) (g/cm ³)	2,77	2,77	2,79
Massa espec média (ρ_{smed}) (g/cm ³)		2,78	

Massa Específica dos Grãos - Ficha 3 fev			
Início ensaio : 23/04/2015 - Témino ensaio : 27/04/2015			
Determinação n° Bequer	5	6	13
Picnômetro n°	34	35	38
$M_2 = M_{\text{pic+s+w}}$ (g)	733,3	696,2	738,66
T= Temperatura (°C)	29,5	29	29
$M_1 = M_{\text{pic+w}}$ a T°C (g)	701,83	664,86	706,42
ρ_w a T°C (g/cm ³)	0,9958	0,996	0,996
$M_{\text{recipiente+solo}}$ (g)	151,65	160,48	164,96
$M_{\text{recipiente}}$ (g)	101,79	110,77	114,91
M_s (g)	49,86	49,71	50,05
Massa espec dos grãos (ρ_s) (g/cm ³)	2,7	2,7	2,8
utilizar valor na média	S	S	N
ρ_s (para compor a média) (g/cm ³)	2,7	2,7	N
Massa espec média (ρ_{smed}) (g/cm ³)		2,7	