UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VANESSA YUMI SATO

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO REOLÓGICO DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Vitória – ES
2015

VANESSA YUMI SATO

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO REOLÓGICO DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientadora: Prof[a]. Ph.D Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira

Vitória – ES

2015

À minha mãe Sara e irmão Luiz Felipe

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu Deus por me fortalecer, me ajudar e me suster com sua mão de justiça.

À minha orientadora Jamilla, obrigada por me ajudar tanto, por ter sido uma ótima orientadora e mesmo de licença e à distância, esteve sempre pronta a responder meus e-mails. Sua paciência e firmeza foram essenciais para a finalização desse trabalho. Sem contar com os puxões de orelha! Rs. Muito obrigada por mais uma vez ter o privilégio de ser sua orientanda.

Ao professor Avancini, que desde a graduação acreditou e apostou em mim para fazer uma pesquisa tão inovadora. Obrigada por sua atenção, pelas inúmeras contribuições e conhecimento compartilhado. Saudades!

Agradeço à professora Geilma por orientar nossa equipe de pesquisa "Grupo da Lama", sua atenção e incentivo foram muito importantes para a continuação da pesquisa.

Aos professores Geórgia Serafim Araújo e João Luiz Calmon por prontamente aceitarem o convite em participar da banca examinadora da minha defesa de mestrado.

Aos técnicos e servidores do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC) da UFES, obrigada pelo carinho e apoio. Em especial ao amigo Henrique por sempre me socorrer quando precisei, principalmente quando o equipamento parava de funcionar.

Aos colaboradores do Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais (LCSM) do Centro Tecnológico da UFES, do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Metodologias para Análises de Petróleos (LabPetro) do CCE da UFES e do Laboratório Químico e de Monitoramento Ambiental da empresa Vale, que contribuíram na realização de ensaios para caracterização dos materiais.

Agradeço aos professores, colaboradores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES (PPGEC-UFES), pelo conhecimento transmitido e disposição em ajudar.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pela infraestrutura disponibilizada.

Agradeço ao Group Vitoria Stone por gentilmente abrir as portas da serraria para aprender

sobre o processo do beneficiamento de rochas ornamentais e disponibilizar o resíduo utilizado no trabalho.

À empresa Holcim por fornecer o cimento necessário para os experimentos e contribuir para a realização da pesquisa.

Aos meus queridos amigos do mestrado e iniciação científica: Yustane, Rubielly, Juliana, Sandra, Soraia, Ricardo, Maxwell e Julia, agradeço por fazerem parte da minha vida, por dividirmos momentos tão especiais, estressantes e divertidos também. Vocês são demais! Agradeço em especial à minha amiga fiel Yustane, pelo companheirismo durante todo o mestrado.

Agradeço aos amigos da faculdade, Larissa, Janaina, Karen, Vitor e Felipe, pela amizade e motivação que sempre me deram. Quero tê-los como amigos por toda a vida.

Aos meus amigos do Ministério Vitória & Louvor, agradeço por me amarem, orarem por mim, me motivarem e torcerem por mim para finalização dessa pesquisa. Obrigada por tornarem a minha jornada mais leve.

Agradeço a minha mãe Sara por ser meu porto seguro e ao meu irmão Luiz Felipe por ser meu herói. Obrigada por me amarem incondicionalmente e sempre me apoiarem nas minhas decisões.

Ao meu namorado, amigo, confidente e companheiro Filipe Cardozo por sempre me incentivar e acreditar em mim. Seu amor e carinho foram essenciais.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos pelas orações e torcida!

E a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a finalização dessa jornada.

“Porque o Senhor dá a sabedoria, e da sua boca vem o conhecimento e o entendimento. Ele reserva a verdadeira sabedoria para os retos; escudo é para os que caminham na sinceridade, para que guarde as veredas do juízo e conserve o caminho dos seus santos. Então, entenderás justiça, e juízo, e equidade, e todas as boas veredas. Porquanto a sabedoria entrará no teu coração, e o conhecimento será suave à tua alma. O bom siso te guardará, e a inteligência te conservará.”

Provérbios 2:6-11

RESUMO

SATO, Vanessa Yumi. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO REOLÓGICO DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS.** 2015. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

O Brasil é hoje um dos grandes produtores e exportadores mundiais no setor de rochas ornamentais. Em contrapartida, a produção e o beneficiamento de rochas ornamentais resultam em grande volume de material não aproveitado em forma de lama, geralmente descartado de maneira inadequada em lagoas de decantação ou aterros. Diversas pesquisas têm sido realizadas objetivando o reaproveitamento deste material em matrizes cimentícias. No campo da reologia, ainda são incipientes estudos nacionais que utilizem os parâmetros reológicos obtidos experimentalmente para determinar o comportamento de matrizes cimentícias à base de cimento Portland. Contudo, o objetivo desse trabalho é caracterizar reologicamente o comportamento de pastas cimentícias com e sem adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) em sua condição natural. Foram fabricadas pastas cimentícias com três relações a/c (0,45; 0,55; 0,65) e quatro teores de adição do resíduo (0%, 5%, 10%, 15%) e submetidas ao ensaio de fluxo e ao ensaio oscilatório (varredura de deformação). Em testes para caracterização do resíduo, o RBRO se apresentou como um material de finura e massa específica próximas do cimento, possuindo baixa atividade reativa, indicando que o resíduo pode ser utilizado como adição mineral inerte na matriz cimentícia. Já em ensaios de caracterização reológica das pastas estudadas, observou-se nos ensaios de fluxo que as amostras se comportaram como um fluido não newtoniano, pseudoplástico e tixotrópico. Com relação ao ensaio oscilatório, as pastas cimentícias de referência e as com adição de 5% de RBRO apresentaram uma deformação crítica muito próxima independentemente da relação a/c, mostrando uma tendência de suportar maiores deformações. Percebeu-se também que há uma tendência de correlação negativa tanto entre a resistência à compressão e o módulo elástico G' quanto entre a consistência e a tensão de escoamento das amostras. Isso confirma que o resíduo se comportou como um fíler, tornando a pasta cimentícia mais viscosa e com menor trabalhabilidade, pois preenche os vazios intergranulares na matriz. Portanto, pode-se concluir que existe potencial para utilização de RBRO em matrizes cimentícias, proporcionando um destino mais nobre ao material.

Palavra-chave: resíduos sólidos, lama, rochas ornamentais, pasta de cimento, consistência, trabalhabilidade, reologia.

ABSTRACT

SATO, Vanessa Yumi. **CONTRIBUTION TO THE RHEOLOGICAL STUDY OF CEMENT PASTES WITH ADITION OF THE ORNAMENTAL STONES WASTE.** 2015. 108p. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2015.

Brazil is one of the major producers and exporters in the ornamental stone sector. In contrast, the production and processing of ornamental stones result in large volumes of waste material in a form of slurry, generally disposed in settling ponds or landfills inappropriatedly. Many researches are being conducted aiming the reuse of this waste material in cementitious matrices. In the rheology field, there are still few national studies that use rheological parameters to determine the behavior of Portland cement based cementitous matrices. Thus, the goal of the present work is to characterize rheologically the behavior of cement pastes with and without addition of ornamental stone waste in its natural condition. Cement pastes were produced with three water-to-cement ratio (0.45; 0.55; 0.65) and four percentages of residue (0%, 5%, 10%, 15%) and subjected to flow and oscillatory (strain sweep) tests. The testing results for the waste material characterization, RBRO presented with a fineness and material density close to the cement, having low reactive activity, indicating that the residue can be used as an inert mineral addition in cement matrix. In the rheological characterization of the studied cement pastes, it was observed that the samples behaved as a non-Newtonian fluid, pseudoplastic and thixotropic. With respect to the oscillatory testing results, the cementitious pastes without residue addition and with the addition of 5% RBRO had similar critical deformation regardless the analyzed w/c ratio, showing a tendency to support greater deformation. It is also realized that there is a negative correlation between the trend obtained in both compression resistance and elastic modulus G 'and between the consistency and yield strength of the samples. This confirms that the residue behaved like a filler, making the cement paste more viscous and decreasing its workability, since it fills the inter-granular voids in the matrix. Therefore, it can be concluded that there is a potential to the use of the ornamental stone waste material in cement matrices, giving a better destination to this waste.

Keywords: solid wastes, slurry, ornamental rocks, cementitious paste, consistency, workability, rheology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Tipo de teares utilizados para o desdobramento de blocos em chapas 28
Figura 2.2 – Detalhe da aspersão da polpa abrasiva sobre o bloco durante o corte em um tear tradicional 29
Figura 2.3 – Tanque de sedimentação 29
Figura 2.4 – Filtro prensa 30
Figura 2.5 – Perfil da curva de evolução da hidratação de um cimento Portland típico 37
Figura 2.6 – Modelo de Newton para definição do conceito de viscosidade 41
Figura 2.7 – Curvas que descrevem o comportamento reológico dos fluidos 42
Figura 2.8 – Representação esquemática dos comportamentos tixotrópico e reopéxico 43
Figura 2.9 – Modelos de reômetro 46
Figura 2.10 – Tipos de geometrias de reômetros comumente utilizadas 47
Figura 2.11 – Diagrama esquemático de geometrias para reômetros rotacionais 48
Figura 2.12 – Gráfico de Tensão de cisalhamento vs. Taxa de cisalhamento 50
Figura 2.13 – Rampa de 0 a 100 s^{-1} em 2 minutos e até 0 s^{-1} em mais 2 minutos 50
Figura 2.14 – Ensaio de varredura de deformação variando-se a amplitude de 10^{-5} a 10^{-1} com frequência constante 52
Figura 2.15 – Componente elástico (G') em função da amplitude de deformação obtida a partir do ensaio de varredura de deformação 52
Figura 3.1 – Etapas do Programa Experimental 58
Figura 3.2 - Distribuição Granulométrica do cimento CP V ARI 60
Figura 3.3 – Procedimento de tratamento para preparação e utilização do resíduo 61
Figura 3.4 – Processo de secagem do resíduo 62
Figura 3.5 – Processo de destorroamento e homogeneização 63
Figura 3.6 - Amostras de RBRO em sacolas e aparência final 64
Figura 3.7 – Ensaio de massa específica do resíduo. 65
Figura 3.8 – Ensaio de difração de raios X 67
Figura 3.9 – Microscópio eletrônico de varredura 67
Figura 3.10 – Liquidificador utilizado como misturador 70
Figura 3.11 – Balança eletrônica digital 70
Figura 3.12 – Esquema do processo de mistura de 100 segundos 71
Figura 3.13 – Esquema do processo de mistura de 300 segundos 72
Figura 3.14 – Rampa de aceleração e desaceleração de 3 ciclos 72
Figura 3.15 – Gráficos de tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento das misturas de (a) 100 segundos e (b) 300 segundos 73

Figura 3.16 – Gráficos tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento dos procedimentos de mistura, variando o pré-cisalhamento 75
Figura 3.17 – Gráfico com os valores da área de histerese de cada processo de mistura 76
Figura 3.18 – Gráfico das tensões de escoamento dos processos de mistura 77
Figura 3.19 – Esquema do processo de mistura 78
Figura 3.20 – Reômetro rotacional AR 2000ex 79
Figura 3.21 – Geometria de placas paralelas com peltier e adesivo texturizado 80
Figura 4.1 – Curva de distribuição granulométrica do RBRO 83
Figura 4.2 – Difratograma de raios X do RBRO 85
Figura 4.3 – Micrografia do RBRO com pontos analisados por EDS, ampliação 1000 vezes 85
Figura 4.4 – Gráficos de tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento variando a relação água/cimento e o teor de resíduo RBRO 87
Figura 4.5 – Gráfico da área de histerese vs. teor de resíduo 89
Figura 4.6 – Gráfico da tensão de escoamento vs. teor de resíduo 89
Figura 4.7 – Gráfico da tensão de escoamento vs. relação água/cimento 90
Figura 4.8 – Gráfico do abatimento de tronco de cone vs. relação água/cimento 91
Figura 4.9 – Gráfico do tensão de escoamento vs. abatimento de tronco de cone 92
Figura 4.10 – Gráfico do componente elástico (G') em função da deformação obtida a partir do ensaio de varredura de deformação 93
Figura 4.11 – Gráfico da deformação crítica obtida em função do percentual de resíduo 94
Figura 4.12 – Gráfico do componente elástico G' versus resistência à compressão 95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais destinos das exportações brasileiras de rochas (acima de US$ 10 milhões) ... 27
Tabela 3.1 - Caracterização física do cimento CP V ARI ... 59
Tabela 3.2 – Nomenclatura das amostras ... 69
Tabela 3.3 – Processo de mistura dos materiais de 100 segundos ... 71
Tabela 3.4 – Processo de mistura dos materiais de 300 segundos ... 72
Tabela 3.5 – Área de histerese das amostras de mistura de 100 e 300 segundos ... 73
Tabela 3.6 – Processos de Mistura para teste e definição do pré-cisalhamento realizado pelo reômetro ... 74
Tabela 3.7– Área de histerese dos Processos de Mistura para teste com pré-cisalhamento diferentes realizado pelo reômetro ... 75
Tabela 3.8 – Tensão de escoamento dos processos de mistura ... 76
Tabela 3.9 – Processo de mistura dos materiais ... 77
Tabela 4.1 – Caracterização física do RBRO ... 82
Tabela 4.2 – Composição química do RBRO. ... 84
Tabela 4.3 – Resultado da análise química do EDS para o RBRO ... 86
Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de pozolanicidade do RBRO com cal e com cimento ... 86
Tabela 4.5 – Valores da área de histerese do ensaio de fluxo ... 88
Tabela 4.6 – Valores de tensão de escoamento (Pa) do ensaio de fluxo ... 89
Tabela 4.7 – Valores de abatimento de tronco de cone dos concretos realizados ... 90
Tabela 4.8 – Relação entre trabalhabilidade e grandeza de abatimento ... 91
Tabela 4.9 – Valores de abatimento de tronco de cone relacionados com a tensão de escoamento do mesmo traço ... 92
Tabela 4.10 – Valores da tensão de escoamento obtidos pelo ensaio de varredura de deformação ... 94
Tabela 4.11 – Resultados dos valores médios de resistência à compressão axial comparado com o componente elástico (G') ... 95

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Síntese das pesquisas analisadas 34
Quadro 2.2 – Principais fases anidras de um cimento Portland 36
Quadro 3.1 – Ensaios utilizados para a caracterização dos materiais 64
Quadro 3.2 – Ensaios para caracterização física do RBRO 65
Quadro 3.3 – Características do reômetro rotacional AR 2000ex 79

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: $\tau = \tau_0 + \mu\gamma$..... 41
Equação 2: $\gamma(t) = \gamma_0 \times \cos(\omega t)$ 51
Equação 3: $\tau = \tau_0 \times \cos(\omega t + \delta)$..... 51
Equação 4: $G' = \tau_0/\gamma_0 \cos \delta$..... 51
Equação 5: $G'' = \tau_0/\gamma_0$ sen δ..... 51
Equação 6: $\tau_0 = G'. \gamma_{crit}$..... 52
Equação 7: $\sigma = E. \varepsilon$..... 53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
CAA	Concreto Auto-Adensável
CCE	Centro de Ciências Exatas
CP I	Cimento Portland Comum
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DRX	Difração de raios X
DSR	*Dynamic Shear Rheometer*
EDS	Energia dispersiva de raios X
ES	Espírito Santo
FRX	Fluorescência de Raios X
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
ICDD	*International Centre for Diffraction Data*
IEMA	Instituto Estadual de Meio Ambiente e recursos hídricos
JCPDS	*Joint Committee for Power Diffraction Standards*
LCSM	Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais
LDCM	Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização e Materiais
LEMAC	Laboratório de ensaios em materiais de construção
LMC/LPT	Laboratório de Materiais Carbonosos e Plasmas Térmicos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NE	Não Estabelecido
PF	Perda ao fogo
PM	Processo de Mistura
RBRO	Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais
RI	Resíduo Insolúvel
SC	Santa Catarina
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

LISTA DE SÍMBOLOS

MPa	Mega Pascal
MgO	Óxido de magnésio
TiO_2	Dióxido de titânio
MnO_2	Dióxido de manganês
K_2O	Óxido de potássio
Na_2O	Óxido de sódio
CaO	Óxido de cálcio
SiO_2	Óxido de silício
C_3S	Silicato tricálcico
C_2S	Silicato dicálcico
Al_2O_3	Óxido de alumínio
C_3A	Aluminato tricálcico
Fe_2O_3	Óxido de ferro III
C_4AF	Ferro aluminato tetracálcico
K	Potássio
Na	Sódio
SO_4	Sulfato
Ca	Cálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
OH	Hidróxido
CH	Hidróxido de cálcio
τ	Tensão de cisalhamento
Pa	Pascal
τ_0	Tensão de escoamento
μ	Viscosidade plástica
s	segundo
γ	Taxa de cisalhamento
F	Força
V	Velocidade
A	Área
t	Tempo

γ_0	Amplitude máxima de deformação
ω	Velocidade angular
δ	Ângulo de fase
G*	Módulo complexo
G’	Componente elástico
G’’	Componente viscoso
γ_{crit}	Deformação crítica
σ	Tensão aplicada
E	Módulo de elasticidade
ε	Deformação elástica
rpm	Rotação por minuto
g	Grama
cm	Centímetro
m	Metro
kg	Quilograma
min	Minutos
μm	Micrometro
mm	Milímetro
ºC	Graus Celcius
Hz	Hertz
Al	Alumínio
Si	Silício
R^2	Coeficiente de determinação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 21

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA 23
1.2 OBJETIVOS 24
1.2.1 OBJETIVO GERAL 24
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 24
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 25

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 27

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E GERAÇÃO DO RBRO 27
2.2 ESTUDOS VOLTADOS PARA A UTILIZAÇÃO DO RBRO EM MATRIZ CIMENTÍCIA 30
2.3 CARACTERÍSTICAS DAS PASTAS CIMENTÍCIAS 35
2.3.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND 36
2.3.2 INCOMPATIBILIDADE DE MISTURAS CIMENTÍCIAS 38
2.4 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE MATERIAIS DE BASE CIMENTÍCIA 40
2.5 PRINCIPAIS REÔMETROS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE MATERIAIS 44
2.5.1 TIPOS DE REÔMETROS 47
2.5.2 REÔMETROS ROTACIONAIS 48
2.6 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE PASTAS CIMENTÍCIAS 49
2.6.1 ENSAIO DE FLUXO 49
2.6.2 ENSAIO OSCILATÓRIO DE VARREDURA DE DEFORMAÇÃO 51
2.7 INFLUÊNCIA DO TIPO MIXER E PROCEDIMENTO DE MISTURA 53

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS 57

3.1 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA 57
3.2 VARIÁVEIS DO PROBLEMA 57
3.2.1 VARIÁVEIS DEPENDENTES 57
3.2.2 VARIÁVEIS INDEPENDENTES 57
3.2.3 VARIÁVEIS DE CONTROLE 58
3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL 58
3.4 MATERIAIS 59
3.4.1 ÁGUA 59

3.4.2 CIMENTO 59
3.4.3 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS (RBRO) 61
3.5 TESTE PARA OBTENÇÃO DO PROCESSO DE MISTURA 68
3.5.1 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE MISTURA 70
3.5.2 ENSAIO DE FLUXO DE 3 CICLOS 72
3.5.3 DETERMINAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE PRÉ-CISALHAMENTO NO REÔMETRO 74
3.6 METODOLOGIA DE MISTURA PARA A FABRICAÇÃO DE PASTAS CIMENTÍCIAS 77
3.7 MÉTODOS DE ENSAIOS REOLÓGICOS 78
3.7.1 ENSAIO DE FLUXO 80
3.7.2 ENSAIO OSCILATÓRIO 80

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 82

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS 82
4.1.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA 82
4.1.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA 83
4.1.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA 84
4.1.4 CARACTERIZAÇÃO POR IMAGEM 85
4.1.5 ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA 86
4.2 ENSAIO DE FLUXO 86
4.3 ENSAIO OSCILATÓRIO (VARREDURA DE DEFORMAÇÃO) 93

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 98

5.1 CONCLUSÃO GERAL 98
5.1.1 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS 98
5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS 101

REFERÊNCIAS NORMATIVAS 104

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 105

Capítulo 1

Introdução

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é hoje um dos grandes produtores e exportadores mundiais no setor de rochas ornamentais se tornando o 5º maior exportador de rochas ornamentais acabadas. No solo brasileiro encontram-se mais de 1.200 variedades de rochas que são exploradas por 12.000 empresas instaladas em território nacional gerando 130 empregos diretos e indiretos. Esse grande mercado de rochas ornamentais movimentam no país cerca de 1,06 bilhão de dólares no ano de 2012 (ABIROCHAS, 2012).

O maior produtor nacional nesse setor é o estado do Espírito Santo, segundo Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (2012), contribuindo com 50% da produção nacional de rochas ornamentais e 65% das exportações brasileiras que foi de 1,6 milhão de toneladas exportadas em 2012. Com esses dados, confirma-se a importância desse setor para a população e economia brasileira.

Em contrapartida, a produção e o beneficiamento de rochas ornamentais resultam em grande volume de rejeitos. De acordo com Reis (2008), o beneficiamento primário de rochas ornamentais através do processo de corte e serragem e lustro de chapas dessas rochas gera cerca de 1,8 milhões de tonelada de resíduo por ano.

Os resíduos sólidos provenientes desse processo de beneficiamento primário de rochas ornamentais geralmente são descartados em lagoas de decantação ou aterros e, muitas vezes, sem um processo de tratamento para eliminar ou reduzir os constituintes presentes. Pela grande quantidade produzida, ambientalistas acusam as indústrias desse setor como fontes de contaminação e/ou poluição do meio ambiente tornando esses rejeitos um problema ambiental (NUNES *et al.*, 2002).

Constata-se, portanto, a necessidade de aproveitar o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) no Brasil e, principalmente, no estado do Espírito Santo. Em vista disso, é de extrema importância a preocupação com estudos que tornem o setor de rochas mais sustentável do ponto de vista ambiental, dando um destino mais nobre aos rejeitos produzidos por este setor e que também viabilize a utilização do resíduo do ponto de vista técnico, garantindo a qualidade e a durabilidade do produto que venha a incorporar estes rejeitos.

Alguns estudos apontam o reaproveitamento do RBRO como material alternativo em várias áreas e aplicações, tais como pasta cimentícia (MESQUITA *et al.*, 2009), argamassa (CALMON *et al.*, 1997; CALMON *et al.*, 1998; SANTOS *et al.*, 2013), peças cerâmicas

(LIMA FILHO *et al*., 1999; MOTHÉ FILHO *et al*., 2005; NUNES *et al*., 2002), ladrilho hidráulico (REIS; TRISTÃO, 2010), piso intertravado (MOURA *et al.*, 2006), entre outros. Visto que boa parte desse resíduo gerado é reaproveitada sob a forma de subproduto industrial, uma forma de contribuição para o emprego do RBRO é utilizar na fabricação de concretos (ALMEIDA *et al.*, 2007; ALVES, 2008; ALZBOON; MAHASHEH, 2009; ARUNTAS *et al.*, 2010; BINICI *et al.*, 2007; CALMON *et al*., 2005; GONÇALVES, 2000; LISBÔA, 2004; LOPES *et al.*. 2006; SOARES, 2014; ULIANA; 2014).

Por sua vez, o concreto é um material que exige atenção especial, desde a fase de especificação até a cura, pois muitas vezes possui função estrutural. Através da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) obtemos a norma NBR 7212 (ABNT, 1984), que determina o tempo limite para executar o lançamento do concreto, sendo este de 150 minutos a partir da sua mistura. Caso esse tempo seja ultrapassado, o concreto poderá apresentar perda de trabalhabilidade por perda de água por evaporação e início da pega devido às reações de hidratação do cimento.

Para o controle tecnológico do concreto e a verificação da sua trabalhabilidade no seu estado fresco, um ensaio comumente utilizado e realizado é o índice de consistência medido através do teste de abatimento de tronco de cone (*Slump test*), normatizado na NBR NM 67 (ABNT, 1998). Contudo, algumas propriedades do concreto (tensão de cisalhamento, tensão de escoamento e viscosidade) não são possíveis de se obter através desse ensaio, sendo necessária a busca de mais informações a respeito dessas propriedades para um melhor entendimento do seu comportamento em diversas aplicações.

De modo geral, as propriedades do concreto em seu estado fresco estão diretamente relacionadas com o comportamento da pasta cimentícia (CASTRO *et al*., 2011). Uma maneira de analisar esse comportamento é através da reologia, um ramo da física sugerida pela primeira vez por Bingham (1933) para descrever a deformação e escoamento de materiais quando submetidos a esforços originados por forças externas (AULTON, 2005; CORRÊA *et al.*, 2005; LABA, 1993; LEONARDI; MAIA CAMPOS, 2001;).

Para a determinação dos parâmetros reológicos da pasta cimentícia, tais como tensão de escoamento, viscosidade aparente, perfil reológico do material e, ainda, os efeitos da consolidação desse material associados à hidratação do cimento, a literatura propõe alguns testes como, por exemplo, ensaio de fluxo, ensaio oscilatório (varredura de tempo e varredura

de deformação) e ensaio de palheta ou *Vane test* (BETIOLI *et al*., 2009; CAVALCANTI, 2006; LISBÔA, 2004; SATO *et al*., 2012; TEIXEIRA *et al*., 2014; VENÂNCIO, 2008).

Segundo De Larrard *et al*. (1996), a utilização do reômetro não tem a finalidade somente de medir o maior número de parâmetros possíveis, entretanto avalia-se também as quantidades físicas que podem estar cientificamente relacionadas aos diversos estágios de utilização do concreto. Como exemplo disso, podem-se citar os seguintes parâmetros reológicos:

- A tensão de escoamento, que indica a tensão mínima necessária para o concreto fresco se deformar. Reis (2008) afirma que essa tensão está diretamente relacionada com o ensaio de abatimento de tronco de cone. Quanto maior a tensão de escoamento de uma matriz cimentícia, espera-se um menor abatimento obtido pelo ensaio tradicional de abatimento de tronco de cone do concreto no estado fresco;
- A viscosidade aparente, que aponta o acréscimo de tensão que deve ser imposta para produzir uma determinada taxa de cisalhamento. A viscosidade aparente se associa, na prática, às capacidades de aplicação, bombeamento, segregação do material e acabamento, facilitando a distinção entre um concreto trabalhável de um que apresenta um comportamento "pegajoso", com dificuldades para bombear e apresentando vazios na superfície do elemento estrutural quando a forma é retirada (CASTRO *et al*., 2011).

Apesar do número cada vez crescente de estudos que visam incorporar o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais, observa-se que a maior parte dessas pesquisas foca na análise do comportamento mecânico do concreto. O estudo do comportamento reológico com adição destes rejeitos ainda é incipiente.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os questionamentos preliminares desta pesquisa giram em torno da caracterização e utilização do resíduo gerado na produção e beneficiamento de rochas ornamentais, nomeado e batizado pelo Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) como lama de beneficiamento de rochas ornamentais, como material alternativo na produção de concreto. Segundo a classificação de resíduos sólidos da norma NBR 10004 (ABNT, 2004), os sólidos provenientes dessa lama foram classificados como classe II A - resíduo não inerte.

Apesar da norma NBR 12655 (ABNT, 2006) determinar que a utilização de materiais não convencionais como adição ou substituição no concreto pode ser realizada apenas na forma de

agregado, há questionamentos quanto ao comportamento mecânico desses concretos produzidos, quando comparado com o concreto sem essas adições ou substituições.

Várias pesquisas têm comprovado a viabilidade da utilização desse rejeito em concretos. No entanto, estes estudos são geralmente voltados para a caracterização do concreto no estado endurecido, na qual é feita a análise das propriedades mecânicas, tais como resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e no estado fresco, em que é analisada a consistência das misturas através do ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump Test*).

Contudo, o objetivo desse trabalho é empregar o RBRO como adição em pastas cimentícias e verificar a influência deste material no comportamento reológico das pastas analisadas. Sobretudo, foi investigado como o efeito fíler deste rejeito pode alterar os parâmetros reológicos analisados, pois este se torna um material pulverulento de elevada finura após seu processo de preparação (secagem, destorroamento, quarteamento e moagem).

Assim, de uma maneira geral, busca-se viabilizar o aproveitamento e a utilização do RBRO na construção civil, incorporando no concreto como adição para minimizar os impactos ambientais provocados pela indústria de mineração e beneficiamento dessas rochas e, ainda, reduzir os custos dada a possível redução no volume de cimento Portland necessário na fabricação de concreto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Utilizar dos conceitos de reologia para investigar a influência da incorporação de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais nas propriedades reológicas de pastas cimentícias, analisando as interações que ocorrem entre este rejeito e os outros constituintes das pastas (cimento e água, nesse estudo).

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral dessa pesquisa foi necessária a realização dos objetivos específicos apresentados a seguir:

- Caracterizar física, química, microestrutural e mineralogicamente os materiais que foram utilizados neste estudo;

- Determinar o procedimento de mistura ideal a ser empregado em ensaios utilizando um reômetro de cisalhamento dinâmico *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) de forma a obter uma amostra homogênea e representativa da matriz cimentícia utilizada;
- A partir da definição do procedimento de mistura ideal, realizar no reômetro ensaios de fluxo e oscilatório (varredura de deformação) em pastas cimentícias contendo diferentes percentuais de adição de RBRO (5%, 10%, 15%), utilizando o DSR;
- Verificar a correlação entre os parâmetros reológicos das pastas de cimento com adição de RBRO com a consistência do concreto no estado fresco e a resistência à compressão do concreto no estado endurecido.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com o objetivo de expor de maneira clara e ordenada todos os passos deste estudo, esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. É apresentada a seguir uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo.

No *Capítulo 1* é apresentada uma breve introdução sobre o assunto estudado, bem como a importância e justificativa do presente estudo e os objetivos a serem alcançados.

O *Capítulo 2* é dedicado a uma revisão bibliográfica dos principais tópicos abordados neste estudo, tais como o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais, a hidratação do cimento Portland, a reologia da pasta cimentícia, alguns reômetros encontrados na literatura e os principais ensaios utilizados para caracterização de matrizes cimentícias.

No *Capítulo 3* são apresentadas as variáveis envolvidas na pesquisa, bem como os materiais empregados e suas características. São, também, descritos os métodos de preparo e de ensaio utilizados neste estudo, explicando a metodologia do programa experimental.

O *Capítulo 4* apresenta os resultados obtidos através dos ensaios expostos no programa experimental e a sua análise descritiva.

No *Capítulo 5* estão descritas as principais conclusões obtidas através das observações, resultados e análises feitas ao longo deste estudo. Além de algumas sugestões para trabalhos futuros de pesquisa nessa área a partir das lacunas encontradas durante esta pesquisa.

Por fim, são apresentadas as referências normativas, as bibliográficas e a bibliografia consultada que auxiliaram para a composição dessa pesquisa.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica dos estudos e pesquisas científicas voltadas para a utilização de resíduos sólidos, em especial o Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO). Também, é feita uma revisão bibliográfica sobre conceitos de reologia e programas experimentais utilizando estes conceitos que visem o melhor entendimento do comportamento de matrizes cimenticías tendo como aglomerante o cimento Portland. Assim, são analisados os principais métodos adotados na literatura para definição da metodologia da presente pesquisa.

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E GERAÇÃO DO RBRO

Como mencionado anteriormente, o Brasil se tornou o 5º maior exportador de rochas ornamentais acabadas, se destacando no mercado e movimentando no país 1,06 bilhão de dólares no ano de 2012, como mostra a Tabela 2.1. O estado do Espírito Santo é hoje o maior produtor nacional no setor de rochas ornamentais, por contribuir com metade da produção nacional e 65% das exportações brasileiras. (ABIROCHAS, 2012)

Tabela 2.1 – Principais destinos das exportações brasileiras de rochas (acima de US$ 10 milhões)

ANO DE 2011			ANO DE 2012		
12 PRINCIPAIS PAÍSES	**US$ 1000**	**TONELADAS**	**11 PRINCIPAIS PAÍSES**	**US$ 1000**	**TONELADAS**
EUA	506.688,70	605.717,48	EUA	577.766,77	709.391,52
CHINA	141.595,42	766.176,51	CHINA	146.614,57	780.608,89
ITÁLIA	74.355,54	236.679,88	ITÁLIA	59.424,46	178.650,41
CANADÁ	40.104,27	38.541,48	CANADÁ	42.931,41	40.462,73
MÉXICO	20.697,64	29.281,29	MÉXICO	23.223,04	32.430,78
TAIWAN	17.414,38	80.283,02	TAIWAN	20.593,03	104.039,85
ALEMANHA	16.089,89	32.329,23	VENEZUELA	16.555,68	24.223,20
REINO UNIDO	15.026,42	34.711,49	REINO UNIDO	15.293,00	34.478,64
HONG KONG	14.244,09	58.934,80	ALEMANHA	14.525,88	28.504,92
VENEZUELA	13.601,02	20.724,51	ESPANHA	10.346,73	37.707,96
ESPANHA	12.203,90	34.856,29	COLÒMBIA	10.167,99	16.060,27
BÉLGICA	10.547,78	31.805,96			
Subtotal Principais Países	**882.569,05**	**1.970.041,94**		**937.442,56**	**1.986.559,17**
Total Exportações Brasileiras	**999.803,96**	**2.190.055,45**		**1.060.415,86**	**2.237.150,44**
Participação Principais Países Total Exportações	**88,3%**	**89,9%**		**88,4%**	**88,8%**

Fonte: ABIROCHAS, 2012.

Para obtenção do produto final a ser comercializado, existe uma série de etapas a seguir. O processamento das rochas divide-se em duas etapas: extração dos blocos nas lavras e beneficiamento nas serrarias. O sistema de desdobramento dos blocos em chapas se dá através do uso de teares e cerca de 25 a 30% do bloco é transformado em pó (CALMON; SILVA, 2006; FREIRE; MOTA, 1995; GONÇALVES, 2000; GONÇALVES; MOURA, 2002; MOTHÉ FILHO *et al*., 2005) que misturado a água geram os resíduos.

O Espírito Santo possui cerca de 900 teares em operação no estado, o que representa em torno de 69% dos teares instalados no Brasil. A maioria desses teares está localizada na cidade de Cachoeiro do Itapemirim (ABIROCHAS, 2012). Existem basicamente dois tipos de teares, os que usam fios diamantados e aqueles que utilizam lâminas metálicas, como ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Tipo de teares utilizados para o desdobramento de blocos em chapas

(a) Tear tradicional **(b) Tear de multifios diamantados**

Fonte: Produção da autora.

A polpa ou lama abrasiva (mistura de água, pó de rocha, granalha de ferro e cal) é aspergida sobre os blocos durante o processo de corte e auxilia na lubrificação e resfriamento das lâminas, evitando a sua oxidação, limpando os canais entre as chapas e facilitando o corte como um abrasivo (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Detalhe da aspersão da polpa abrasiva sobre o bloco durante o corte em um tear tradicional

Fonte: Produção da autora.

No caso de teares que usam fios diamantados, o resíduo é composto de pó de rocha e água, e em teares que utilizam lâminas metálicas, além da água e do pó de pedra, o resíduo constitui-se de cal, granalha e fragmentos metálicos provenientes do desgaste das lâminas, formando assim a lama (polpa abrasiva), responsável por diversos problemas, principalmente ambiental.

A lama recircula no tear por meio de uma bomba submersa de eixo vertical, situada num poço de recolhimento durante a serragem. A viscosidade da lama é controlada e a parte da lama que se torna muito viscosa é descartada, tornando-se o resíduo, que em geral, é depositado em lagoas ou tanques de sedimentação Figura 2.3, muitas vezes diretamente no solo, nos pátios das empresas.

Figura 2.3 – Tanque de sedimentação

Fonte: Produção da autora.

Há casos em que o resíduo passa por um equipamento chamado filtro-prensa (Figura 2.4) para diminuir sua umidade e consequentemente seu volume. Após a perda de umidade do resíduo na lagoa de decantação ou nos filtros prensa, o material é transportado e disposto em aterros industriais e gera despesas consideráveis para as empresas.

Figura 2.4 – Filtro prensa

Fonte: Produção da autora.

Mas toda essa produção e beneficiamento de rochas ornamentais geram rejeitos. O beneficiamento primário de rochas ornamentais através do processo de corte e serragem e lustro de chapas dessas rochas gera uma grande quantidade de resíduos sólidos, cerca de 1,8 milhões de tonelada de resíduo por ano (REIS, 2008). No estado do Espírito Santo, o maior produtor nacional, Calmon (2010) considera que esse valor chegue a 60.000 toneladas por mês.

Com o intuito de maior aproveitamento de resíduos na construção civil e tentativa de contribuir para um maior desenvolvimento sustentável, alguns pesquisadores têm estudado o resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de pastas cimentícias (MESQUITA *et al*., 2009), argamassas (CALMON *et al.*, 1997; CALMON *et al.*, 1998; SANTOS *et al.*, 2013), peças cerâmicas (LIMA FILHO *et al*., 1999; MOTHÉ FILHO *et al*., 2005; NUNES *et al*., 2002), concretos (ALMEIDA *et al.*, 2007; ALVES, 2008; ALZBOON; MAHASHEH, 2009; ARUNTAS *et al.*, 2010; BINICI *et al.*, 2007; CALMON *et al*., 2005; GONÇALVES, 2000; GONÇALVES; MOURA, 2002; LI *et al.* 2013; LISBÔA, 2004; LOPES *et al*.. 2006; SOARES, 2014; ULIANA; 2014), entre outros.

2.2 ESTUDOS VOLTADOS PARA A UTILIZAÇÃO DO RBRO EM MATRIZ CIMENTÍCIA

A preocupação em utilizar resíduos na construção civil empregando o resíduo de diferentes formas tem gerado muitos estudos e publicações iniciadas na década de 90, realizadas no Brasil, com desenvolvimento de pesquisas no estado do Espírito Santo e em seguida no Rio Grande do Sul, Minas Gerais, se difundindo para outros estados também produtores de rochas (ULIANA, 2014).

Gonçalves (2000) buscou a verificação do comportamento mecânico de concretos utilizando resíduo de granito como adição à massa de cimento. Para isso, dois teores de adição do resíduo de granito (10% e 20%) em relação à massa de cimento e três diferentes relações água/cimento (0,40; 0,55; 0,70) foram estudados. Avaliaram-se as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido através dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão. Com o aumento das resistências estudadas, o autor pode concluir que o teor ótimo de adição é de 10% para os aspectos mecânicos estudados, tornando viável a aplicação do resíduo de corte de granito em concretos.

Lisboa (2004) analisou as propriedades mecânicas do concreto auto-adensável com a adição do RBRO como fíler mineral. Para encontrar a quantidade adequada de RBRO e o percentual ótimo de superplastificante, estudos preliminares da pasta (Cone de *Marsh* e *Mini-slump*) e da argamassa (Cone de *Marsh* e Tronco de cone da mesa de consistência), foram definidos. De posse desses estudos, misturas de concretos foram dosadas e amostras foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração na compressão diametral, com relação resíduo/cimento de 50%. Em todos os parâmetros estudados o concreto com resíduo apresentou desempenho satisfatório, concluindo a viabilidade do uso do RBRO na produção de concretos auto-adensáveis.

A influência da adição do resíduo de polimento de rochas ornamentais na consistência do concreto fresco e as alterações nas propriedades mecânicas foram estudadas por Alves (2008), através de ensaios de abatimento de tronco de cone e resistência à compressão. Estabeleceram-se três relações água/cimento (0,45; 0,55; 0,65) e adição de 10% e 20% de resíduo em relação à massa do cimento. Através da pesquisa foi possível concluir que as partículas do resíduo causam melhoria nas propriedades da zona de transição dos concretos, pois atuam como um fíler preenchendo os espaços vazios.

Soares (2014) produziu os concretos com três diferentes relações água/cimento (0,45; 0,55 e 0,65) e adição do RBRO com teores de 0%, 5%, 10% e 15% em relação à massa de cimento. No estado fresco, foram analisadas as propriedades consistência e massa específica; e no estado endurecido, resistência à compressão axial, análise microestrutural, ataque por sulfatos e absorção de água por capilaridade e por imersão. Depois de realizados todos os ensaios, os concretos com 5% de RBRO apresentaram os melhores resultados quanto ao desempenho mecânico para todas as relações a/c com valores acima dos concretos de referência, além do efeito positivo na resistência ao ataque de sulfatos em teores.

Alguns estudos se preocuparam com as propriedades reológicas da matriz cimentícia com incorporação de resíduo de rochas ornamentais. É o caso de Mesquita *et al.*, 2009, adicionando o RBRO como fíler na pasta de cimento com teores de 0, 5, 10 e 15 %, em relação à massa de cimento. Nesse trabalho analisou-se reologicamente as pastas em 5 tempos distintos de 0, 15, 30, 45, 60 e 75 min. após a fabricação, através dos ensaios Cone de Marsh, Cone de Kantro e Tempo de Pega. Segundo os autores, a taxa de fluidez da pasta com incorporação de 10% de RBRO apresentou a menor taxa de perca de fluidez, com média de 12,83 %.

No estudo de Santos *et al.* (2013) foram adicionados teores de 5%, 10% e 15% de resíduo, em relação à massa de cimento, em argamassas de cimento Portland. Em seguida, por meio do ensaio da mesa de consistência e do ensaio de *squeeze flow*, avaliou-se a densidade de massa, o teor de ar incorporado, o índice de retenção de água, além de suas propriedades reológicas. Os resultados indicaram que a argamassa confeccionada com adição de 10% do resíduo apresentou o melhor desempenho.

Na pesquisa de Calmon *et al*. (2005) foi adicionado à mistura um teor de 20% de RBRO em relação à massa de concreto. Os resultados para a resistência à compressão foram satisfatórios e essa melhora de resistência pode estar ligada ao efeito fíler do material, pois preenche os vazios e diminui a porosidade, garantindo uma melhor resistência ao concreto.

Outros estudos focaram na utilização do RBRO como substituição parcial do agregado. Falcão e Stellin Junior (2001), por exemplo, substituíram 10% de areia fina por resíduo para confecção de blocos estruturais. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão indicaram um aumento significativo da resistência e que o percentual de substituição de areia pode ser aumentado em até 50%.

Almeida *et al.* (2007), que produziram oito misturas de concreto com cimento branco e incorporação de RBRO substituindo o agregado miúdo (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 34%, 67% e 100%). Foi adotada uma baixa relação água/cimento, baixo teor de agregados e elevado teor de cimento. As propriedades estudadas foram a resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Após estudo, concluiu-se que, para proporcionar benefícios às propriedades mecânicas do concreto, pode-se usar a RBRO especificamente como um agregado fino, cujas partículas completam os interstícios da matriz (zona de transição e poros capilares) reduzindo espaço para a água livre.

Binici *et al.* (2007) substituíram em seu estudo o agregado miúdo por RBRO em três misturas diferentes (5%, 10% e 15%). Diante dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, os autores concluíram que, desde que a porcentagem de substituição se mantenha inferior aos 15%, é viável a utilização do resíduo em substituição ao agregado miúdo para a produção de concretos.

A pesquisa de Li *et al.* (2013) investigou os efeitos da RBRO como agregado miúdo em misturas de concreto feitas com cimento sorel, formado a partir da combinação de óxido de magnésio e da solução de cloreto de magnésio. Este cimento foi desenvolvido depois do cimento Portland, contendo oxicloreto de magnésio e apresentando endurecimento rápido, resistência inicial alta e ideal para rápidas reparações. O estudo em questão substituiu o agregado miúdo por resíduo em 10%, 20%, 30% e 40% e realizaram-se os ensaios de resistência à compressão e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Concluiu-se que as amostras que apresentaram o melhor desempenho foram as que continham 10% de resíduo.

O RBRO também foi estudada como substituição parcial da água pelos pesquisadores Alzboon e Mahasheh (2009), já que a lama utilizada na pesquisa possuía teores de água que variavam de 95,1% a 99,4%. A lama foi aplicada de duas formas: *in natura* em substituição da água em teores de 100%, 75%, 50%, 25% e 0% e apenas a água do resíduo, que foi retirada por sedimentação, após 30, 60 e 90 minutos, substituindo 100% da água potável. Foram realizados o ensaio de abatimento de tronco de cone e o ensaio de resistência à compressão. Nesse estudo, a conclusão foi que a RBRO pode ser adicionada a mistura de concreto como fonte de água apenas se for in natura e a substituição não pode ultrapassar os 25%.

Outra forma de utilizar o resíduo foi substituindo parcialmente as adições minerais do cimento. Esse estudo foi realizado por Aruntas *et al*. (2010) e consiste no uso da RBRO como uma adição mineral em substituição parcial de clínquer na fabricação do cimento Portland, nos percentuais de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10%. Através dos ensaios de resistência à tração e à compressão, os autores concluíram que é possível a diminuição no custo da produção de cimento, substituindo o clínquer em até 10% de RBRO e que não se alteraram consideravelmente as resistências estudadas.

Lopes *et al*. (2006) compararam três amostras de resíduo provenientes de empresas distintas utilizando teores de 10% e 20% de substituição em relação à massa de cimento e duas relações água/aglomerante, (0,50 e 0,65), para analisar o efeito fíler da RBRO no concreto. Os ensaios realizados foram o ensaio de abatimento de tronco de cone, ensaio de resistência à

compressão axial e ensaio de módulo de deformação. Os ensaios mostraram que houve uma redução significativa da resistência com o aumento da porcentagem de substituição. Com os resultados obtidos, os autores concluíram que a lama tem um comportamento fíler e pode ser utilizado em pequenos teores de substituição parcial ao cimento.

Em seu estudo, Uliana (2014) inicialmente tratou termicamente o RBRO a uma temperatura de 1200°C e utilizou o resíduo como um substituto de material cimentício em teores de 5, 10, 15 e 20% em volume para verificação da atividade pozolânica das argamassas produzidas, comparando também com os resultados obtidos das argamassas com o resíduo sem tratamento térmico, avaliadas pela resistência à compressão axial e pelo módulo de elasticidade dinâmico. Concluiu-se que as argamassas com substituição de cimento por resíduo obtiveram resultados inferiores aos da argamassa de referência. Os resultados de módulo de elasticidade não apresentaram a regularidade dos dados obtidos de resistência à compressão. Observou-se também que o resíduo tratado termicamente se apresentou como um material com características de pozolanicidade.

O Quadro 2.1 apresenta uma síntese de todas as referências levantadas até o momento com a utilização do resíduo no concreto, analisadas nessa pesquisa.

Quadro 2.1 – Síntese das pesquisas analisadas

(continua)

ESTUDO	% ADIÇÃO OU SUBSTITUIÇÃO	ENSAIOS REALIZADOS	CONCLUSÃO
Gonçalves, 2000	10, 20 (adição/cimento)	Resistência à compressão axial, resistênciaà tração por compressão diametral e na flexão.	As resistências aumentaram com a adição de resíduo, apresentando o teor ótimo de adição de 10%.
Falcão e Stellin Junior, 2001	10 (substituição/areia)	Resistência à compressão.	Aumento significativo da resistência; o percentual de substituição de areia pode ser aumentado em até 50%.
Lisboa, 2004	50 (adição/cimento)	Cone de Marsh, Mini-slump e Tronco de cone da mesa de consistência.	O concreto com resíduo mostrou desempenho satisfatório, concluindo a viabilidade do uso do RBRO na produção de CAA.
Calmon *et al.*, 2005	20 (adição/concreto)	Resistência à compressão	Os resultados para a resistência à compressão foram satisfatórios e isso pode estar ligado ao efeito fíler do material, pois preenche os vazios e diminui a porosidade, garantindo uma melhor resistência ao concreto.
Lopes *et al.*, 2006	10, 20 (substituição/cimento)	Abatimento de tronco de cone, resistência à compressão e módulo de deformação.	Redução significativa da resistência com o aumento do % de substituição, concluindo que a lama tem um comportamento fíler e pode ser usado em pequenos teores de substituição parcial ao cimento.

Quadro 2.1 – Síntese das pesquisas analisadas

(conclusão)

Almeida *et al*., 2007	5, 10, 15, 20, 34, 67, 100 (substituição/areia)	Resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade.	Para proporcionar benefícios às propriedades mecânicas do concreto, pode-se usar a RBRO especificamente como um agregado fino e/ou microfiler.
Binici *et al*., 2007	5, 10, 15 (substituição/areia)	Resistência à compressão.	A utilização do resíduo em substituição ao agregado miúdo para a produção de concretos é viável desde que a porcentagem de substituição se mantenha inferior aos 15%.
Alves, 2008	10, 20 (adição/cimento)	Abatimento de tronco de cone e resistência à compressão.	As partículas do resíduo causam melhoria nas propriedades da zona de transição dos concretos, pois atuam como um fíler preenchendo os espaços vazios.
Mesquita *et al*., 2009	0, 5, 10, 15 (adição/cimento)	Cone de Marsh, Cone de Kantro e Tempo de Pega.	A taxa de fluidez da pasta com incorporação de 10% de RBRO apresentou a menor taxa de perca de fluidez, com média de 12,83 %.
Alzboon e Mahasheh, 2009	25, 50, 75, 100 (substituição/água)	Abatimento de tronco de cone e resistência à compressão.	A RBRO pode ser adicionada a mistura de concreto como fonte de água apenas se for in natura e a substituição não pode ultrapassar os 25%.
Aruntas *et al*., 2010	2,5; 5; 7,5; 10 (substituição/clínquer)	Resistência à tração e resistência à compressão.	É possível substituir o clínquer em até 10% de RBRO e não se alteraram consideravelmente as resistências estudadas, diminuindo o custo da produção de cimento.
Li *et al*., 2013	10, 20, 30, 40 (substituição/areia)	Resistência à compressão e MEV.	As amostras com 10% de resíduo apresentaram melhor desempenho.
Santos *et al*, 2013	0, 5, 10, 15 (adição/cimento)	Ensaio da mesa de consistência e do ensaio de *squeeze flow*.	Os resultados indicaram que a argamassa confeccionada com adição de 10% do resíduo apresentou o melhor desempenho.
Soares, 2014	0, 5, 10, 15 (adição/cimento)	Índice de consistência, massa específica, resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e por imersão, ataque por sulfatos, análise microestrutural.	Os concretos com 5% de RBRO apresentaram os melhores resultados quanto ao desempenho mecânico para todas as relações a/c com valores acima dos concretos de referência, além do efeito positivo na resistência ao ataque de sulfatos em teores.
Uliana, 2014	0, 5, 10, 15, 20 (substituição/cimento)	Resistência à compressão axial, módulo de elasticidade dinâmico e MEV.	As argamassas com substituição obtiveram resultados de resistência à compressão inferiores aos da argamassa de referência. Os resultados de módulo de elasticidade não apresentaram a regularidade.

Fonte: Produção da autora.

2.3 CARACTERÍSTICAS DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

Com base nas pesquisas estudadas, as propriedades do concreto, em seu estado fresco, geralmente estão relacionadas com o comportamento da pasta cimentícia (CASTRO *et al*.,

2011). Banfill (2003) afirma que se as propriedades do concreto no estado fresco não forem satisfatórias, é improvável que as desejáveis propriedades do material endurecido poderão ser alcançadas.

Dessa forma, é imprescindível um estudo voltado para o comportamento reológico das pastas de cimento no estado fresco, consideradas como fluidos viscosos. Dá-se o nome de pasta cimentícia (ou pastas de cimento), à combinação da água com o aglomerante com ou sem adições e aditivos.

O cimento é um material aglomerante complexo, pois suas propriedades e características variam com o tempo e com a temperatura, tornando necessário o conhecimento dos fatores que alteram estas propriedades e características de modo a definir o método de utilização deste material.

2.3.1 Hidratação do cimento Portland

O cimento Portland possui uma propriedade aglomerante que ocorre somente quando este é misturado à água, uma reação química que é denominada de hidratação. Quando um cimento anidro ou algum de seus constituintes é misturado com água, acontece uma transformação que resulta em produtos que possuem características de pega e endurecimento (LYRA, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 1994; TAYLOR, 1990).

Segundo a NBR 5733 (ABNT, 1991), o cimento Portland é produzido pela moagem do clínquer e definido como um aglomerante hidráulico. O clínquer, por sua vez, consiste em silicatos de cálcio hidráulicos, geralmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição. Também são encontrados outros constituintes em menores teores além dos compostos mencionados, tais como: MgO, TiO_2, MnO_2, K_2O e Na_2O. As principais fases anidras de um cimento Portland são apresentadas no Quadro 2.2. Estes componentes do cimento, quando misturados à água, reagem quimicamente, fenômeno este denominado de hidratação.

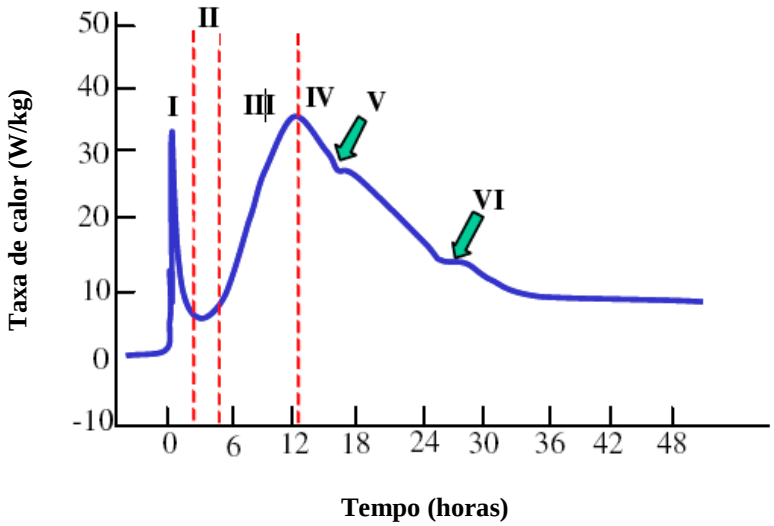
Quadro 2.2 – Principais fases anidras de um cimento Portland

Composto	Composição	Nomenclatura
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

Fonte: Neville, 1997 *apud* Betioli, 2007, p.6.

Durante a hidratação dos componentes do cimento Portland, ocorre reações exotérmicas, i.e., liberação de calor para o meio externo (ROCHA, 2010). A Figura 2.5 mostra os diferentes estágios do fenômeno da hidratação, de acordo com a taxa de liberação de calor, esta última medida através de ensaio de calorimetria.

Figura 2.5 – Perfil da curva de evolução da hidratação de um cimento Portland típico



Fonte: Betioli, 2007, p.7.

Taylor (1990) e Odler (1998) descrevem cada um dos estágios ilustrados na Figura 2.4 como:

Estágio I – Observa-se um pico de liberação de calor elevado alguns minutos após a mistura do cimento com água, em razão da dissolução do sulfato de cálcio até a saturação, da dissolução completa dos sulfatos alcalinos e liberação dos íons K^+, Na^+ e SO_4^{2-}, da liberação dos íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} e do início da dissolução das fases anidras C_3S, C_3A e C_4AF.

Este estágio é chamado de período de pré-indução, em que a dissolução das fases anidras libera íons que reagem com os íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} dando origem a uma camada de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), amorfo, rico em aluminato, revestindo a superfície dos grãos de cimento e de pequenas e espessas agulhas de etringita. Nesses minutos iniciais ocorre também a hidratação da cal livre do cimento (CaO).

Estágio II – Neste estágio, chamado de período de *indução* ou dormência, observa-se uma taxa de liberação de calor muito baixa e pode durar aproximadamente de 30 minutos a 3 horas. A formação do gel ao redor da partícula produzida na fase anterior parece retardar as reações em razão da formação de uma barreira entre as fases anidras e a solução aquosa. A finalização dessa fase acontece quando a camada de gel depositada sobre os grãos de cimento

é destruída ou quando se torna mais permeável à difusão iônica. Neste estágio observa-se também um aumento das concentrações dos íons Ca^{2+}, K^{+}, Na^{+}, SO_4^{2-} e OH^{-} em solução.

Estágio III – Sucede nesse estágio uma rápida formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH) devido à supersaturação iônica da fase aquosa pelo mecanismo de dissolução-precipitação, ocasionando uma diminuição gradual da concentração dos íons Ca^{2+} na solução. Denominado de período de *aceleração,* sucede também nesse estágio o crescimento das agulhas de etringita.

Estágio IV – Com uma velocidade menor, o C-S-H e o CH continuam a se formar. O mecanismo de reação passa a ser controlado por difusão iônica, podendo-se notar nesse estágio uma desaceleração na taxa de reação.

Em alguns tipos de cimento, pode ser observada uma nova fase de etringita quando o teor de C_3A é maior que 12%, resultando no *estágio V*. A partir da reação entre o trissulfoaluminato (etringita) com o C_3A e C_4AF surge a formação do monossulfoaluminato de cálcio que caracteriza o *estágio VI*, devido à indisponibilidade de sulfato de cálcio no sistema.

Em particular, algumas combinações de cimento com adições minerais e/ou aditivos podem ser incompatíveis, levando ao endurecimento precoce ou retardamento excessivo com anomalias na evolução do calor (WONG *et al*., 2001). Uma interação complexa entre C_3A, sulfato em solução, adições e aditivos, às vezes, cria uma mistura pobre de cimento (BARTOS, 1992; KOSMATKA *et al.*, 2002). Portanto, é necessário identificar as incompatibilidades para evitar os problemas no processo de adição e na cura do concreto. Prevê-se que os parâmetros reológicos da pasta de cimento (cimento + adições + aditivos + água) pode ser um bom indicador para identificar as incompatibilidades.

2.3.2 Incompatibilidade de misturas cimentícias

A utilização dos íons sulfato em solução pode ser completamente diferente dependendo do tipo de sulfato (por exemplo, anidro, hemi-hidratado e gesso), embora o cimento Portland possuir o mesmo teor total de SO_3 (TAYLOR *et al.*, 2006). Algumas adições (por exemplo, cinza volante Classe C e escórias) podem servir como uma fonte adicional de sulfato além do próprio cimento.

O nível de concentração de sulfato em solução (baixa, ótima, alta) influencia fortemente na adsorção de determinadas misturas químicas (por exemplo, mistura de redução de água) durante os primeiros minutos de hidratação (PRINCE *et al.*, 2002). Consequentemente, pode

também afetar as propriedades reológicas da pasta de cimento, o que pode ser explicado pela adsorção competitiva pelo C_3A e a hidratação entre os íons sulfato e as moléculas de mistura de produtos químicos.

Se a concentração de sulfato é muito baixa, uma elevada quantidade de moléculas da mistura é adsorvida e pode ser incorporada nos hidratos de cimento durante as reações de hidratação inicial, consequentemente, perdendo seu efeito de dispersão. Por outro lado, se a concentração de sulfato é muito elevada, uma quantidade menor da mistura é adsorvida devido aos íons sulfatos também serem adsorvidos.

Em sistemas deficientes de sulfatos, a hidratação do C_3A produz hidratos de aluminato de cálcio, o que conduz a um rápido desenvolvimento da rigidez em pastas de cimento, argamassas ou concretos recém-misturados e uma grande quantidade de calor é produzida no processo gerando um material de baixa resistência, enquanto que na presença excessiva de sulfato, a nucleação e o crescimento de cristais de gesso podem levar a um rápido desenvolvimento da rigidez em pastas de cimento, argamassas ou concretos recém-misturados, sem a geração de muito calor (HANSEN, 1960).

Definir o retardamento do tempo de pega devido à interação anormal da mistura de cimento com outros materiais (especialmente aditivos plastificantes retardadores de pega à base de lignina) ocorre no estado fresco do concreto. O retardamento excessivo também pode ocorrer se um grande volume de cinzas volantes é incorporado no concreto, especialmente quando se utiliza o cimento Portland CP IV. Helmuth *et al.* (1995) relataram que um sistema de cimento, adições minerais e aditivos torna-se mais complicado e imprevisível com altas ou baixas condições de temperatura ambiente.

Alguns pesquisadores (CHEN *et al.*, 2006; FERRARIS, 1996; ZHANG, 2001) relataram a sensibilidade dos parâmetros reológicos para os fatores que causam incompatibilidades de concreto, resumidos como:

- a quantidade de C_3A;
- o tipo e a quantidade de sulfato no cimento e nas adições;
- álcalis solúveis em água (Na^+, K^+), tanto a partir do cimento quanto das adições;
- o tipo e a dosagem de ambos, bem como misturas minerais;
- a temperatura de pasta de cimento e
- a relação água/cimento.

Rocha (2010) afirma que as alterações no aspecto físico da pasta de cimento (enrijecimento, pega e endurecimento) são consequência da evolução da reação de hidratação:

- A perda de água livre ocasiona o aumento da consistência da pasta, ou seja, seu enrijecimento. Essa água é consumida por reações químicas ou por adsorção física na superfície dos hidratos.
- O instante em que a pasta perde trabalhabilidade dá-se o início da pega, que indica o começo da solidificação da pasta. O fim da pega é marcado pela solidificação completa da pasta, apresentando certa resistência a partir desse ponto.
- O avanço da reação de hidratação provoca o endurecimento, resultando no aumento da resistência e na redução da permeabilidade e da porosidade.

2.4 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE MATERIAIS DE BASE CIMENTÍCIA

A reologia é o ramo da física que analisa os efeitos provocados em um material através de aplicações de uma tensão ou deformação, procurando entender as relações entre tensão, deformação, taxa de deformação e tempo. De outra forma, há uma preocupação quanto à mecânica de corpos deformáveis que podem estar no estado sólido, líquido ou gasoso (COSTA, 2006; MARTINS, 2004; SCHRAMM, 2006).

A preocupação da reologia, na prática, está voltada para os materiais que apresentam propriedades do escoamento mais complexas do que as de um fluido simples (líquido ou gás) ou as de um sólido elástico ideal, apesar de que, dependendo das condições que o ensaio é realizado, o material terá um comportamento simples ou complexo (CASTRO, 2007).

O concreto no seu estado fresco pode ser considerado um fluido e, por conseguinte, os princípios básicos da reologia podem ser aplicados a este material (MEHTA, 1986). Durante as etapas de processamento mineral, na maioria dos casos, há o envolvimento de suspensões - misturas de minério fino com uma fase líquida. Para obter sólidos não diluídos suspensos no líquido não existe força entre partículas e o efeito de um leve crescimento na quantidade de sólidos suspensos é meramente para aumentar o coeficiente de viscosidade. No entanto, para um concentrado de sólidos não diluídos (por exemplo, concreto), existem forças que atuam entre as partículas. Estas forças não se limitam a alterar apenas a viscosidade, mas sim a mudar o tipo de escoamento.

Tattersall e Banfill (1983) realizaram investigações sistemáticas na reologia do concreto. Descobriram que existia uma relação linear entre o torque e a velocidade de rotação do

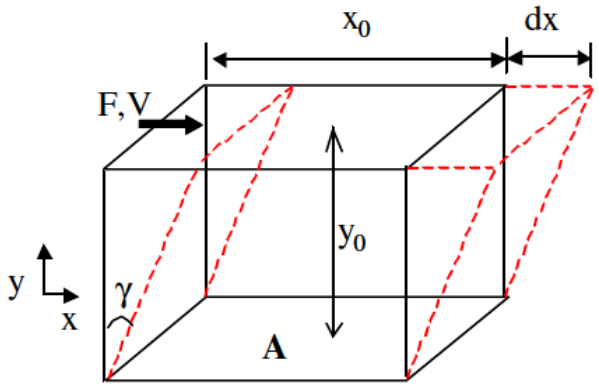
viscosímetro depois que certo valor de torque ter sido ultrapassado. Os autores afirmam que o escoamento de concreto pode ser expresso pelo modelo de Bingham e pode ser escrita como apresentado na Equação 1.

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (1)$$

em que τ (Pa) é a tensão de cisalhamento, τ_0 (Pa) é a tensão de escoamento, μ (Pa.s) é a viscosidade plástica e γ (s^{-1}) é a taxa de cisalhamento.

Um dos primeiros a correlacionar a taxa de deformação de um fluido com a tensão externa ao qual é submetido foi Isaac Newton, em que propõe um modelo composto por duas placas paralelas de área "A", uma estacionária, outra em movimento e entre elas um fluido (Figura 2.6). A letra F significa força, V é a velocidade e A é a área.

Figura 2.6 – Modelo de Newton para definição do conceito de viscosidade

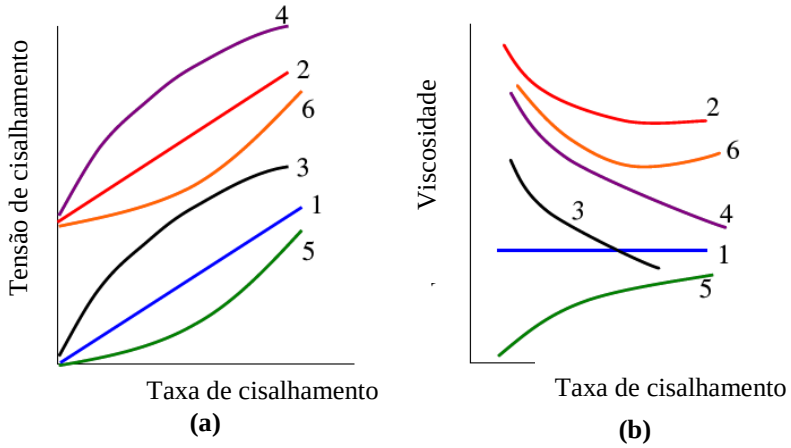


Fonte: Betioli, 2007, p.54.

A viscosidade, na concepção física, é uma propriedade dos fluidos que caracteriza a resistência desse fluido ao escoamento, a uma dada temperatura, sendo considerado como o atrito interno do sistema. Essa grandeza pode ser definida pela proporção entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento.

Os fluidos podem ser classificados através da análise do perfil das curvas de fluxo e/ou de viscosidade, de acordo com seu comportamento reológico. Os principais e mais comuns tipos de fluidos mais facilmente identificados estão relacionados na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Curvas que descrevem o comportamento reológico dos fluidos



Fonte: Betioli, 2007, p.55.

Alguns comportamentos reológicos são definidos e explicados a seguir:

I. **Fluidos newtonianos** – Representado na curva 1 (Figura 2.7 (a) e (b)), neste tipo de fluido a viscosidade independe da taxa, uma vez que a tensão de cisalhamento varia linearmente com a taxa de cisalhamento. Alguns exemplos de materiais que apresentam este comportamento são: água, alcoóis, betume, melaço, óleo mineral, entre outros.

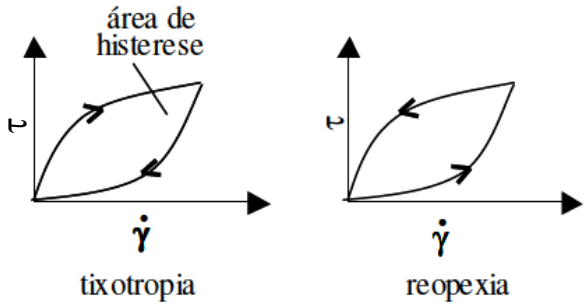
II. **Fluidos pseudoplásticos** – No caso de fluidos pseudoplásticos, há uma diminuição da viscosidade aparente quando há um aumento da taxa ou da tensão de cisalhamento (curva 3 da Figura 2.7 (b)). Exemplos desse fluido são: cola, tinta, pomada e sangue.

III. **Fluidos dilatantes** – Em fluidos que apresentam este comportamento, a correlação das propriedades é diretamente proporcional, ou seja, a viscosidade se eleva com o aumento da taxa de cisalhamento ou a tensão de cisalhamento, conforme a curva 5 da Figura 2.7 (b). O exemplo mais conhecido é o da mistura de água com maisena.

IV. **Fluidos com ponto de escoamento** – As curvas 2, 4 e 6 da Figura 2.7 (a) e (b) representam os fluidos que precisam de uma tensão de cisalhamento mínima (τ_0) para iniciar o seu escoamento. Um dos exemplos clássicos desse tipo de fluido é a pasta de dente.

Os fluidos, denominados “fluidos tempo-dependentes”, são aqueles em que a relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento depende do tempo, podendo ser observada em materiais pseudoplásticos ou dilatantes. Esses materiais são classificados em dois grupos: tixotrópico e reopéxico, apresentados na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Representação esquemática dos comportamentos tixotrópico e reopéxico



Fonte: Betioli, 2007, p.57.

A. Tixotropia

Fluidos tixotrópicos são materiais em que ao serem submetidos a uma taxa de cisalhamento ou tensão de cisalhamento fixa superior ocorre a quebra das estruturas moleculares e sua orientação/alinhamento, ocasionando o decréscimo da viscosidade aparente. Mas, no caso desse tipo de fluido, esse acontecimento reológico é considerado reversível, ou seja, logo após o cisalhamento cessar e com um tempo de repouso aceitável, a viscosidade aumenta devido à reestruturação total ou parcial do material (BETIOLI, 2007; PILEGGI *et al.*, 2001; SCHRAMM, 2006).

Para avaliar o comportamento destes materiais utiliza-se um procedimento em que se obtêm ciclos de cisalhamento (tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento), isto é, aceleração e desaceleração da taxa de cisalhamento (Figura 2.8). Considerando os ciclos de cisalhamento do fluido com comportamento tixotrópico, nota-se que a curva de aceleração apresenta valores de tensão de cisalhamento maiores que os valores da curva de desaceleração, e entre as curvas há uma área que corresponde ao grau de tixotropia do material, nomeada área de histerese (BETIOLI, 2007). Quanto menor a área de histerese, maior a estabilidade do sistema e diminuição dos aglomerados, apresentando um material mais homogêneo.

B. Reopexia

O fluido reopéxico é caracterizado pelo aumento de viscosidade aparente sob cisalhamento. A reopexia é oposta à tixotropia, podendo ser observado nos sentidos inversos das curvas de fluxo da Figura 2.8 (SCHRAMM, 2006). Ao ser deixado em repouso, a viscosidade aparente é reduzida aos níveis originais. O material reopéxico pode continuar num ciclo infinito entre a diminuição da viscosidade aparente relacionada com o tempo de repouso e o aumento da viscosidade aparente dependente do nível de cisalhamento.

Na pasta de cimento, a tensão de escoamento e a viscosidade plástica aumentam com o aumento de tamanho de partícula. Banfill e Tattersall (1983) apontam que este aumento ocorre em razão do agregado poder resistir tensões sem deformação. Uma vez que o agregado ocupa até 70-80% do volume de concreto, a tensão de escoamento do concreto é mais elevada do que da pasta de cimento, que não tem agregado. A tensão de escoamento da argamassa está entre a da pasta e a do concreto.

Em geral, devido ao contato entre partículas e do aumento da superfície de contato, a viscosidade aparente do concreto é maior do que a da pasta. Quando o concreto é submetido a uma tensão de cisalhamento, a velocidade de cisalhamento no interior das partículas sólidas de agregados é zero, uma vez que as partículas sólidas de agregação não pode se deformar (RAMACHANDRAN; BEAUDOIN, 2001).

Como resultado, de forma a ter uma taxa de cisalhamento determinada em todo o composto, a velocidade de cisalhamento em pasta é mais elevada em comparação com o material de pasta de cimento puro. Este aumento é resultado da taxa de cisalhamento de uma maior tensão e da resistência ao fluxo da pasta de cimento (GHIO *et al.*, 1994).

Os valores de taxa de cisalhamento geralmente descritos na literatura para a pasta de cimento não tomam em consideração a contribuição dos agregados (HACKLEY; FERRARIS, 2001). A mistura de pasta de cimento deve imitar o cisalhamento que é submetido no concreto. Algumas pesquisas relataram a utilização de um misturador de alto cisalhamento para preparação da pasta de cimento simulando o efeito de cisalhamento (BHATTACHARJA; TANG, 2000; MUKHOPADHYAY; JANG, 2008).

Quando a consistência é avaliada quanto aos parâmetros reológicos, o controle da produção do concreto é feito de uma forma mais criteriosa. Além de mostrar se o ensaio obteve um resultado apropriado ou não – o que os ensaios padrões são incapazes de realizar – essa avaliação também pode identificar quais os fatores que estão influenciando para a falha do ensaio de se atingir a trabalhabilidade desejada (CASTRO, 2007).

2.5 PRINCIPAIS REÔMETROS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE MATERIAIS

Para a avaliação das propriedades reológicas de fluidos e suspensões - misturas de minério fino com uma fase líquida, houve a necessidade de serem desenvolvidos equipamentos,

chamados reômetros, que possibilitam o estudo do comportamento da tensão de escoamento e da viscosidade aparente em função de outras variáveis, como tempo, temperatura, etc.

Esses aparelhos são muito precisos e podem ser empregados não somente em pesquisas científicas, como também em estudos mais práticos e medidas de controle de qualidade de materiais. É possível obter uma quantidade bem maior de informações, mais precisas e objetivas do que os ensaios empíricos convencionais, já que os ensaios podem ser totalmente automatizados e controlados por computador e possibilitam a redução dos custos com material e mão de obra (DE LARRARD *et al.* , 1996).

O professor Karl Weissenberg desenvolveu nos anos 1940, o reômetro (*Rheogonometer*), considerado de última geração, apesar de ser muito pesado e sem forma para os padrões de hoje (SCHRAMM, 2006). Os reômetros se tornaram, desde então, largamente utilizados em diversas linhas de pesquisa, principalmente com o avanço no campo da reologia e reometria aliadas à evolução da computação.

Entre os vários reômetros desenvolvidos para a caracterização reológica de fluidos está o primeiro reômetro desenvolvido especificamente para a caracterização de concretos, denominado BML (Figura 2.9 (a)), concebido por Heuze em 1968 e aperfeiçoado por Wallevik (1996) no conceito de cilindros coaxiais (BANFILL *et al.*, 2001).

Mais tarde, foram desenvolvidos reômetros utilizando o sistema placa-placa, como o BTRHEOM (Figura 2.9 (b)) desenvolvido por De Larrard (DE LARRARD *et al.*, 1997; HU *et al.*, 1996).

Outro reômetro que pode ser citado é o modelo IBB com sistema planetário (Figura 2.9 (c)) desenvolvido por Tattersall (1983) e modificado no Canadá por Beaupré (1994).

Desenvolvido por Pileggi e Pandolfelli (2003), o reômetro brasileiro para concreto (RCB-01) apresentou um avanço tecnológico, visto que é capaz de analisar desde o comportamento de mistura até a natureza reológica dos materiais no estado fluido (Figura 2.9 (d)).

O viscosímetro rotacional, apresentado na Figura 2.9 (e), é um reômetro comumente utilizado na caracterização reológica de pastas é o primeiro viscosímetro comercial com rotação controlada (COSTA, 2006; FREITAS, 2010; PILEGGI; PANDOLFELLI, 2003).

Figura 2.9 – Modelos de reômetro

a – Reômetro BML.

Fonte: Banfill *et al.*, 2001, p.11.

b – Reômetro BTRHEOM.

Fonte: Banfill *et al.*, 2001, p.74.

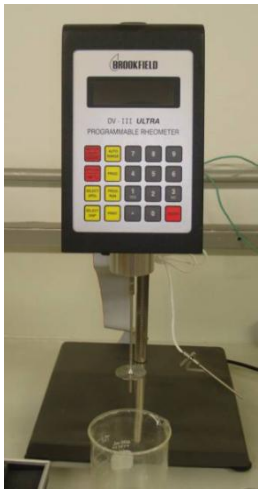
c – Reômetro IBB.

Fonte: Banfill *et al.*, 2001, p.30.

d – Reômetro RCB-01.

Fonte: Pileggi; Paldolfelli, 2003, p.10.

e – Viscosímetro Brookfield.



Fonte: Freitas, 2010, p.50.

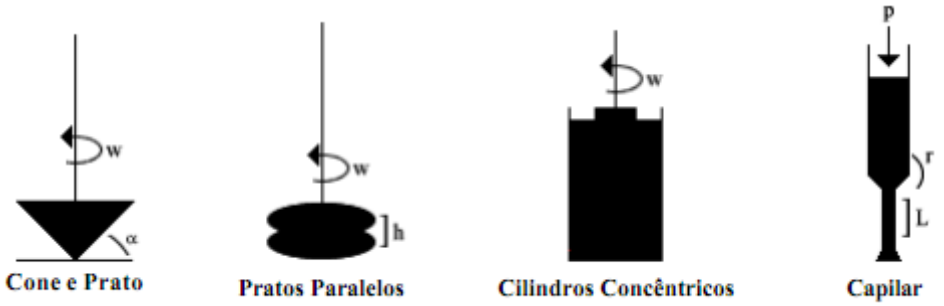
2.5.1 Tipos de reômetros

A viscosidade aparente pode ser medida de dois métodos, através do reômetro. O primeiro método é realizado por meio da variação da deformação (velocidade de cisalhamento) com medição da tensão resultante. O segundo, através da aplicação de uma tensão controlada com determinação da deformação resultante. Os equipamentos que adotam esse método são mais modernos e utilizados para medições a baixas taxas de cisalhamento (DE NOTTA, 2004).

Reômetro dinâmico de cisalhamento, por exemplo, pode ser um equipamento de teste de potencial para caracterizar os parâmetros reológicos de pasta de cimento. Algumas pesquisas relataram resultados interessantes utilizando a pasta de cimento e as pequenas amplitudes de oscilação de técnicas de corte (SCHULTZ; STRUBLE, 1993; STRUBLE; JI, 2001; STRUBLE; LEI, 1995; STRUBLE *et al*., 1998).

Os reômetros geralmente apresentam acessórios como algumas geometrias: cone e placa (cone e prato), placas paralelas (pratos paralelos), cilindros concêntricos, capilares etc. Cada geometria possui características próprias e são utilizadas de acordo com a área, o produto e os parâmetros a serem mensurados. Estes modelos de geometria tem a possibilidade de utilização de uma taxa de cisalhamento constante ou variada (SANTANA, 2005). A Figura 2.10 apresenta as geometrias comumente utilizadas em reômetros.

Figura 2.10 – Tipos de geometrias de reômetros comumente utilizadas



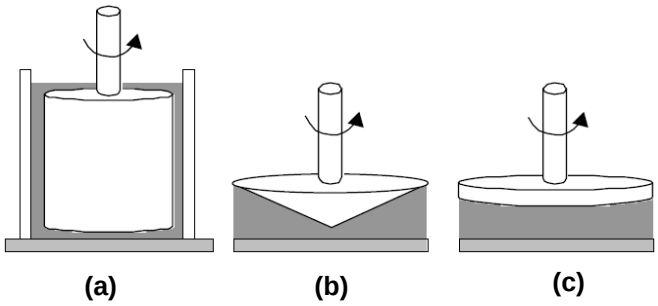
Fonte: De Notta, 2004, p.8.

Ferraris e seus colaboradores vêm avaliando pasta de cimento desde 1991, usando reômetros fluidos com geometria de placas paralelas (FERRARIS, 1992; FERRARIS, 1999). Eles modificaram os rostos das placas paralelas como serrilhada ou hachurada para evitar derrapagens. Nehdi e Rahman (2004) investigaram o efeito de ambas as placas paralelas, lisa ou serrilhada, nos parâmetros reológicos. Eles relataram que as placas paralelas lisas não representam alterações fundamentais nas propriedades reológicas, transmitidas por meio da adição de diferentes tipos de placas serrilhadas.

2.5.2 Reômetros Rotacionais

Por serem equipamentos que permitem o uso de pequenas amostras e fornecem uma medida contínua da relação taxa e a tensão de cisalhamento, é vantajosa a utilização dos reômetros rotacionais, principalmente por permitirem também a análise mais adequada de comportamentos dependentes do tempo (IZIDORO, 2007). A Figura 2.11 ilustra as principais geometrias utilizadas nos reômetros rotacionais.

Figura 2.11 – Diagrama esquemático de geometrias para reômetros rotacionais



Fonte: Hackley e Ferraris, 2001, p.18.

Os cilindros concêntricos (Figura 2.11 (a)) criam uma força tangencial como um filme delgado de líquido entre os dois cilindros, permitindo a obtenção de uma taxa de cisalhamento aproximadamente uniforme ao longo de toda a amostra. Essa uniformidade depende da distância existente entre os cilindros, pois quando distância for pequena a taxa de cisalhamento é considerada uniforme (DE NOTTA, 2004). Neste tipo de geometria, a tensão de cisalhamento pode ser medida de duas maneiras diferentes: por meio da rotação do cilindro externo a uma velocidade constante, em que a tensão de cisalhamento é medida em termos de deflexão do cilindro interno; ou por meio da rotação do cilindro interno, permanecendo o cilindro externo estacionário e medindo-se a resistência oferecida ao cilindro móvel. A variação da taxa de cisalhamento permitida com este tipo de equipamento é muito ampla, indo de 0,01 a 100.000 s^{-1} (SANTANA, 2005).

Os reômetros com cone e placa (Figura 2.11 (b)) permitem manter por toda a amostra uma taxa de cisalhamento uniforme. Uma particularidade dessa geometria é a sua utilidade no estudo de materiais sem partículas e com alta viscosidade aparente (DE NOTTA, 2004; HAMINIUK, 2005).

Ao contrário dos reômetros com cone e placa, o reômetro com placas paralelas (Figura 2.11 (c)) apresentam uma variação da taxa de cisalhamento na direção radial (DE NOTTA, 2004),

além de serem indicadas para materiais não-homogêneos e com partículas grandes (HAMINIUK, 2005).

Tanto o cone e placa quanto as placas paralelas apresentam problemas relacionados com os efeitos de borda causados por suas respectivas geometrias, provocando distorções nas medidas da viscosidade aparente, sendo mais acentuados na geometria de cone e placa. Por esse motivo, este deve ter sua utilização limitada a baixas e médias taxas de cisalhamento (0,1 a 1000 s^{-1}), enquanto os reômetros de placas paralelas podem alcançar taxas maiores (20.000 a 30.000 s^{-1}) (SANTANA, 2005).

2.6 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE PASTAS CIMENTÍCIAS

A literatura propõe alguns testes como, por exemplo, ensaio de fluxo e ensaio oscilatório (varredura de tempo e varredura de deformação) que serão apresentados a seguir, utilizados para determinar os parâmetros reológicos da pasta cimentícia, tais como tensão de escoamento, viscosidade aparente, perfil reológico do material e, ainda, os efeitos da consolidação desse material associados à hidratação do cimento (BETIOLI *et al*., 2009; CAVALCANTI, 2006; LISBÔA, 2004; SATO *et al.*, 2012; VENÂNCIO, 2008).

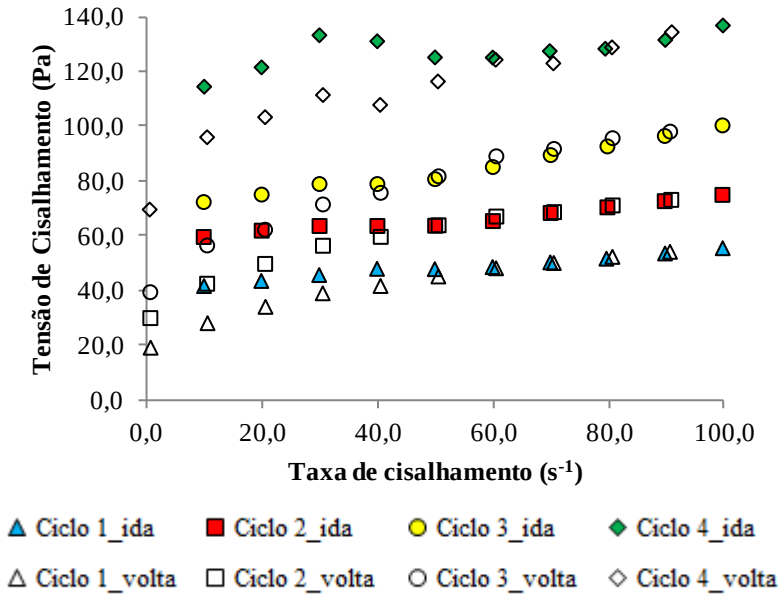
2.6.1 Ensaio de Fluxo

O ensaio de fluxo, também denominado de ensaio estático, consiste em aplicar uma tensão ou deformação no material e simular seu comportamento durante o manuseio e aplicação, possibilitando a medição da resistência do material ao esforço aplicado, ou seja, medir a tensão de cisalhamento a uma dada taxa de cisalhamento ou vice-versa.

A apresentação do comportamento reológico pode ser realizada através das curvas de tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento ou viscosidade *versus* taxa de cisalhamento. Com essas curvas, é possível determinar as propriedades reológicas do material, tais como viscosidade e tensão de escoamento.

Uma das respostas obtidas no ensaio de fluxo é a área de histerese, que consiste na área formada entre a curva de aceleração e a curva de desaceleração do gráfico de Tensão de cisalhamento *versus* Taxa de cisalhamento, como mostra um modelo do gráfico na Figura 2.12. Com o valor dessa área é possível analisar o estado de dispersão da amostra.

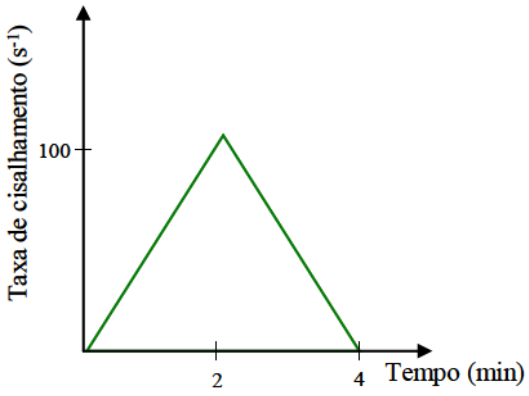
Figura 2.12 – Gráfico de Tensão de cisalhamento *vs.* Taxa de cisalhamento



Fonte: Produção da autora.

Para a obtenção do ciclo de histerese, é realizado um ensaio de rampa, que consiste em submeter a amostra a uma variação da taxa de cisalhamento crescente (curva de aceleração) por 2 minutos e, logo depois, submeter a uma desaceleração até 0, em mais 2 minutos (Figura 2.13).

Figura 2.13 – Rampa de 0 a 100 s^{-1} em 2 minutos e até 0 s^{-1} em mais 2 minutos



Fonte: Produção da autora.

A determinação da viscosidade é dada pela razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. A tensão de escoamento pode ser obtida com a utilização de modelos reológicos apropriados para o tipo de fluido em estudo, fazendo regressão dos dados obtidos. De uma maneira simplificada, esta pode ser aproximada pela extrapolação da curva de tensão *versus* taxa de cisalhamento até a taxa 0 s^{-1}.

2.6.2 Ensaio Oscilatório de Varredura de Deformação

Quando se pretende fazer uma avaliação da cinética da hidratação do cimento sem afetar a estrutura que se consolida continuamente com o tempo, indica-se o ensaio oscilatório, devido à capacidade de aplicação de pequenas deformações. Nesse ensaio, o material é submetido a uma deformação senoidal (Equação 2) e como resposta a esta solicitação obtêm-se a tensão (Equação 3) (BETIOLI, 2007).

$$\gamma(t) = \gamma_0 \times \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$\tau = \tau_0 \times \cos(\omega t + \delta) \quad (3)$$

Onde ω (rad/s) é a velocidade angular, t (s) é o tempo, γ_0 (s^{-1}) é a amplitude máxima de deformação, δ é o ângulo de fase e τ_0 (Pa) é a amplitude de tensão.

Quando a tensão de cisalhamento é dividida pela deformação, o resultado é um número complexo G* ($G^* = G' + G''$), no qual pode ser separado em dois componentes, real e imaginário. O componente real é denominado de componente elástico (G') e o componente imaginário é chamado de componente viscoso (G"). Segundo as relações apresentadas das Equações 4 e 5, estes componentes pode ser relacionados com a tensão de cisalhamento e a amplitude máxima de deformação (BETIOLI, 2009):

$$G' = \tau_0/\gamma_0 \cos\delta \quad (4)$$

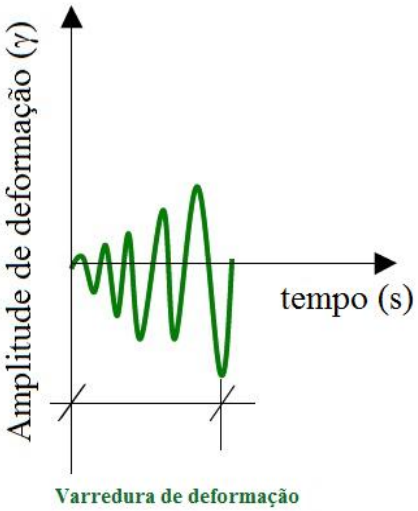
$$G'' = \tau_0/\gamma_0 \operatorname{sen}\delta \quad (5)$$

Os comportamentos-limite para os materiais são sólido hookeano ou sólido ideal, no qual a tensão está em fase com a deformação (δ = 0), e fluido newtoniano ou líquido ideal, quando a tensão está defasada em relação à deformação (δ = 90º). Grande parte dos materiais conhecidos não apresenta esses comportamentos ideais, mas uma combinação dos mesmos gera os materiais denominados viscoelásticos (0 < δ < 90º).

É necessário garantir que as medidas reológicas sejam efetuadas na região viscoelástica linear, onde o componente elástico independe da deformação aplicada, para que a viscoelasticidade de suspensões seja mensurada. Esta região restringe a possibilidade de aplicar deformação crítica sobre o material, assegurando que não ocorra alteração de sua estrutura (BETIOLI, 2007).

Esta deformação é definida por meio do ensaio de varredura de deformação, no qual a amplitude é elevada com frequência constante, como ilustrado na Figura 2.14.

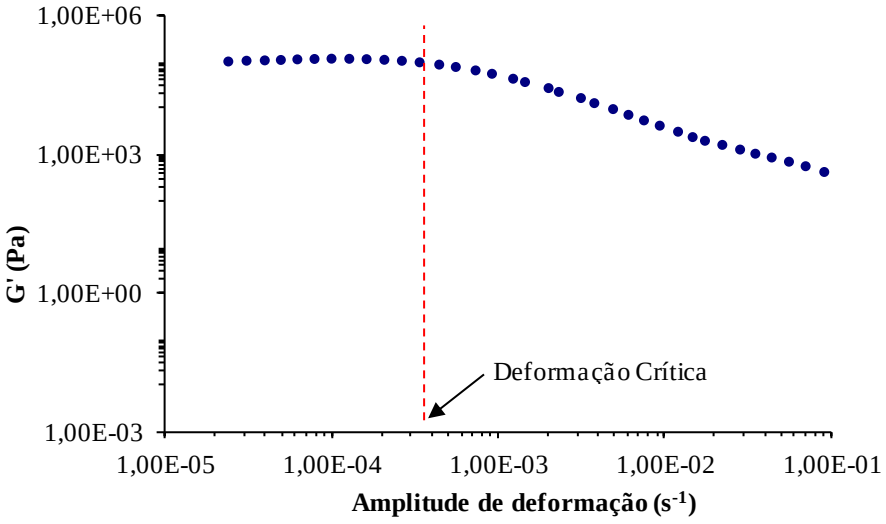
Figura 2.14 – Ensaio de varredura de deformação variando-se a amplitude de 10^{-5} a 10^{-1} com frequência constante



Fonte: Betioli, 2007, p.87.

Traça-se um gráfico de deformação *versus* componente elástico (G'), em escala logarítmica; a deformação crítica ocorre a fragmentação da estrutura. Esse momento é determinado no ponto em que a curva de G' começa a decrescer (ilustrado na Figura 2.15). Esta deformação então é fixada para realização dos ensaios oscilatórios.

Figura 2.15 – Componente elástico (G') em função da amplitude de deformação obtida a partir do ensaio de varredura de deformação



Fonte: Produção da autora.

O ensaio de varredura de deformação com frequência constante estima também o valor da tensão de escoamento (τ_0) através do produto da deformação crítica pelo G' nesta deformação, de acordo com a Equação 6.

$$\tau_0 = G' . \gamma_{crit} \quad (6)$$

Onde G' é o módulo elástico na deformação crítica. Chen e Zukoski *apud* Schultz (1991) sugeriram este modelo fazendo analogia à Lei de Hooke (Equação 7), onde a constante de proporcionalidade é o módulo de elasticidade (E).

$$\sigma = E.\ \varepsilon \qquad (7)$$

Onde σ (Pa) é a tensão aplicada, E (Pa) é o módulo de elasticidade e ε (adimensional) é a deformação elástica.

2.7 INFLUÊNCIA DO TIPO MIXER E PROCEDIMENTO DE MISTURA

Estudos reológicos de pastas cimentícias utilizando reômetros rotacionais e conceitos de reologia são ainda incipientes no Brasil. Dessa forma, não há normas brasileiras que definam a metodologia para fabricação de amostras e procedimentos de ensaios. Várias pesquisas de âmbito nacional e internacional apontam a necessidade de estudos que definam o procedimento de mistura de pastas cimentícias antes da execução de ensaios reológicos. De uma maneira geral, os estudos apontam que a utilização de misturadores de alta taxa de cisalhamento promove melhor homogeneização da amostra dando resultados experimentais mais consistentes.

A primeira utilização de um misturador de alta velocidade de cisalhamento para a formação de pasta de cimento foi relatada por Kantro (1980) ligada ao desenvolvimento do seu ensaio de cone *mini-slump*. Desde Kantro, muitos pesquisadores têm utilizado este método de mistura para pasta de cimento nos anos posteriores.

Vários investigadores têm utilizado um liquidificador como um misturador de alta velocidade de cisalhamento (até 10.000rpm) e um misturador de pás para baixa velocidade de cisalhamento (100rpm) em suas pesquisas reológicas de pasta de cimento (WILLIAMS *et al.*, 1999). Eles mencionaram que as pastas de cimento misturadas no liquidificador representam com mais precisão o desempenho do concreto quando os resultados do parâmetro reológico foram comparados com um teste de abatimento de tronco de cone.

As pesquisas mencionadas anteriormente confirmam um estudo realizado por Helmuth (1987) indicando que, durante a mistura do concreto, a pasta de cimento é cisalhada com uma energia e taxa mais aproximada da reproduzida no liquidificador em oposição à baixa taxa de cisalhamento do misturador de pás. Portanto, é essencial utilizar um misturador de alto

cisalhamento para preparar a pasta de cimento, a fim de medir os parâmetros reológicos representativos (YANG; JENNINGS, 1995).

Ao avaliarem pastas com polímero vinílico, Atzeni *et al.* (1989) observaram que a presença deste polímero causou um enrijecimento da pasta cimentícia, procedendo em um aumento da tensão de escoamento do sistema. Este comportamento, afirmam os autores, pode ter ocorrido devido à baixa energia aplicada durante a mistura dos materiais, pois foi realizada manualmente e insuficiente para dispersar o sistema. Na argamassa, entretanto, a mistura foi realizada com alta velocidade resultando na diminuição da tensão de escoamento.

Em sua pesquisa, Williams *et al.* (1999) utilizaram um misturador planetário de massas Hobart modelo N50 para analisar amostras de pasta cimentícia. Variou-se a velocidade do misturador em 140 e 285rpm, com um tempo total de mistura de 5 minutos e 30 segundos. Além disso, os autores realizaram uma série de testes de pré-cisalhamento da amostra após a mistura no próprio reômetro para aumentar o grau de dispersão das partículas antes do ensaio.

Já Betioli (2009), em sua análise de propriedades de pastas cimentícias, utilizou para a preparação de suas amostras um misturador IKA RW 20 DZM.n, mantendo a velocidade do misturador em 300rpm por um tempo total de mistura de 5 minutos.

Mukhopadhyay e Jang (2009) também estudaram a pasta de matriz cimentícia, mas o seu misturador foi um liquidificador com altas velocidades de mistura. Eles escolheram as velocidades de 3000, 6000, 8000, 10000, 13000rpm, variando-as em um tempo de 1 minuto e 40 segundos de mistura.

Para estudar a reologia da argamassa, os equipamentos argamassadeira de eixo horizontal (capacidade de 60 litros) e betoneira (capacidade de 120 litros) foram empregados por Romano *et al.* (2009). No trabalho não é mencionada velocidade de mistura utilizada, mas as amostras foram submetidas a 3 tempos de mistura distintos: 2, 4 e 6 minutos.

Em outra pesquisa de Romano *et al.* (2011), foi utilizado o misturador Labortechnik RW20-IKA para a avaliação reológica da pasta de cimento, variando as velocidades em 300, 600 e 9400rpm por 9 minutos e 30 segundos totais de mistura.

França *et al.* (2011; 2012), em suas duas pesquisas utilizaram o reômetro rotacional planetário desenvolvido na (Poli-USP) para a análise de argamassas. Em 2011, utilizaram uma velocidade constante de 500rpm para 4 tempos distintos: 20, 50, 90 e 300 segundos. Mas em

2012, a velocidade diminuiu para 126,5rpm para outros 4 tempos diferentes: 17, 47, 87 e 297 segundos.

No ano seguinte, França *et al.* (2013) também fez uso do misturador planetário de massas Hobart modelo N50. Nessa pesquisa, a argamassa é o material de estudo com velocidade constante de 62rpm por 60 segundos totais de tempo de mistura.

Desse modo, não há um consenso sobre o procedimento de mistura a ser utilizado para a fabricação de pastas cimentícia. Há uma necessidade de avaliar e obter um processo de mistura ideal realizando diversos testes variando o tempo de mistura e a taxa de cisalhamento para a obtenção de uma pasta cimentícia homogênea e garantir a dispersão completa das partículas antes do ensaio.

Capítulo 3

Programa Experimental, Materiais e Métodos

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as etapas metodológicas para o desenvolvimento da pesquisa, as variáveis do problema, os materiais que foram utilizados e sua caracterização, os métodos adotados para a produção da pasta cimentícia e os ensaios experimentais realizados neste trabalho.

3.1 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

O desenvolvimento seguiu as seguintes etapas metodológicas:

I. Levantamento bibliográfico de estudos sobre ensaios reológicos com pasta de cimento.
II. Levantamento bibliográfico de estudos sobre utilização e aproveitamento do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em concreto e em pasta cimentícia;
III. Levantamento bibliográfico sobre caracterização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais e caracterização do resíduo;
IV. Determinação dos parâmetros a serem estudados e métodos de ensaio a serem utilizados.
V. Determinação de um método para preparação das amostras de pasta cimentícia;
VI. Realização dos ensaios experimentais;
VII. Análise de resultados.

3.2 VARIÁVEIS DO PROBLEMA

3.2.1 Variáveis dependentes

- Tensão de cisalhamento;
- Tensão de escoamento;
- Viscosidade;
- Área de histerese;
- Componente elástica do Módulo complexo.

3.2.2 Variáveis independentes

- Relação água/cimento (045; 0,55; 0,65);
- Percentual de adição do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (0%, 5%, 10% e 15%) em relação à massa de cimento;
- Taxa de cisalhamento.

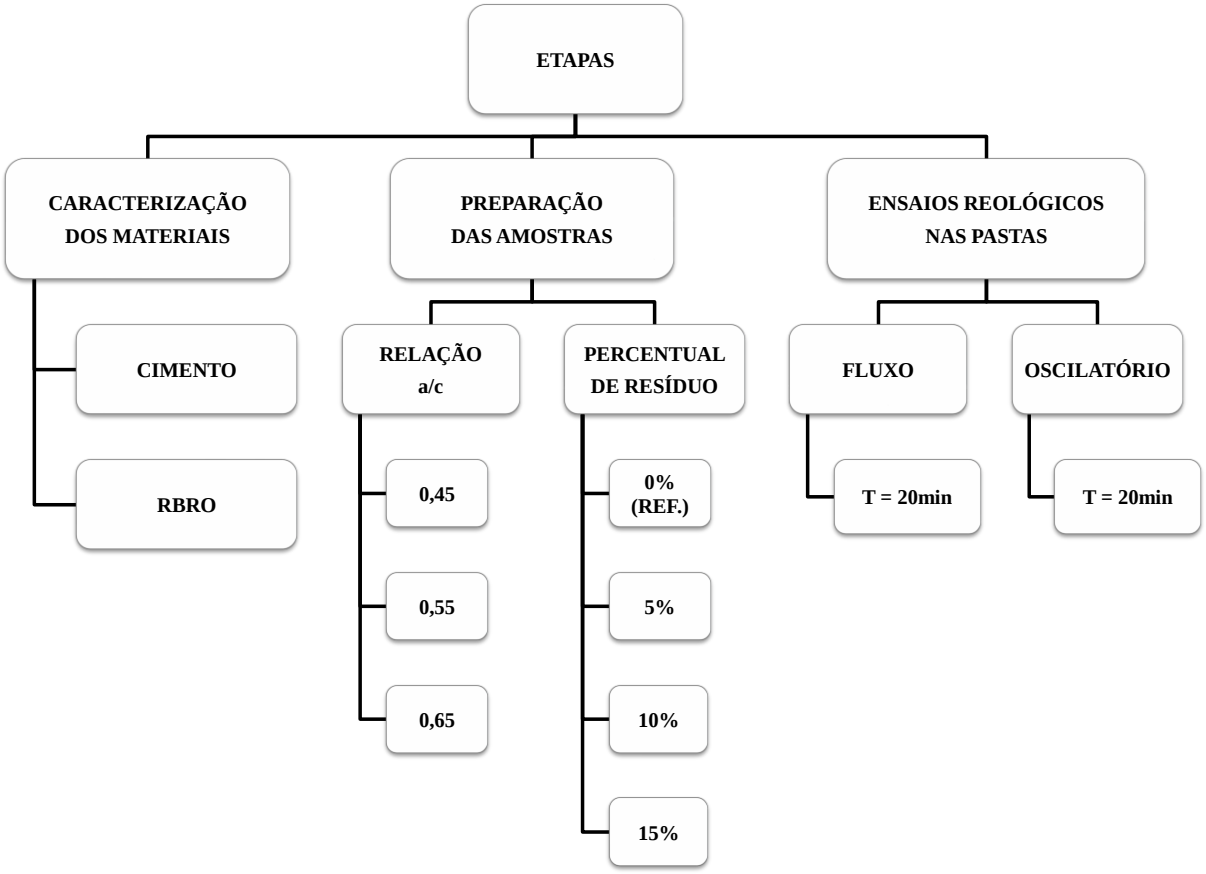
3.2.3 Variáveis de controle

- Tipo do cimento;
- Procedimento de moagem do resíduo e granulometria constantes;
- Procedimento de mistura;
- Tempo de mistura;
- Tempo de hidratação (20min);
- Temperatura de ensaio (ambiente).

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A Figura 3.1 apresenta o programa experimental com as etapas de pesquisa.

Figura 3.1 – Etapas do Programa Experimental



Fonte: Produção da autora.

3.4 MATERIAIS

Para a confecção das pastas cimentícias, foram utilizados materiais adquiridos na região da Grande Vitória, ES. Entre eles estão a água, o Cimento Portland e o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO).

3.4.1 Água

A água utilizada foi fornecida em condições de potabilidade e da forma natural diretamente da rede de água da concessionária.

3.4.2 Cimento

Foi utilizado nesta pesquisa o cimento classificado como cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) de acordo com a norma NBR 5733 (ABNT, 1991). Optou-se pelo uso desse cimento por ser um aglomerante que apresenta um alto desempenho e possuir poucas adições entre os disponíveis no mercado capixaba que possam, posteriormente, reagir com o resíduo RBRO. O cimento utilizado foi doado por uma empresa situada no município da Serra – ES. Depois de recebido, os sacos de cimento foram ensacados no plástico, empilhados sobre pallets e armazenados na câmara seca com temperatura e umidade controladas, para manter suas propriedades físicas e químicas.

A caracterização física foi realizada no laboratório de ensaios em materiais de construção (LEMAC/UFES), apresentado na Tabela 3.1 e sua caracterização química referente ao lote de cimento utilizado foi fornecida pelo fabricante (Tabela 3.2).

Tabela 3.1 - Caracterização física do cimento CP V ARI

(continua)

PROPRIEDADE		RESULTADO	MÉTODO DE ENSAIO	LIMITE
Massa específica (g/cm3)		2,823	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.
Finura	Área específica - Blaine (m^2/kg)	4459	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	≥ 3000
	Material retido peneira 200 (%)	0,1	NBR 9202 (ABNT, 1985)	N.E.
Tempos de Pega	Início de Pega (min)	128	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≥ 60
	Fim de Pega (min)	181	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≤ 600
Resistência à Compressão	1 dia (MPa)	29,4	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 14
	3 dia (MPa)	42,2	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 24
	7 dia (MPa)	46,0	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 34

Obs.: Limites estabelecidos com base na NBR 5733 (ABNT, 1991);
N.E. = Não estabelecido.

Fonte: Produção da autora.

Tabela 3.1 - Caracterização química do cimento CP V ARI

(conclusão)

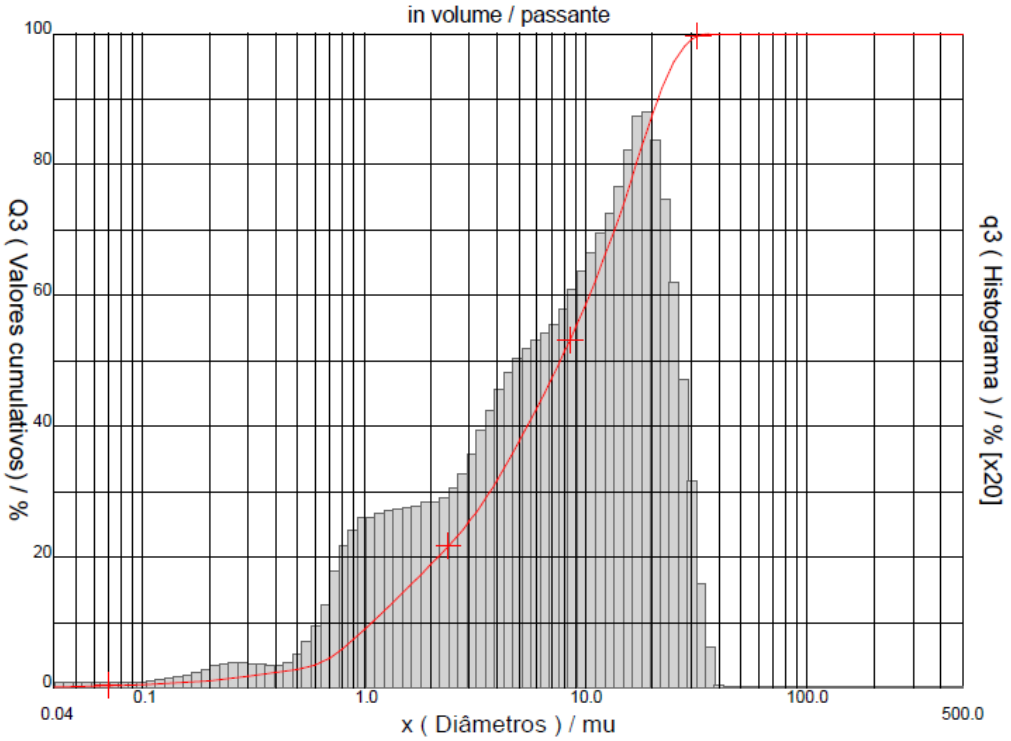
Composição Química	Perda ao fogo – PF (%)	3,84	NBR NM 18 (ABNT, 2001)	≤ 4,5
	SiO_2 (%)	18,65	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	CaO (%)	63,72	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	MgO (%)	0,75	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Al_2O_3 (%)	4,91	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Fe_2O_3 (%)	2,97	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	K_2O (%)	0,80	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	SO_3 (%)	2,87	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 4,5
	C_3A teórico	7,66	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Resíduo Insolúvel – RI (%)	0,75	NBR NM 15 (ABNT, 2012)	≤ 1,0

Obs.: Limites estabelecidos com base na NBR 5733 (ABNT, 1991);
N.E. = Não estabelecido.

Fonte: Fornecido pelo fabricante.

A distribuição granulométrica do cimento foi realizada por meio de granulômetro a laser modelo 1064 – CILAS no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização e Materiais (LDCM) do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial de Santa Catarina (SENAI/SC). A Figura 3.2 mostra a curva de distribuição granulométrica do cimento.

Figura 3.2 - Distribuição Granulométrica do cimento CP V ARI



Fonte: Relatório técnico do SENAI/SC, 2013.

Através do gráfico de distribuição granulométrica é possível observar que os grãos do cimento apresentam valores D_{10} na ordem de 1,08µm, D_{50} na faixa dos 7,68µm, D_{90} com 21,15µm, 100% está abaixo de 36,00 µm, com seu valor médio para tamanho dos grãos na ordem de 9,64µm.

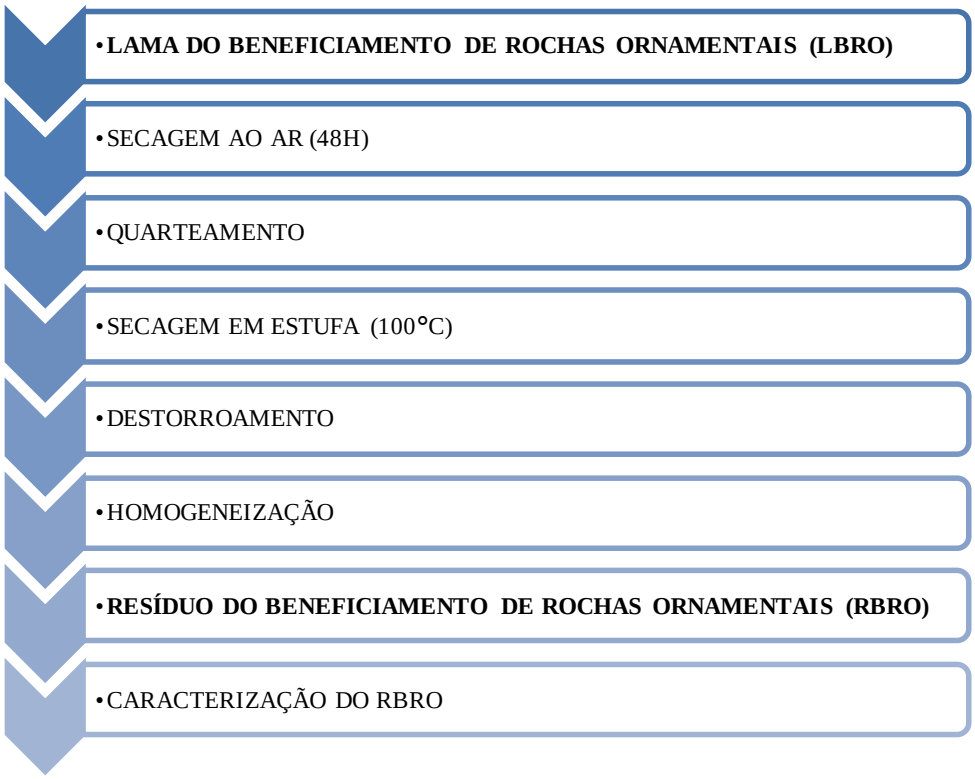
3.4.3 Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO)

O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais é fornecido sob a forma de lama, sem o tratamento prévio, foi doada por uma serraria situada no município da Serra – ES. A lama fornecida é proveniente do desdobramento dos blocos nos teares de fios diamantados e do polimento das chapas de rochas.

A coleta desse material foi em diferentes depósitos da própria serraria, seguindo a norma NBR 10007 (ABNT, 2004), e armazenados em tonéis plásticos de 20 litros para transportar até o LEMAC/UFES.

O material apresentava alta umidade (38,3%), sendo necessária uma preparação prévia para a utilização desse resíduo como adição e/ou substituição nas pastas de cimento estudadas, apresentada na Figura 3.3, para melhor amostragem e obtenção de uma mistura homogênea. Foram realizados também ensaios para caracterização do resíduo.

Figura 3.3 – Procedimento de tratamento para preparação e utilização do resíduo

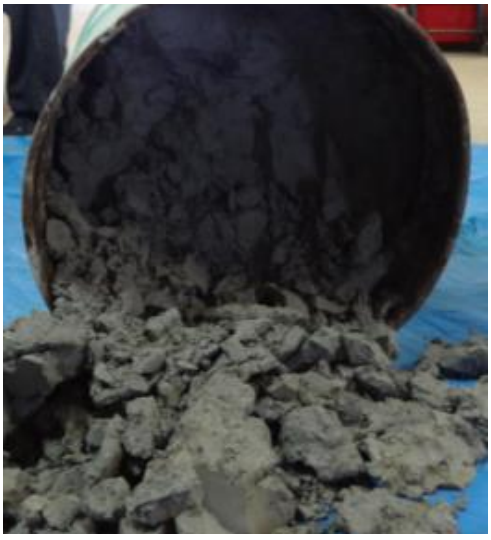


Fonte: Produção da autora.

3.4.3.1 Tratamento da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais

Primeiramente, a lama proveniente somente dos teares de fios diamantados passou pelo processo de tratamento para a utilização. O material foi (b) espalhado sobre a lona limpa em uma superfície plana para secagem ao ar, por 48 horas. Em seguida, (c) o resíduo foi quarteado e amostras parciais foram coletadas de duas partes opostas diagonalmente, Após a coleta, (d) as amostras foram distribuídas em tabuleiros e secas em estufa por mais 24 horas, de acordo com a norma NBR 26 (ABNT, 2009), como apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Processo de secagem do resíduo



(a)
Material úmido na condição recebida

(b)
Secagem inicial ao ar livre (48h)

(c)
Quarteamento

(d)
Secagem em estufa

Fonte: Produção da autora.

Devido ao grande volume do material, após o seu resfriamento o resíduo foi destorroado em duas etapas: primeiro, utilizando a betoneira e posteriormente, o destorroamento foi feito manualmente para desfazer os torrões menores (Figura 3.5, (a) e (b)). Em seguida, a homogeneização foi realizada através da mistura do volume do resíduo na lona, como mostra a Figura 3.5 (c).

Figura 3.5 – Processo de destorroamento e homogeneização

(a)
Destorroamento do resíduo na betoneira

(b)
Preparação para destorroamento

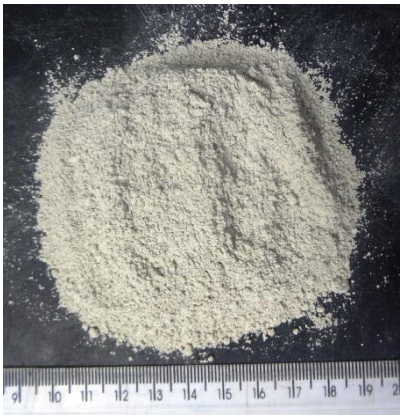
(c)
Material sendo homogeneizado

Fonte: Produção da autora.

A Figura 3.6 apresenta o resíduo depositado em sacos plásticos e armazenado na câmara seca até o momento da utilização, bem como a aparência final do RBRO ao final do processo de tratamento.

Figura 3.6 - Amostras de RBRO em sacolas e aparência final

(a)
Amostra de RBRO em sacolas



(b)
Aparência do RBRO

Fonte: Produção da autora.

3.4.3.2 Caracterização do RBRO

Para uma melhor descrição e progresso no estudo de um material, se faz necessário um conhecimento aprofundado das composições do material e suas características. Por essa razão, o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) foi submetido a diversos ensaios de caracterização para análise de suas características físicas, químicas, mineralógicas, microestrutural e também do seu índice de atividade pozolânica, descritos no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Ensaios utilizados para a caracterização dos materiais

FÍSICA	QUIMICA	MINERALÓGICA	MICROESTRUTUTAL	POZOLANICIDADE
Massa específica Massa unitária Granulometria Superfície específica Módulo de Finura	Fluorescência de raios X	Difração de raios X	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	Índice de pozolanicidade com o cimento Índice de pozolanicidade com a cal

Fonte: Produção da autora.

3.4.3.2.1 Caracterização Física

Os ensaios de caracterização física do RBRO foram realizados no LEMAC/UFES, descritos no Quadro 3.2.

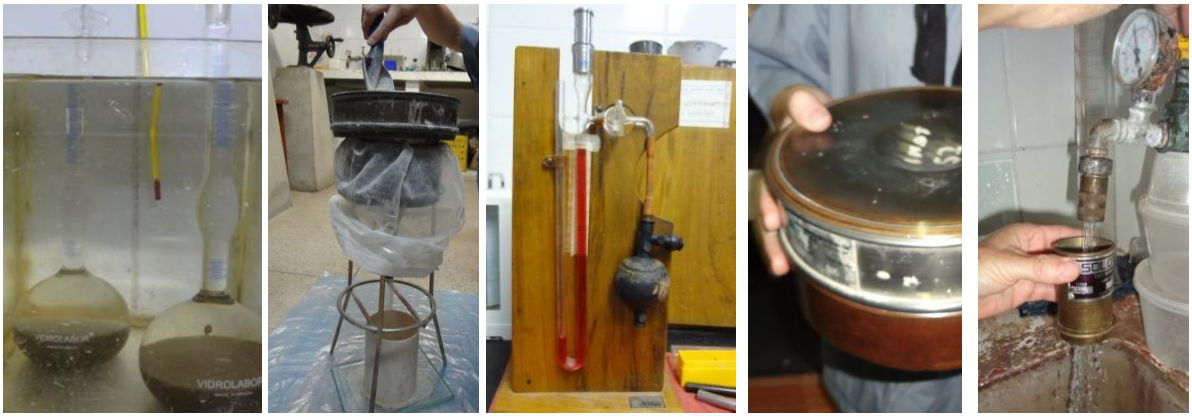
Quadro 3.2 – Ensaios para caracterização física do RBRO

MÉTODO DE ENSAIO	CARACTERÍSTICA
NBR NM 23 (ABNT,2001)	Massa Específica
NBR 12127 (ABNT, 1991)	Massa Unitária
NBR NM 24 (ABNT, 2002)	Teor de Umidade
NBR NM 76 (ABNT, 1998)	Superfície específica por meio do método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)
NBR 11579 (ABNT, 2012)	Finura por meio da peneira 0,075mm (nº 200)
NBR 9202 (ABNT,1985)	Finura por meio da peneira 44 μm (nº 325)

Fonte: Produção da autora.

A massa específica foi determinada através do frasco de Le Chatelier, procedimento aplicado ao cimento Portland e outros materiais finos em pó (Figura 3.7 (a)). O Método para verificação de massa unitária estabelecido para o gesso, que se adequada a materiais em pó, foi o escolhido para constatação da massa unitária do resíduo, conforme aparato experimental da Figura 3.7 (b). A análise de finura foi executada pelo Método de Blaine (Figura 3.7 (c)) e pelo percentual retido nas peneiras nº 200 e nº 325, conforme a Figura 3.7 (d) e (e), respectivamente.

Figura 3.7 – Ensaio de massa específica do resíduo.



(a) Ensaio de massa específica (Frasco de Le Chatelier) | (b) Ensaio de massa unitária (Método p/ gesso) | (c) Ensaio de finura (Método de Blaine) | (d) Ensaio de finura (Peneira nº 200) | (e) Ensaio de finura (Peneira nº 325)

Fonte: Uliana, 2013, p.84.

O procedimento estabelecido para materiais pozolânicos avaliou o teor de umidade do RBRO, com verificação de variação da massa de amostras de 1,0 g após 24 horas em estufa.

Para a obtenção da distribuição granulométrica do resíduo, foi empregada a granulometria a laser que permite precisão necessária pela presença de grãos finos menores que 0,075mm. O equipamento utilizado foi o granulômetro a laser da marca Cilas, do Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais do SENAI/SC.

3.4.3.2.2 Caracterização Química

A caracterização química do RBRO foi preparada por meio da técnica de espectrometria por fluorescência de raios X (FRX) pelo Laboratório Químico e de Monitoramento Ambiental da empresa Vale. O método baseia-se no princípio de que a absorção dos raios emitidos produz uma radiação conhecida por fluorescência, ocasionando a excitação dos átomos do material estudado. Essa radiação proporciona a identificação de cada elemento químico em função do comprimento de onda dos raios emitidos.

3.4.3.2.3 Caracterização Mineralógica

A técnica mais usual para a identificação das fases mineralógicas cristalinas presentes em um material é a técnica de difração de raio X (DRX), utilizada nessa pesquisa para a caracterização mineralógica do RBRO.

Antes de utilizar a técnica, o material foi moído com a utilização de grau e pistilo até passar pela peneira nº 200. Em seguida, foi acondicionado em porta-amostras de alumínio para análise no equipamento XRD 6000 da Shimadzu, com a técnica de DRX no Laboratório de Materiais Carbonosos e Plasmas Térmicos (LMC/LPT) do Centro de Ciências Exatas (CCE) da UFES.

A análise funciona com a projeção de um feixe de raios X na estrutura cristalina e as medidas dos ângulos de difração dos raios emergentes podem elucidar a distância dos átomos no cristal identificando uma série de materiais de estrutura cristalina. Os ângulos dos feixes resultantes da difração foram lidos pelo equipamento e processados pelo s software do difratômetro, a partir do computador conectado a ele conforme Figura 3.8, gerando os difratogramas, que calcula e mostra as prováveis configurações dos átomos no cristal. O banco de dados do *Joint Committee for Powder Diffraction Standards* (JCPDS) do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) foi utilizado para interpretar os gráficos.

Figura 3.8 – Ensaio de difração de raios X

(a) Difratômetro

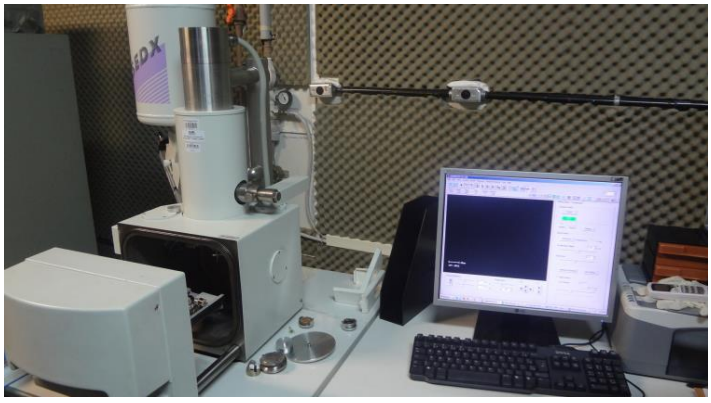
(b) Computador com software

Fonte: Uliana, 2013, p.86.

3.4.3.2.4 Caracterização Microestrutural

Para a produção de micrografias do RBRO foram utilizados os equipamentos EVO 40XVP da empresa ZEISS do Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais (LCSM - UFES) e o equipamento Shimadzu do Laboratório de Materiais Carbonosos e Plasmas Térmicos (LMC/LPT - UFES), conforme a Figura 3.9.

Figura 3.9 – Microscópio eletrônico de varredura



Fonte: Uliana, 2013, p.87.

Através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) acoplado o sistema espectroscopia por energia dispersiva (EDS), imagens microscópicas são geradas com aparência tridimensional que possibilitam a análise visual da forma e tamanho dos grãos. A análise fornece informações estruturais e composição química das partículas do resíduo.

3.4.3.2.5 Atividade Pozolânica

Para verificar a atividade pozolânica do resíduo, realizaram-se os ensaios normatizados pela NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de

atividade pozolânica com a cal (ABNT, 1992) e NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com o cimento (ABNT, 1992).

Apesar da norma NBR 5752 (ABNT, 2012) solicitar a utilização do cimento Portland CP I, o mesmo não foi possível ser adotado por não ter sido encontrado no mercado capixaba. Por essa razão, foi utilizado o cimento Portland CP V ARI para a realização do ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento Portand, com massa específica de 3,1 g/m³, por ser o tipo de cimento com menor teor de adições.

Conforme determina a norma NBR 5751 (ABNT, 1992), a cal utilizada foi a CH I com massa específica igual a 2,07 g/cm^3 e verificada no LEMAC de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001).

3.5 TESTE PARA OBTENÇÃO DO PROCESSO DE MISTURA

Como apresentado no Capítulo 2.7, é fundamental a definição de um procedimento de mistura para que a amostra esteja homogênea antes da execução do ensaio. De acordo com alguns pesquisadores, o tempo de mistura é um dos fatores que influenciam na homogeneização da pasta. França *et al.* (2011; 2012) mostraram em suas pesquisas que amostras com maior tempo de mistura demonstram mais eficiência, produzindo argamassas mais fluidas e estáveis.

Assim, para a determinação do procedimento de mistura, a presente pesquisa seguiu os seguintes passos. Inicialmente, foi definida uma nomenclatura para cada amostra a ser estudada para distinguir com mais facilidade, começando pela pasta de cimento sem resíduo (pasta de referência), seguida de mais três porcentagens de adição do resíduo com relação à massa de cimento (5%; 10%; 15%) e três relações água/cimento distintas (0,45; 0,55; 0,65).

As proporções de resíduo e água-cimento utilizadas teve como base o trabalho de Soares (2014), que estudou a influência da adição de resíduos nas propriedades de trabalhabilidade e mecânicas de concretos no estado fresco e endurecido com ênfase na análise da durabilidade de concretos. De forma a correlacionar os resultados encontrados por Soares (2014) com os apresentados neste estudo, manteve-se então as mesmas relações a/c e percentual de resíduos.

De acordo com a Tabela 3.2, C significa cimento, R é o resíduo seguido do número percentual adicionado e último número é a relação água/cimento.

Tabela 3.2 – Nomenclatura das amostras

Amostra	Teor de resíduo RBRO (%)	Relação a/c
C REF 45	0	0,45
C R5 45	5	
C R10 45	10	
C R15 45	15	
C REF 55	0	0,55
C R5 55	5	
C R10 55	10	
C R15 55	15	
C REF 65	0	0,65
C R5 65	5	
C R10 65	10	
C R15 65	15	

Fonte: Produção da autora.

Para uma melhor análise do teste para a obtenção do processo de mistura, foi escolhida a pasta cimentícia com maior viscosidade, menor relação água/cimento e maior percentual de resíduo RBRO (C R15 45), pois seria a pasta com maior dificuldade para homogeneizar.

Então, foram realizados diversos testes para analisar e definir qual o melhor procedimento de mistura para preparação das amostras. Teve como base uma modificação do método de mistura desenvolvido pela *Texas Transportation Institute*, baseado no estudo realizado pela *Portland Cement Association* e mais tarde pelo *National Institute of Standards and Technology* (MUKHOPADHYAY; JANG, 2008). Após esse processo, as amostras foram submetidas ao ensaio de fluxo de 3 ciclos no reômetro e analisadas através do gráfico gerado pelo ensaio.

Assim como os autores utilizaram um misturador mecânico de alto cisalhamento, foi utilizado nessa pesquisa um liquidificador da marca Oster, modelo 6855 de 14 velocidades e 450 watts (Figura 3.10). Possui lâminas de aço inoxidável, copo de vidro seguro contra choque térmico testado para resistir mudanças extremas de temperatura.

Figura 3.10 – Liquidificador utilizado como misturador

Fonte: Produção da autora.

As massas dos materiais foram estabelecidas numa balança eletrônica digital de precisão de 0,01g, apresentada na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Balança eletrônica digital

Fonte: Produção da autora.

3.5.1 Determinação do Tempo de Mistura

O primeiro fator a ser definido foi o tempo de mistura no liquidificador. Neste estudo foram analisados dois tempos de mistura efetiva (liquidificador ligado): (a) 100 segundos e (b) 300 segundos. O procedimento de mistura a ser seguido foi o mesmo para os dois tempos, modificando apenas o tempo que o liquidificador fica ligado e utilizando somente as duas primeiras velocidades do liquidificador.

Primeiramente, pesou-se separadamente a quantidade de água, cimento e resíduo com aproximação de 1,0g. Em seguida, foi colocado no liquidificador primeiro o cimento e o resíduo e depois se acrescentou a água. Após a junção dos materiais, o liquidificador foi

ligado na primeira velocidade por (a) 30 segundos ou (b) 90 segundos a depender dos tempos de mistura efetiva de 100 segundos ou 300 segundos, respectivamente, e depois o equipamento foi desligado por 60 segundos para limpar manualmente as paredes do copo do liquidificador.

A seguir, o aparelho foi ligado novamente na segunda velocidade por (a) 30 segundos ou (b) 90 segundos e desligado em seguida por mais 60 segundos para a limpeza do copo do liquidificador. Por fim, ligou-se o equipamento e a pasta foi misturada por (a) 40 segundos ou (b) 120 segundos na segunda velocidade de forma a obter um a pasta homogênea.

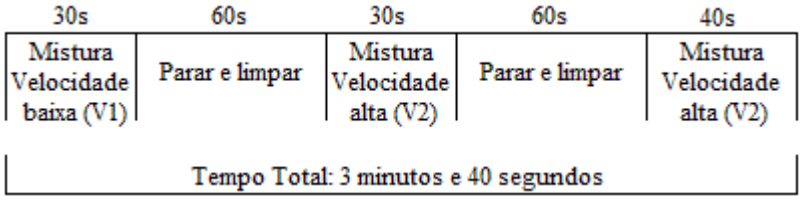
O tempo total do processo de mistura (a) foi de 3 minutos e 40 segundos, para o procedimento com 100 segundos de mistura efetiva, ou seja, com o liquidificador ligado (Tabela 3.4 e Figura 3.12).

Tabela 3.3 – Processo de mistura dos materiais de 100 segundos

Procedimento	Tempo inicial (s)	Tempo gasto (s)	Tempo final (s)
Homogeneizar o cimento e o resíduo	0	4	4
Junção de cimento e resíduo com a água	4	1	5
Mistura com o liquidificador (velocidade 1)	5	30	35
Limpeza e espera	35	60	95
Mistura com o liquidificador (velocidade 2)	95	30	125
Limpeza e espera	125	60	185
Mistura com o liquidificador (velocidade 2)	185	40	225

Fonte: Produção da autora.

Figura 3.12 – Esquema do processo de mistura de 100 segundos



Fonte: Produção da autora.

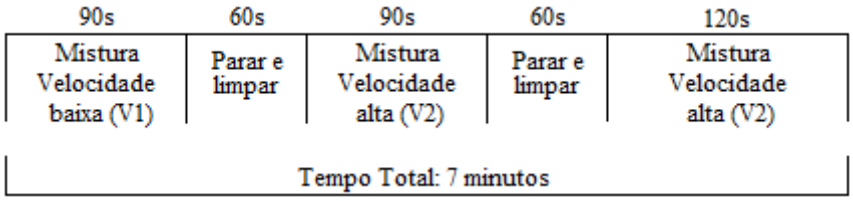
E o tempo total do processo de mistura (b) foi de 7 minutos, para o procedimento com 300 segundos de mistura efetiva, como mostra a Tabela 3.5 e a Figura 3.13.

Tabela 3.4 – Processo de mistura dos materiais de 300 segundos

Procedimento	Tempo inicial (s)	Tempo gasto (s)	Tempo final (s)
Homogeneizar o cimento e o resíduo	0	4	4
Junção de cimento e resíduo com a água	4	1	5
Mistura com o liquidificador (velocidade 1)	5	90	95
Limpeza e espera	95	60	155
Mistura com o liquidificador (velocidade 2)	155	90	245
Limpeza e espera	245	60	305
Mistura com o liquidificador (velocidade 2)	305	120	425

Fonte: Produção da autora.

Figura 3.13 – Esquema do processo de mistura de 300 segundos

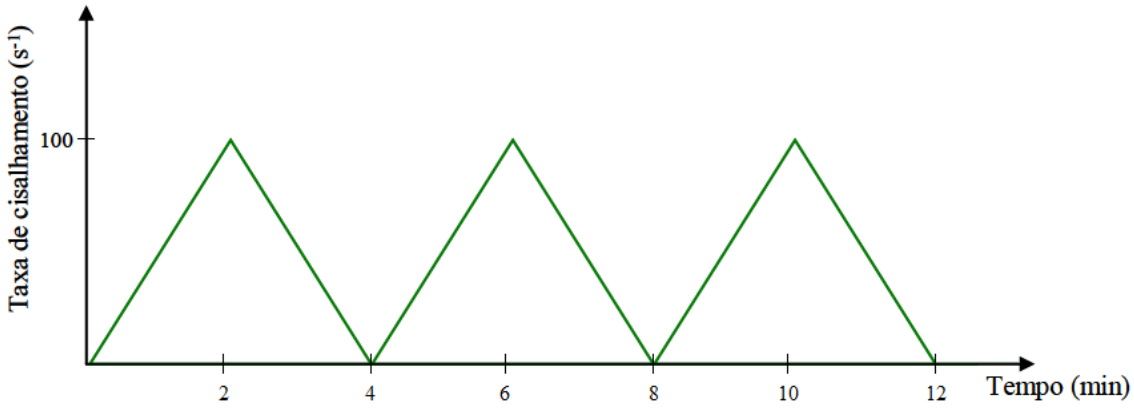


Fonte: Produção da autora.

3.5.2 Ensaio de Fluxo de 3 Ciclos

Imediatamente após cada processo de mistura (a) e (b), foi realizado o ensaio de fluxo com 3 ciclos seguidos (aceleração de 0 a 100s^{-1} por 2 minutos e desaceleração de 100 a 0s^{-1} por mais 2 minutos, totalizando em 12 minutos de ensaio), como mostra a Figura 3.14. O que se espera é que após cada ciclo, se obtenha o mesmo resultado para os parâmetros reológicos mostrando assim a eficiência do procedimento de mistura para dispersão das partículas. Caso contrário, esta dispersão se daria durante o ensaio, o que não é desejado.

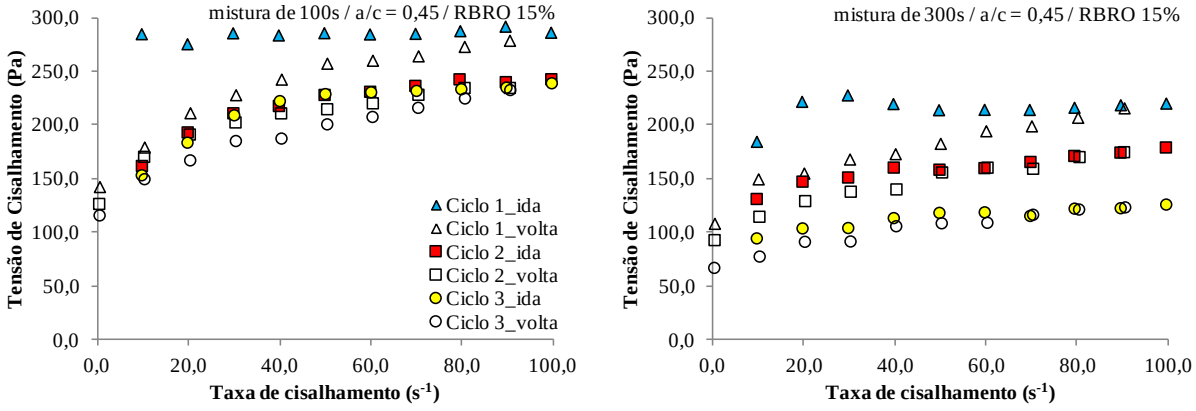
Figura 3.14 – Rampa de aceleração e desaceleração de 3 ciclos



Fonte: Produção da autora.

Por meio do gráfico de tensão *versus* taxa de cisalhamento (Figura 3.15 (a) e (b)), gerado pelo ensaio realizado no reômetro, é possível calcular a área de histerese (diferença de tensão entre a curva de aceleração e a curva de desaceleração), que indica o estado de dispersão da amostra, apresentados na Tabela 3.6.

Figura 3.15 – Gráficos de **tensão de cisalhamento *vs*. taxa de cisalhamento das misturas de (a) 100 segundos e (b) 300 segundos**



(a) (b)

Fonte: Produção da autora.

Tabela 3.5 – Área de histerese das amostras de mistura de 100 e 300 segundos

Tempo de Mistura (s)	100	300
Ciclo 1	3.035,31	3.549,91
Ciclo 2	468,65	1.410,36
Ciclo 3	1.482,37	1.076,52

Fonte: Produção da autora.

Foi observado que, apesar de os valores das tensões de cisalhamento da amostra de 100 segundos serem maiores que os da mistura de 300 segundos, a área de histerese encontrada para os dois tempos de mistura não variaram significantemente. No Ciclo 2 pode ter ocorrido um erro durante o ensaio tornando a amostra mais homogênea e ocasionando uma menor área de histerese. Apesar do erro, o tempo de mistura adotado nesta pesquisa foi de 100 segundos.

No entanto, mesmo com esses tempos de misturas, percebeu-se que os valores encontrados em cada ciclo eram ainda dispersos, não observando uma constância de valores das áreas de histerese. Foi então adotado, além do tempo de mistura de 100s, um pré-cisalhamento executado no reômetro, como proposto por Williams *et al.* (1999), para quebrar as estruturas das partículas antes do ensaio. Segundo estes autores, o pré-cisalhamento funciona como um misturador de alto-cisalhamento, o que torna a pasta mais homogênea.

3.5.3 Determinação da utilização de pré-cisalhamento no reômetro

A segunda definição foi o emprego de um pré-cisalhamento feito pelo reômetro antes de cada ensaio. Utilizou-se a mistura efetiva de 100 segundos no liquidificador e antes de cada ensaio de 3 ciclos a amostra era submetida a um pré-cisalhamento. Foram realizados vários procedimentos de pré-cisalhamento da mistura (PM), variando o tempo e a taxa de cisalhamento para uma análise mais detalhada, descriminados na Tabela 3.7.

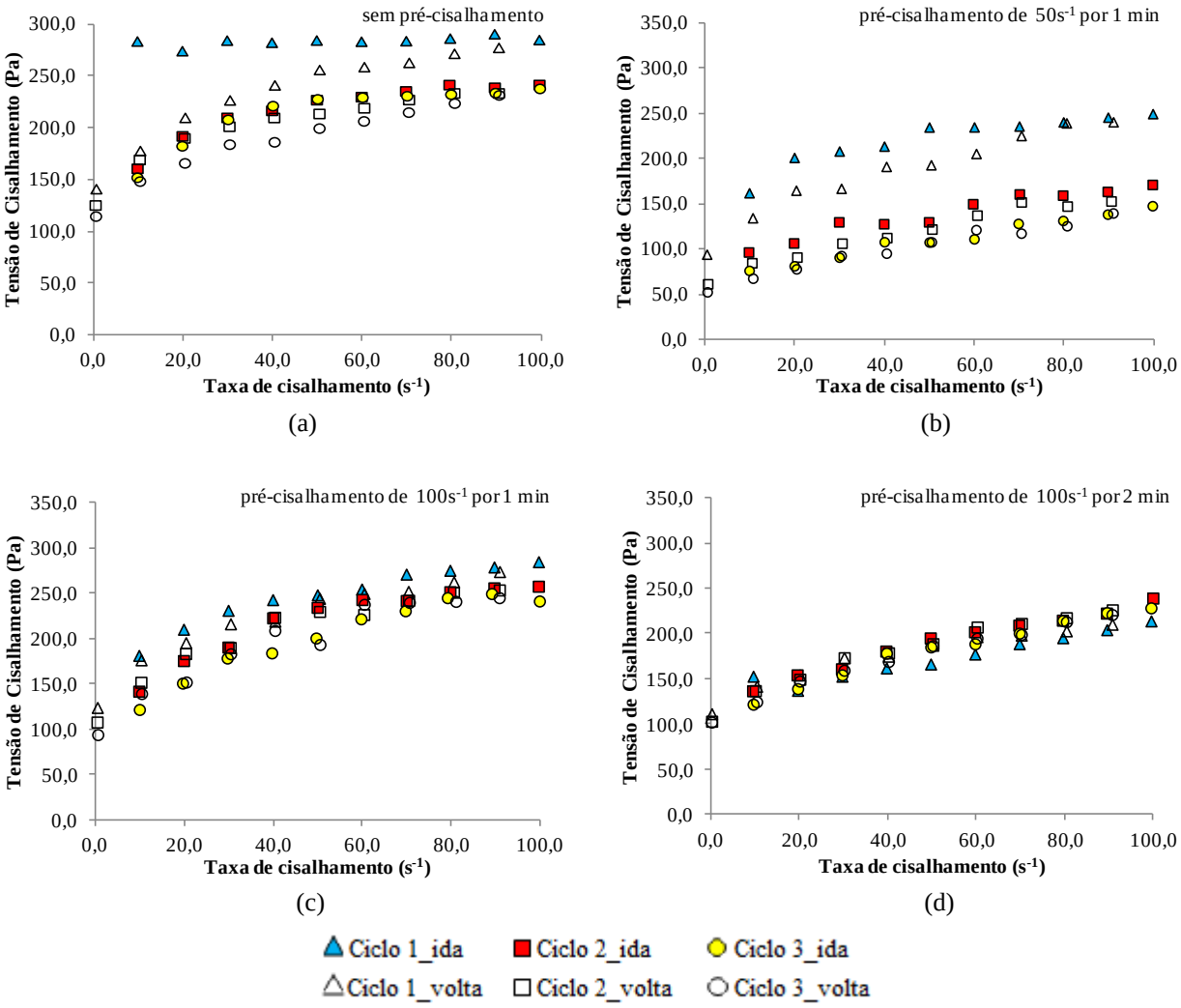
Tabela 3.6 – Processos de Mistura para teste e definição do pré-cisalhamento realizado pelo reômetro

Processo de Mistura	Taxa de cisalhamento (s^{-1})	Tempo de pré-cisalhamento (min)
PM 1	-	-
PM 2	50	1
PM 3	100	1
PM 4	100	2

Fonte: Produção da autora.

Através dos ensaios, obtivemos os gráficos de tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento, apresentados na Figura 3.16 (a) PM 1, (b) PM 2, (c) PM 3, (d) PM 4.

Figura 3.16 – Gráficos tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento dos procedimentos de mistura, variando o pré-cisalhamento



Fonte: Produção da autora.

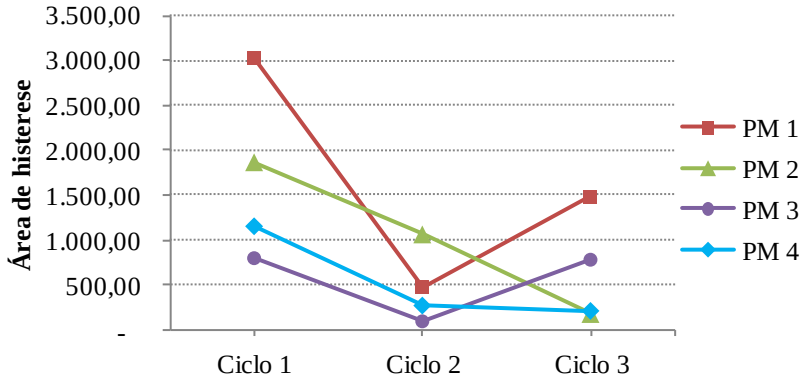
Após a observação dos gráficos, foi possível calcular a área de histerese de cada ciclo (Tabela 3.8 e Figura 3.17), bem como a tensão de escoamento do primeiro ciclo de cada.

Tabela 3.7– Área de histerese dos Processos de Mistura para teste com pré-cisalhamento diferentes realizado pelo reômetro

Processo de Mistura	Pré-cisalhamento	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
PM 1	-	3035,31	468,65	1482,37
PM 2	$50s^{-1}$ / 1min	1864,28	1059,67	170,91
PM 3	$100s^{-1}$ / 1min	794,31	89,07	777,06
PM 4	$100s^{-1}$ / 2min	1150,42	265,07	205,40

Fonte: Produção da autora.

Figura 3.17 – Gráfico com os valores da área de histerese de cada processo de mistura



Fonte: Produção da autora.

Observando o gráfico, nota-se que o último processo de mistura (PM 4) apresenta resultados mais constantes entre os três ciclos de carregamento com uma menor área de histerese. Isso significa que a mistura foi eficaz com energia suficiente para quebrar todos os aglomerados nessa etapa, após um tempo e uma taxa de cisalhamento maiores, apresentando maior homogeneização (BETIOLI, 2007; PILEGGI *et al.*, 2001; SCHRAMM, 2006).

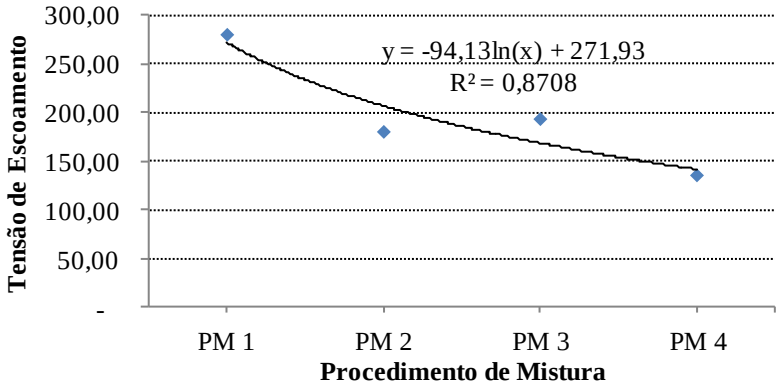
Quanto à tensão de escoamento, foi obtida através do prolongamento da curva de aceleração do ciclo 1 até a taxa igual a 0 no gráfico de tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento, apresentados na Tabela 3.9 e Figura 3.18.

Tabela 3.8 – Tensão de escoamento dos processos de mistura

Processo de Mistura	Pré-cisalhamento	Tensão de escoamento (Pa)
PM 1	-	280,13
PM 2	$50s^{-1}$ / 1min	180,04
PM 3	$100s^{-1}$ / 1min	193,19
PM 4	$100s^{-1}$ / 2min	135,21

Fonte: Produção da autora.

Figura 3.18 – Gráfico das tensões de escoamento dos processos de mistura



Fonte: Produção da autora.

Nota-se que o processo de mistura PM 4 apresenta menor tensão de escoamento. Isso mostra que essa amostra está mais homogênea que as outras misturas, pois necessita de uma tensão menor pra começar a cisalhar, confirmando que o processo PM 4 é o mais eficaz. Por conseguinte, foi adotado o pré-cisalhamento no reômetro de $100s^{-1}$ por 2 minutos, ou seja, o PM 4.

3.6 METODOLOGIA DE MISTURA PARA A FABRICAÇÃO DE PASTAS CIMENTÍCIAS

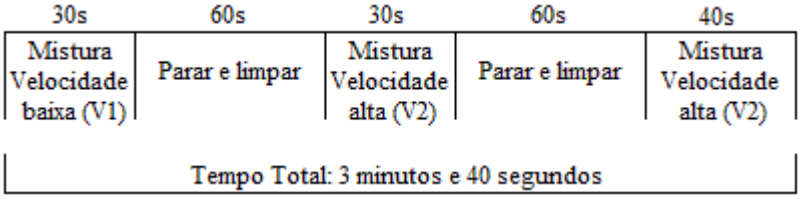
A produção de pastas cimentícias a serem utilizadas foi realizada através da metodologia de mistura desenvolvida nesta pesquisa, descrita no item anterior. O procedimento adotado foi o tempo de mistura no liquidificador de 100 segundos (Tabela 3.10 e Figura 3.19) com pré-cisalhamento de $100s^{-1}$ por 2 minutos pré-estabelecido no programa do reômetro para ser executado antes de cada ensaio acontecer.

Tabela 3.9 – Processo de mistura dos materiais

Procedimento	Tempo inicial (s)	Tempo final (s)
Homogeneizar o cimento e o resíduo	0	5
Junção de cimento e resíduo com a água	5	6
Mistura com o liquidificador (velocidade 1)	6	36
Limpeza e espera	36	96
Mistura com o liquidificador (velocidade 2)	96	126
Limpeza e espera	126	186
Mistura com o liquidificador (velocidade 2)	186	226

Fonte: Produção da autora.

Figura 3.19 – Esquema do processo de mistura



Fonte: Produção da autora.

Após todo o processo de mistura, as amostras foram mantidas em recipientes herméticos por mais 15 minutos e 20 segundos na temperatura ambiente até a realização dos ensaios, para que não houvesse perda de umidade para o meio. Antes de cada ensaio, as amostras foram misturadas manualmente por um minuto para manter sua homogeneidade. Assim, os ensaios eram iniciados após 20 minutos do contato inicial do cimento com a água, ou seja, com 20 minutos de hidratação.

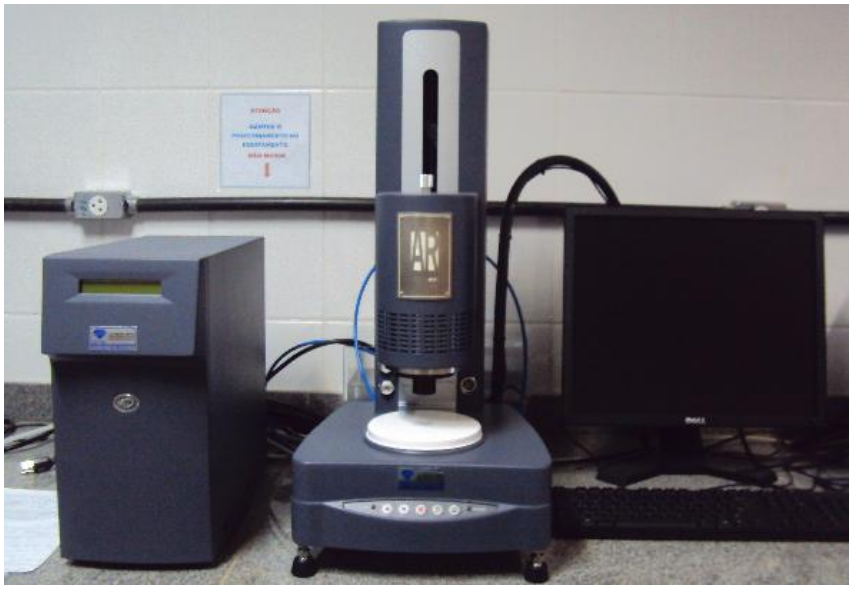
3.7 MÉTODOS DE ENSAIOS REOLÓGICOS

Os ensaios foram realizados em regime permanente, isto é, as propriedades em uma dada seção do escoamento não se alteram com o decorrer do tempo. Como o cimento está em constante hidratação e liberação de calor, foi escolhido um estágio em que é observada uma baixa taxa de liberação de calor denominado período de indução ou dormência com duração aproximada de 30 minutos a 3 horas. Esse período de indução é observado após os primeiros 20 minutos de hidratação do cimento. Por essa razão foi escolhido o tempo de hidratação de 20 minutos contados a partir do contato do cimento com a água para a realização dos ensaios.

Logo, em todos os ensaios foram feitas três amostras de cada relação água/cimento (0,45; 0,55; 0,65) para o tempo de hidratação (20 minutos) em quatro porcentagens distintas de adição do resíduo (0%, 5%, 10% e 15%), sendo o valor médio utilizado para análise.

Os ensaios reológicos executados nesta pesquisa foram os ensaios de fluxo e oscilatório. Para a realização dos ensaios de fluxo e oscilatório (varredura de deformação) foi utilizado um reômetro rotacional modelo AR 2000ex (TA Instruments), ilustrado na Figura 3.20 e características são apresentadas no Quadro 3.3.

Figura 3.20 – Reômetro rotacional AR 2000ex



Fonte: Produção da autora.

Quadro 3.3 – Características do reômetro rotacional AR 2000ex

Torque	0,03 μN.m – 200mN.m
Frequência	7,5 E^{-7} – 628 rad/s
Velocidade angular	0 – 300 rad/s
Força normal	0,005 – 50 N

Fonte: TA Instruments, 2011.

O reômetro possui seu próprio programa, onde são gerados os dados com seus respectivos gráficos e apresentados em um computador que se encontra acoplado ao equipamento.

Existem diversos tipos de geometria para a realização do ensaio de fluxo e oscilatório. Foi escolhida a geometria de placas paralelas, que possui diâmetro de 40 mm e espaçadas de 1 mm, ilustrada na Figura 3.21. Para evitar a evaporação da água e manter a temperatura da amostra em 23^{o} C durante o ensaio, utilizou-se um dispositivo protetor (*peltier*).

Para impedir o deslizamento da amostra foi fixado na superfície de cada placa um adesivo texturizado, constituído de um adesivo acrílico e de abrasivos artificiais de grãos nº 60 (óxido de alumínio) aplicados sobre um filme de poliéster e protegido por um revestimento de papel siliconizado.

Figura 3.21 – Geometria de placas paralelas com *peltier* e adesivo texturizado

Fonte: Produção da autora.

3.7.1 Ensaio de Fluxo

No ensaio de fluxo, a amostra foi submetida a uma variação da taxa de cisalhamento primeiramente crescente de 0 a 100 s^{-1} (curva de aceleração) por 2 minutos e, imediatamente depois, submetida a uma desaceleração até 0, em mais 2 minutos (conforme ilustrado na Figura 2.13).

Foram traçadas as curvas tensão *versus* taxa de cisalhamento e viscosidade *versus* taxa de cisalhamento e, assim, as propriedades reológicas do material podem ser determinadas, tais como viscosidade e tensão de escoamento. Além de se verificar o efeito da relação a/c nas propriedades reológicas, foi verificado também o efeito da hidratação do cimento no seu comportamento reológico.

3.7.2 Ensaio Oscilatório

No ensaio oscilatório o material foi submetido a uma deformação senoidal definida por meio de um ensaio de varredura de deformação oscilando a amplitude de deformação entre 10^{-5} e 10^{-1} com frequência constante de 1 Hz (conforme ilustrado na Figura 2.14).

A deformação crítica foi estabelecida como a deformação correspondente no ponto anterior ao ponto onde o valor da componente elástica G’ do módulo complexo G* tem uma redução de 10%, em que ocorre a fragmentação da estrutura (conforme ilustrado na Figura 2.15). Foi traçado um gráfico de deformação *versus* componente elástico (G′), com ambos os eixos em escala logarítmica. Esta deformação foi fixada para realização dos ensaios oscilatórios.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e abordados a caracterização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO), bem como as propriedades reológicas da pasta cimentícia com a adição desse resíduo, por meio do ensaio de fluxo e o ensaio oscilatório (varredura de deformação).

A caracterização do RBRO foi dirigida pelo grupo de pesquisas do LEMAC que trabalhou em conjunto na Universidade Federal do Espírito Santo para a pesquisa das potenciais aplicações do mesmo na produção de concretos e argamassas, sendo a autora da presente dissertação integrante desse grupo, participando do processo de caracterização dos materiais. Portanto, neste capítulo foram aproveitados os resultados já publicados nos trabalhos de Uliana (2013) que investigou o potencial de aplicação do RBRO em argamassas, substituindo parcialmente o cimento, após tratamento térmico e moagem; e Soares (2014) que pesquisou a influência da incorporação do RBRO sobre propriedades de durabilidade do concreto relacionadas com a resistência a íons sulfato.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

4.1.1 Caracterização Física

Para a determinação da massa específica, massa unitária, superfície específica, finura e composição granulométrica do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais foram executados ensaios e obtidos os seguintes resultados, descritos na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Caracterização física do RBRO

MÉTODO DE ENSAIO	CARACTERÍSTICA	RESULTADO	LIMITES
NBR NM 23 (ABNT,2001)	Massa Específica (g/cm³)	2,5253	N.E
NBR 12127 (ABNT, 1991)	Massa Unitária (kg/m³)	766,284	N.E
NBR NM 24 (ABNT, 2002)	Teor de Umidade inicial (%)	38,27	N.E
NBR NM 24 (ABNT, 2002)	Teor de Umidade utilizado na pesquisa (%)	0,04	≤ 3,0
NBR NM 76 (ABNT, 1998)	Área específica (Método de Blaine) (m²/kg)	6179,3	N.E.
NBR 11579 (ABNT, 2012)	Material retido na peneira nº 200 (%)	3,08	N.E.
NBR 9202 (ABNT,1985)	Material retido na peneira nº 325 (%)	7,0	≤ 34

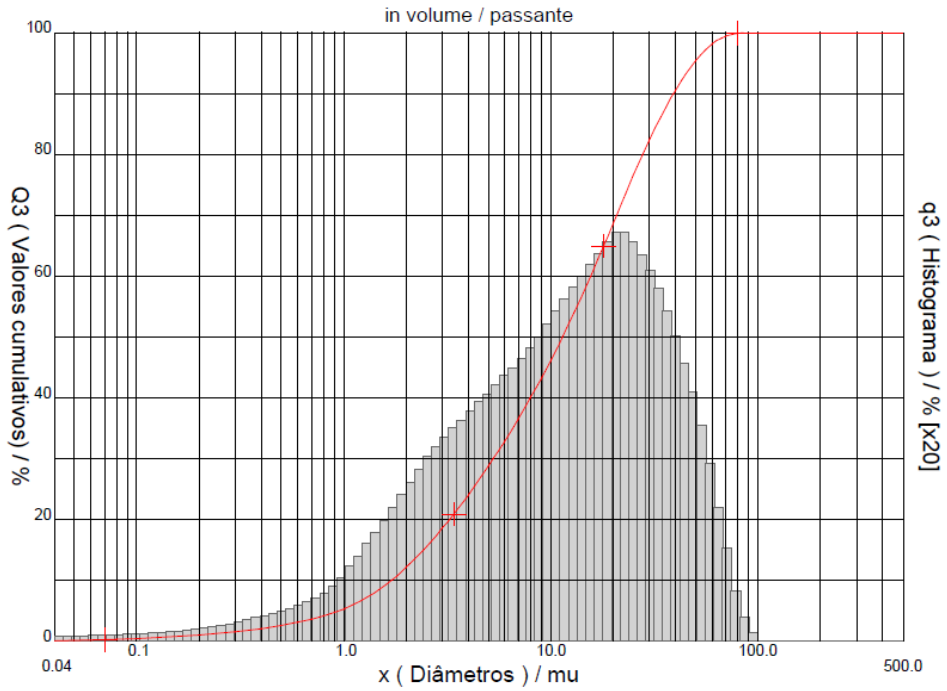
Fonte: Produção da autora.

A massa específica do RBRO, 2,5253 g/cm^3, é 10,5% menor que a massa específica do cimento CP V ARI (2,823 g/cm^3).

A área específica do RBRO (6,1793m^2/g) é maior que a do cimento CP V ARI (4,459m^2/g), sugerindo que o resíduo tem partículas mais finas do que o cimento. Essa área é uma característica importante para adições minerais, pois quando comparados materiais de mesma composição química, quanto maior for a área superficial do material, maior será a probabilidade de reação com o hidróxido de cálcio da pasta cimentícia devido à sua área de contato com os reagentes (NITA; HOHN, 2007).

A dimensão dos grãos equivalentes ao D10 (diâmetro abaixo do qual se situam 10 % das partículas) são na ordem de 1,7µm, D50 na ordem de 11,0µm e D90 na ordem de 40µm, como mostra a distribuição granulométrica na Figura 4.1. Gonçalves (2000) afirma que o agregado fino comumente tem diâmetro médio entre 50 e 150µm e atua no preenchimento dos vazios deixados pela descontinuidade do agregado miúdo. Por outro lado, a adição com possível efeito fíler tem diâmetro médio menor que 50µm e preenche os poros deixados pelos produtos de hidratação do cimento (GONÇALVES, 2000). Constata-se que o resíduo RBRO é mais fino que o cimento, sendo considerado como um material pulverulento e com potencial efeito fíler em matrizes cimentícias.

Figura 4.1 – Curva de distribuição granulométrica do RBRO



Fonte: Relatório técnico do SENAI/SC, 2013.

4.1.2 Caracterização Química

Para a caracterização química do RBRO foram realizados dois ensaios: o ensaio de perda ao fogo (PF) e a espectrometria de fluorescência de raios X (FRX). No ensaio de perda de fogo,

o valor encontrado pode referir-se aos materiais originários do polimento, como ceras e resinas, visto que o resíduo estudado possui tanto a lama procedente do corte dos blocos quanto à lama do polimento das chapas (Tabela 4.2).

Através da FRX, o resíduo pode ser classificado como um material sílico-aluminoso, composto predominantemente por quartzo sílica (SiO_2) e por feldspato alumina (Al_2O_3). Há presença também de minerais do grupo das micas (Na_2O e K_2O), mas em teores menores e presentes em rochas graníticas. O desgaste das sapatas de polimento, fabricadas com cimento sorel, este formado por óxidos de magnésio e cloro comumente utilizados na fabricação de coroas abrasivas, pode ter influenciado para a presença de óxido de magnésio (MgO) na composição química do resíduo (DE AZEREDO *et al.*, 2008).

Tabela 4.2 – Composição química do RBRO.

PROPRIEDADES		**RBRO**	**LIMITES**
Perda ao fogo – PF(%)		3,5	≤ 6,0
Composição Química	SiO_2 (%)	66,80	N.E.
	CaO (%)	3,44	N.E.
	MgO (%)	0,93	N.E.
	Al_2O_3 (%)	13,50	N.E.
	Fe_2O_3 (%)	3,79	N.E.
	K_2O (%)	3,83	N.E.
	Na_2O (%)	3,50	N.E.
	C (%)	1,11	N.E.
	TiO_2 (%)	0,16	N.E.
	SO_3 (%)	0,06	N.E.
	SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 (%)	85,08	N.E.

Obs.: Limites estabelecidos com base nos dados da Classe E de pozolanas descritos na NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2014).

N.E. = Não Estabelecido.

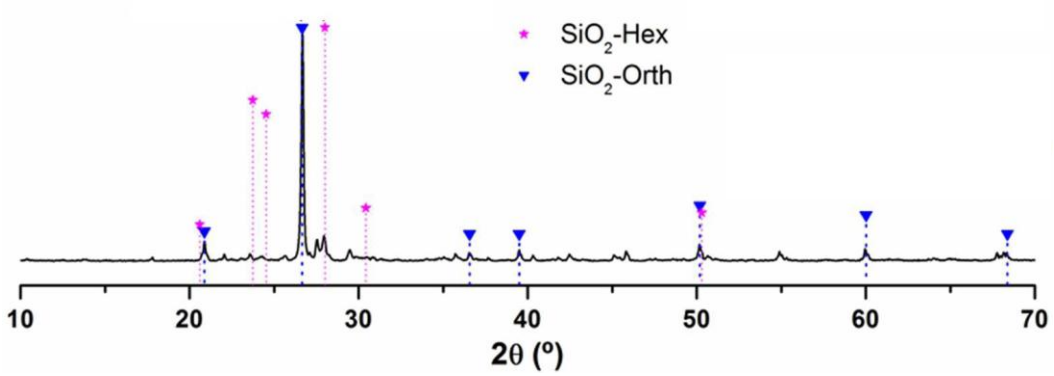
Fonte: Produção da autora.

4.1.3 Caracterização Mineralógica

O difratograma de raios X possibilitou a identificação de picos bem definidos de sílica (SiO_2) sob as formações cristalinas ortorrômbica e hexagonal, como mostra na Figura 4.2. Essa característica é típica de compostos cristalinos quimicamente estáveis, em que há baixa atividade reativa e confirma a ausência de atividade pozôlanica desse material.

Na estrutura cristalina ortorrômbica, todos os arranjos de átomos (célula cristalina) localizam-se em um ângulo de 90°. No entanto, na estrutura hexagonal um dos ângulos do arranjo atômico é de 120° (CARAM, s.d.).

Figura 4.2 – Difratograma de raios X do RBRO

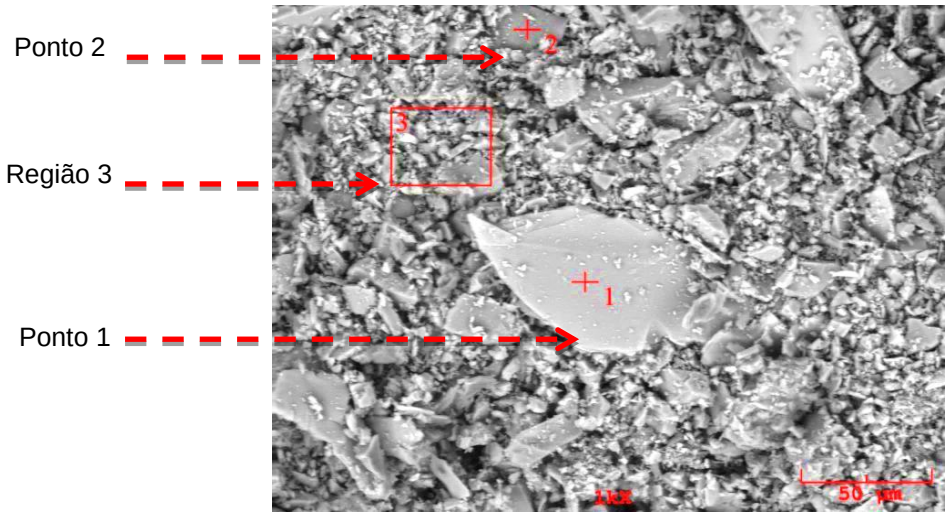


Fonte: Uliana, 2014, p.118.

4.1.4 Caracterização por imagem

É possível observar, na análise da imagem micrografia de partículas do RBRO apresentada na Figura 4.3, que o material não apresenta uma forma definida. Foram identificados grãos com formato anguloso e dimensões variando entre 0,8 a 60 µm.

Figura 4.3 – Micrografia do RBRO com pontos analisados por EDS, ampliação 1000 vezes



Fonte: Uliana, 2013, p.109.

O resultado obtido da análise química por espectroscopia por energia dispersiva EDS dos pontos especificados na micrografia confirma a espectrometria de raios X que sugeriu o resíduo como sendo sílico-aluninoso, mostrando que o resíduo é composto principalmente de silício (Si), alumínio (Al) e potássio (K), (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Resultado da análise química do EDS para o RBRO

	O	Mg	Al	Si	S	K	Ti	Fe
Ponto 1	23,551	4,86	13,48	30,124	0,31	10,382	2,605	13,236
Ponto 2	43,946	0,435	19,166	26,364	0,215	6,722	0,113	1,316
Região 3	37,817	0,667	6,971	43,802	0,236	2,742	0,193	0,585

Fonte: Produção da autora.

4.1.5 Índice de Atividade pozolânica

Um material sílicoso ou sílico-aluminoso que possui pouco ou nenhuma propriedade cimentícia é definido pela norma NBR 12653 (ABNT, 2014) como uma pozolana. No entanto, esse material pode reagir com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentantes, se estiver na presença de umidade e em temperatura ambiente.

Em suas pesquisas, Uliana (2013) e Soares (2014) verificaram a pozolanicidade do RBRO em argamassas, tanto com cal como com cimento e constataram que o resíduo não se enquadra nos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014), apresentados na tabela 4.4. Desse modo, o RBRO pode desempenhar efeito físico de preenchimento dos vazios e densificação das misturas, sendo utilizado como fíler em argamassas e concretos.

Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de pozolanicidade do RBRO com cal e com cimento

PROPRIEDADES		RBRO	LIMITES
Índice de atividade pozolânica	Com a cal (MPa)	3,17	$\geq 6,0$
	Com o cimento (%)	63,9	≥ 75
	Água requerida em IAP-cim (%)	103,3	≤ 110

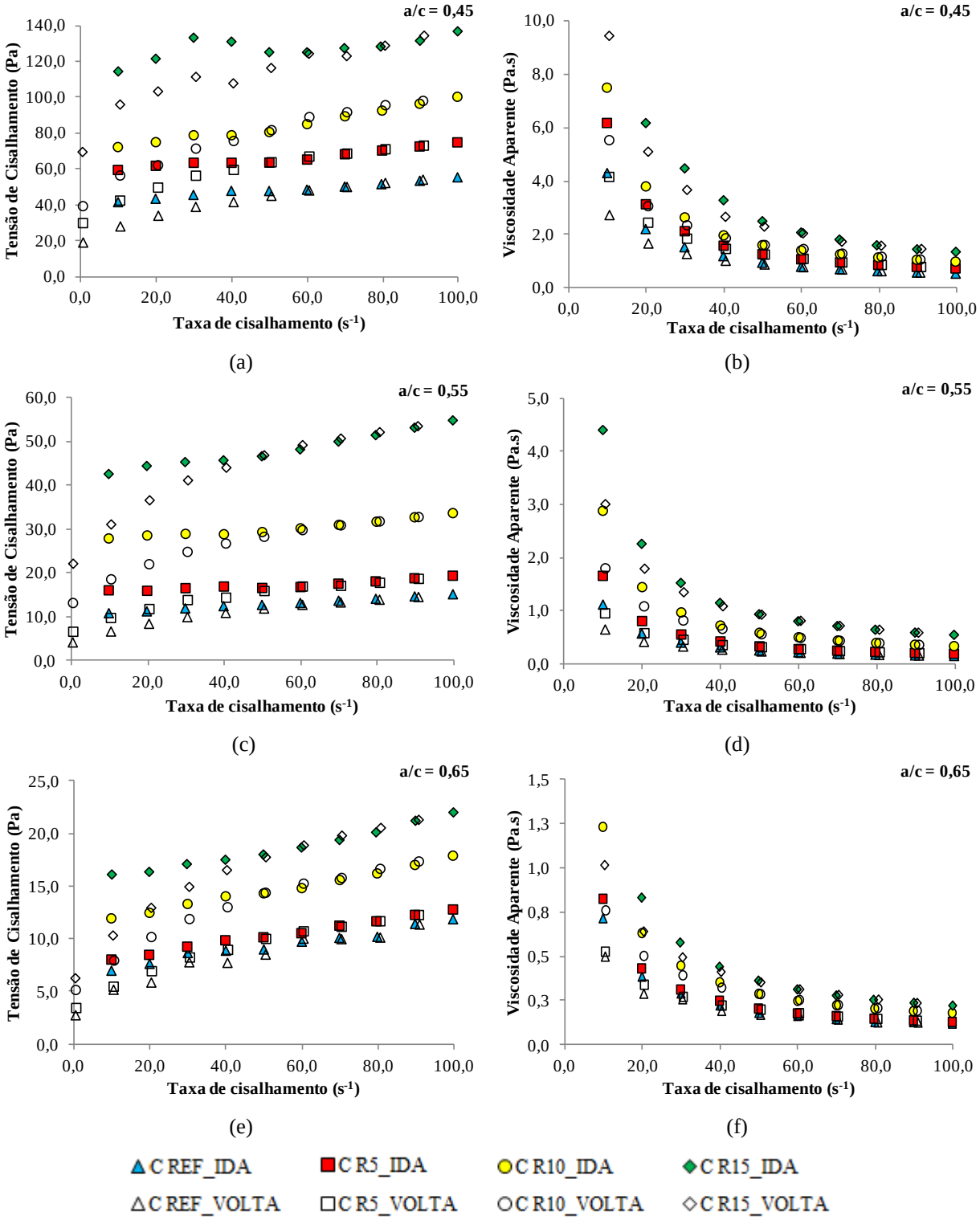
OBS: Limites estabelecidos com base nos dados da Classe E de pozolanas de acordo com a NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2014).

Fonte: Produção da autora.

4.2 ENSAIO DE FLUXO

Neste ensaio, são obtidos os parâmetros reológicos (tensão de escoamento, tensão de cisalhamento e viscosidade). De posse destes dados, podem-se traçar gráficos, como apresentados na Figura 4.4, que consistem em curvas tensão *versus* taxa de cisalhamento e viscosidade *versus* taxa de cisalhamento que permitem a determinação das propriedades reológicas do material em função da taxa de cisalhamento. Além de se verificar o efeito da relação a/c nas propriedades reológicas de pastas cimentícias, foi verificado também o efeito de diferentes percentuais de adição de resíduo no seu comportamento reológico.

Figura 4.4 – Gráficos de tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento variando a relação água/cimento e o teor de resíduo RBRO



Fonte: Produção da autora

Em uma análise inicial, observa-se que as amostras se comportam como um fluido não newtoniano, pois a tensão de cisalhamento varia não-linearmente com a taxa de cisalhamento.

Observa-se um comportamento de um fluido pseudoplástico, apresentando uma diminuição da viscosidade aparente quando há um aumento da taxa ou da tensão de cisalhamento.

Também é notório que todas as pastas de matriz cimentícias apresentam um comportamento tixotrópico, em que a curva de aceleração apresenta valores de tensão de cisalhamento maiores que os valores da curva de desaceleração.

É possível observar em todos os gráficos que o resíduo C R15 (15% de resíduo) apresenta os maiores valores de tensão de cisalhamento e viscosidade. Isso se deve a finura do RBRO, preenchendo os poros intergranulares, o que dificulta o escoamento inicial (tensão de escoamento maior) do fluido.

- **Área de Histerese**

Após a observação dos gráficos, foi possível calcular a área de histerese de cada ciclo através da Tabela 4.5, que consiste na área entre as curvas de aceleração e desaceleração do gráfico de tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento.

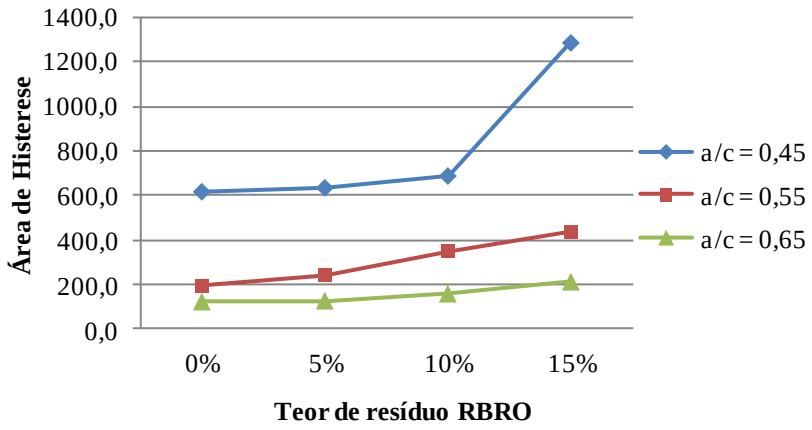
Tabela 4.5 – Valores da área de histerese do ensaio de fluxo

Teor de Resíduo	a/c = 0,45	a/c = 0,55	a/c = 0,65
0%	614,96	192,20	121,35
5%	632,49	241,57	125,77
10%	685,72	349,23	157,32
15%	1284,39	432,48	210,86

Fonte: Produção da autora.

Na Figura 4.5, é notável que a relação água/cimento 0,65 apresentou a menor área de histerese, em todos os teores de resíduo. Isso significa que houve quebra dos aglomerados, apresentando maior homogeneização.

Figura 4.5 – Gráfico da área de histerese *vs.* teor de resíduo



Fonte: Produção da autora.

- **Tensão de escoamento**

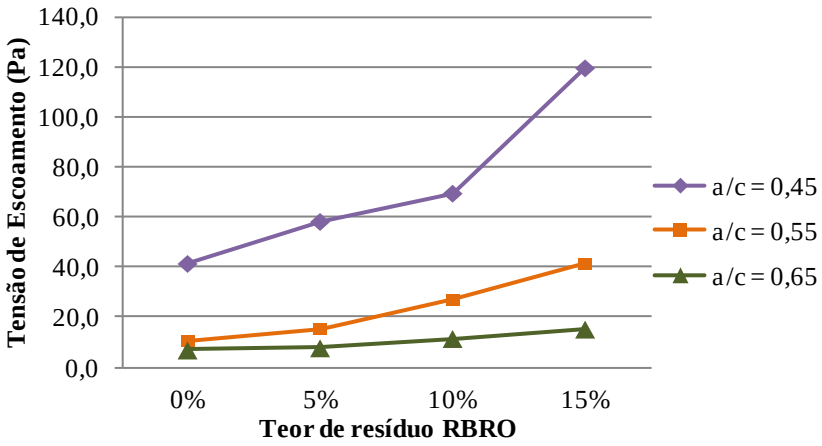
Observando a Tabela 4.6 e a Figura 4.6, é possível notar que as pastas tem um comportamento de fluido com ponto de escoamento considerando os altos valores de tensão de escoamento, pois esse tipo de fluido necessita de uma tensão de cisalhamento mínima (τ_0) para dar início ao seu escoamento.

Tabela 4.6 – Valores de tensão de escoamento (Pa) do ensaio de fluxo

Teor de Resíduo	a/c = 0,45	a/c = 0,55	a/c = 0,65
0%	41,56	10,63	6,91
5%	58,37	15,43	7,79
10%	69,68	27,09	11,52
15%	119,86	41,50	15,29

Fonte: Produção da autora.

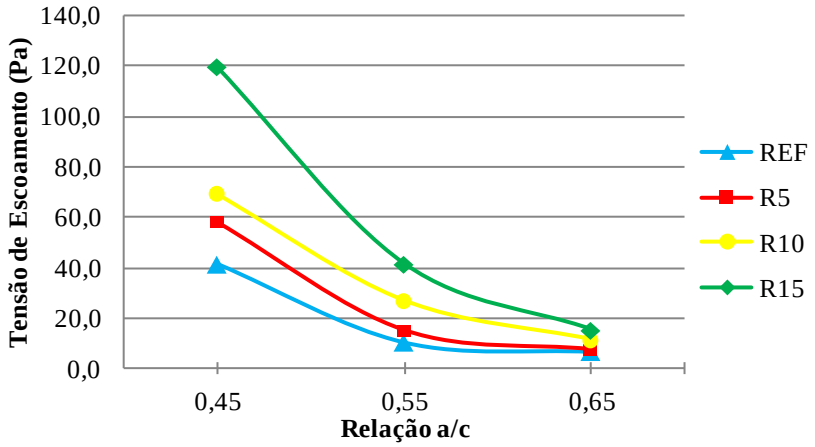
Figura 4.6 – Gráfico da tensão de escoamento *vs.* teor de resíduo



Fonte: Produção da autora.

A tensão de escoamento é praticamente constante na relação a/c = 0,65, mostrando sua homogeneidade mesmo com a adição do resíduo RBRO, apresentado na Figura 4.7 com linhas de tendência. Assim, espera-se que mesmo após a adição de resíduo em teores elevados (15%), a consistência da mistura não é afetada caso seja utilizada uma relação a/c de 0,65. Já para relações a/c menores, espera-se uma redução da consistência por causa de uma maior aglomeração das partículas.

Figura 4.7 – Gráfico da tensão de escoamento *vs.* relação água/cimento



Fonte: Produção da autora.

Há uma queda significativa da tensão de escoamento quando se aumenta a relação água cimento. Isso ocorreu pelo aumento da quantidade de água adicionada na pasta, apresentando um fluido menos viscoso, com maior consistência e fluidez.

- **Correlação entre parâmetros reológicos da pasta cimentícia com a consistência do concreto no estado fresco**

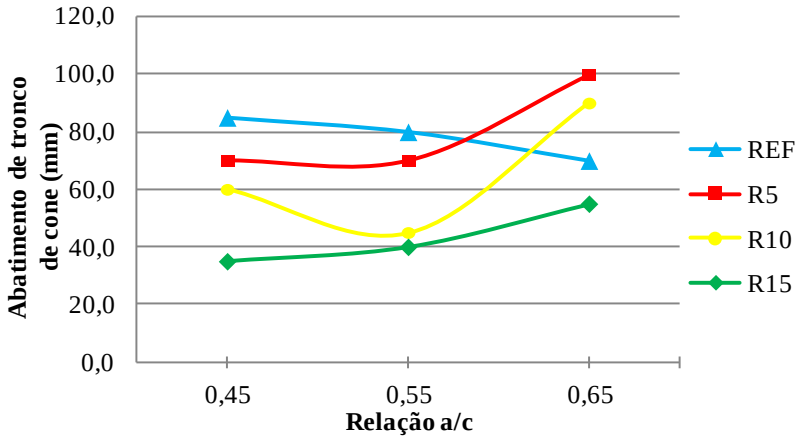
Os valores de consistência obtidos pelo método de abatimento de tronco de cone para concretos frescos utilizados neste trabalho foram realizados por Soares (2014), conforme a Tabela 4.7 e Figura 4.8 com linhas de tendência.

Tabela 4.7 – Valores de abatimento de tronco de cone dos concretos realizados

Teor de Resíduo	a/c = 0,45	a/c = 0,55	a/c = 0,65
0%	85	80	70
5%	70	70	100
10%	60	45	90
15%	35	40	55

Fonte: Produção da autora.

Figura 4.8 – Gráfico do abatimento de tronco de cone *vs.* relação água/cimento



Fonte: Produção da autora.

À medida que aumenta a quantidade de resíduo nas amostras, reduz o índice de consistência, em todas as relações a/c. Essa queda no valor do abatimento era esperada, pois ocorreu um acréscimo de finos e manteve-se a mesma proporção de água na mistura. Além disso, o resíduo utilizado possui maior superfície específica tendendo a demandar um maior consumo de água. Neville (1997) indica correlações entre o ensaio de abatimento e trabalhabilidade, conforme mostra a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Relação entre trabalhabilidade e grandeza de abatimento

Trabalhabilidade	Abatimento (mm)
Abatimento zero	0
Muito baixa	5 a 10
Baixa	15 a 30
Média	45 a 75
Alta	80 a 155
Muito alta	160 ao desmoronamento

Fonte: Produção da autora.

De acordo com os resultados obtidos por Soares (2014), os concretos produzidos com adição de resíduo e relação a/c de 0,45 e 0,55 apresentaram resultados de abatimento de tronco de cone inferiores a 70 mm, o que segundo Neville (1997), seria concretos com trabalhabilidade média. Já concretos com adição do resíduo e relação a/c de 0,65 apresentaram valores superiores (acima de 70 mm) de abatimento de tronco de cone, indicando uma alta trabalhabilidade, com exceção do concreto com adição de 15% de resíduo, que apresentou valor de 55 mm, ou seja, trabalhabilidade média.

Correlacionando os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone e a tensão de escoamento de cada traço, a Tabela 4.9 e a Figura 4.9 foram estabelecidas.

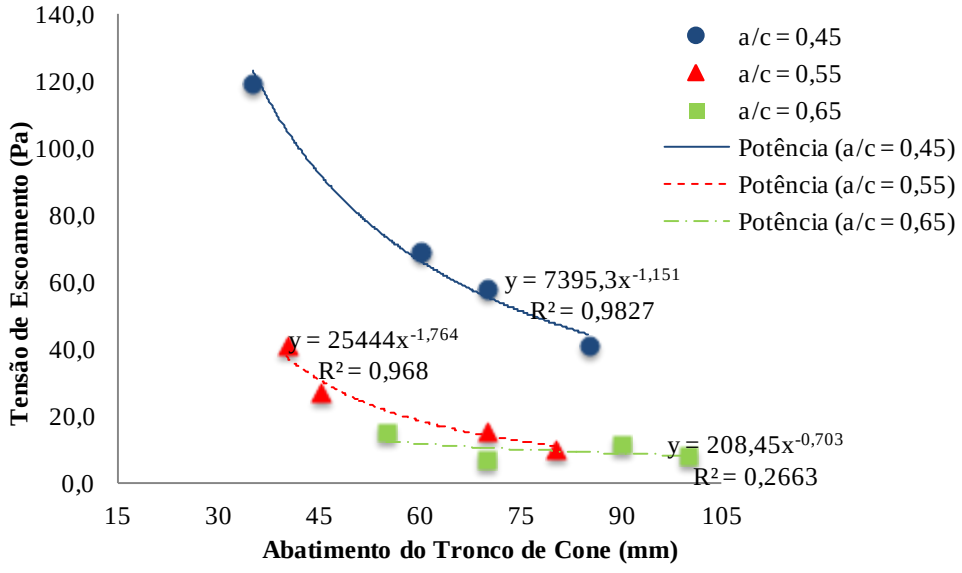
Tabela 4.9 – Valores de abatimento de tronco de cone relacionados com a tensão de escoamento do mesmo traço

Traço	Abatimento	Tensão
C REF 45	85	41,56
C R5 45	70	58,37
C R10 45	60	69,68
C R15 45	35	119,86
C REF 55	80	10,63
C R5 55	70	15,43
C R10 55	45	27,09
C R15 55	40	41,50
C REF 65	70	6,91
C R5 65	100	7,79
C R10 65	90	11,52
C R15 65	55	15,29

Fonte: Produção da autora.

Analisando os dados, observou-se que os valores de tensão de escoamento e os valores de consistência dos respectivos traços estão inversamente proporcionais. Com o aumento do teor de RBRO, diminui o abatimento e aumenta a tensão de escoamento. Isso confirma que o resíduo se comportou como um fíler, tornando a amostra mais viscosa e com menor trabalhabilidade, pois preenche os vazios intergranulares na matriz.

Figura 4.9 – Gráfico do tensão de escoamento *vs.* abatimento de tronco de cone



Fonte: Produção da autora.

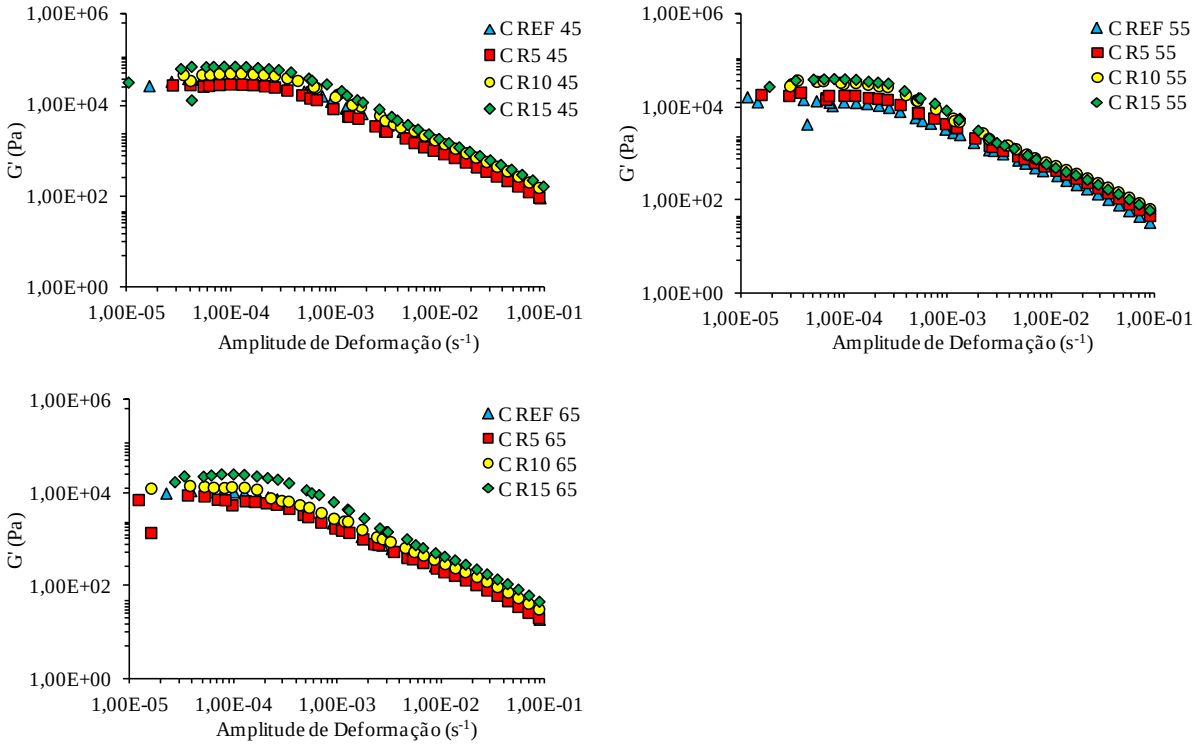
É possível perceber uma tendência de correlação entre os parâmetros analisados utilizando uma função de potência. Os coeficientes de determinação (R^2) de 0,98 e 0,97 para as pastas com relação a/c de 0,45 e 0,55, respectivamente, mostram uma correlação negativa forte entre a tensão de escoamento com os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone.

Para misturas com maior fluidez, menos viscosas, essa correlação apresentou a mesma tendência, porém com uma correlação baixa (0,27) entre os valores dos ensaios reológicos propostos neste estudo e àqueles do abatimento do tronco de cone. Acredita-se que o uso deste tipo de correlação, com base em análise de parâmetros reológicos pode levar a medidas do grau de consistência de uma maneira mais científica.

4.3 ENSAIO OSCILATÓRIO (VARREDURA DE DEFORMAÇÃO)

A partir dos gráficos da Figura 4.10, é possível a determinação dos valores de deformação crítica de cada pasta, estabelecida no ponto antecedente ao ponto onde o valor de G' reduz 10%, em que ocorre a fragmentação da estrutura (Tabela 4.10).

Figura 4.10 – Gráfico do componente elástico (G') em função da deformação obtida a partir do ensaio de varredura de deformação



Fonte: Produção da autora.

Tabela 4.10 – Valores da tensão de escoamento obtidos pelo ensaio de varredura de deformação

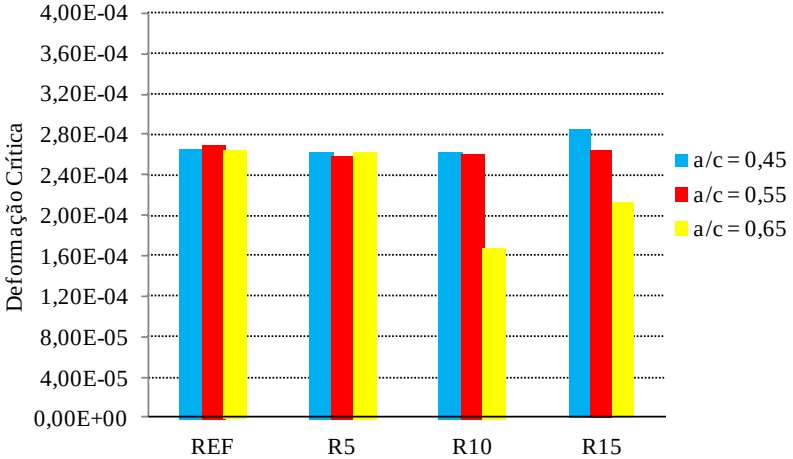
Pasta Cimentícia	Deformação Crítica	G'(Pa)	Tensão de Escoamento (Pa)
C REF 45	2,66E-04	31492,22	8,38
C R5 45	2,62E-04	21878,50	5,73
C R10 45	2,62E-04	42512,94	11,14
C R15 45	2,86E-04	54628,97	15,62
C REF 55	2,69E-04	11996,69	3,23
C R5 55	2,59E-04	14719,11	3,81
C R10 55	2,60E-04	29376,65	7,64
C R15 55	2,64E-04	30965,19	8,17
C REF 65	2,65E-04	8285,17	2,20
C R5 65	2,62E-04	5551,78	1,45
C R10 65	1,69E-04	7930,37	1,34
C R15 65	2,14E-04	19695,88	4,21

Fonte: Produção da autora.

Esses valores de deformação crítica têm a influência dos processos de mistura e de esmagamento entre as placas paralelas, pois estes são realizados em aproximadamente 15 minutos, restando apenas 5 minutos de repouso antes do início do ensaio.

Observa-se na Figura 4.11 que as pastas cimentícias de referência e as com 5% de RBRO apresentaram uma deformação crítica muito próxima independente da relação a/c, com uma maior capacidade de suportar maiores deformações. Já a pastas com teores de 10 e 15% de resíduo apresentaram uma queda de deformação crítica com o aumento da relação a/c. Esta redução indica que a pasta é menos resistente a deformações. Isto pode explicar o fato de obtermos pequenas áreas de histerese para pastas com relação a/c de 0,65 mesmo estas estando com altos teores de resíduo (acima de 10%).

Figura 4.11 – Gráfico da deformação crítica obtida em função do percentual de resíduo



Fonte: Produção da autora.

- **Correlação entre os parâmetros reológicos das pastas de cimento com adição de RBRO com a resistência à compressão do concreto no estado endurecido**

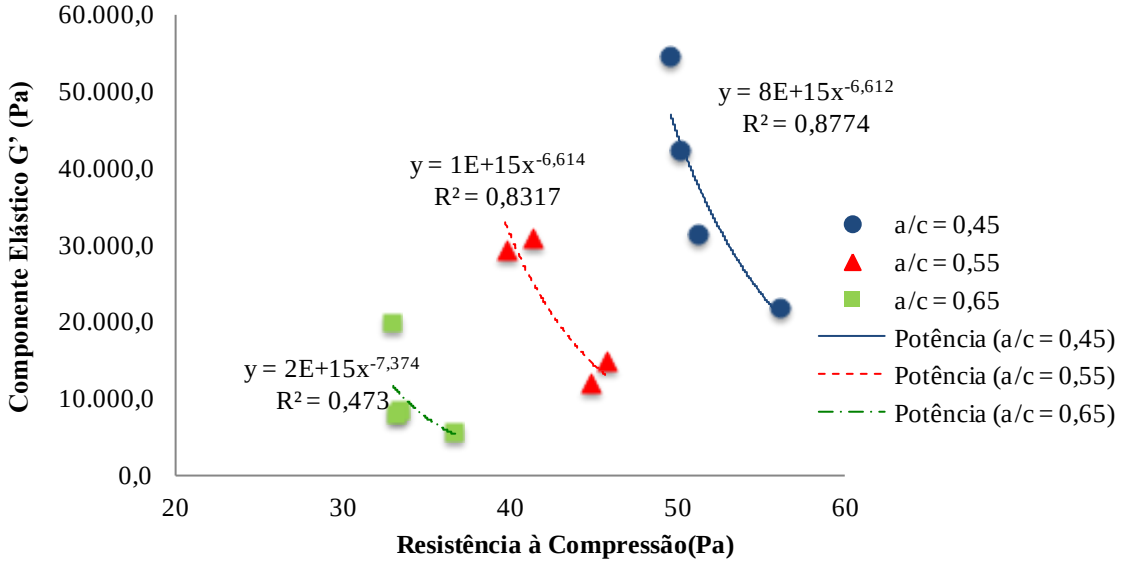
Procurou-se verificar se havia uma correlação entre os valores reológicos da componente elástica do módulo complexo, i.e., G', com a resistência a compressão dos concretos produzidos com as mesmas proporções de cimento/água/resíduo utilizados neste estudo. Os ensaios de resistência à compressão axial do concreto foram realizados por Soares (2014). A Figura 4.12 e a Tabela 4.11 mostram os valores de resistência à compressão e G'.

Tabela 4.11 – Resultados dos valores médios de resistência à compressão axial comparado com o componente elástico (G')

Pasta Cimentícia	Resistência média à compressão (MPa)	G'(Pa)
C REF 45	51,27	31492,22
C R5 45	56,09	21878,50
C R10 45	50,18	42512,94
C R15 45	49,57	54628,97
C REF 55	44,76	11996,69
C R5 55	45,70	14719,11
C R10 55	39,70	29376,65
C R15 55	41,32	30965,19
C REF 65	33,37	8285,17
C R5 65	36,66	5551,78
C R10 65	33,18	7930,37
C R15 65	32,98	19695,88

Fonte: Produção da autora.

Figura 4.12 – Gráfico do componente elástico G' *versus* resistência à compressão



Fonte: Produção da autora.

Pelos resultados, é possível perceber uma tendência de correlação entre os parâmetros analisados utilizando uma função de potência. Os coeficientes de determinação (R^2) de 0,88 e 0,83 para as pastas com relação a/c de 0,45 e 0,55, respectivamente, mostram uma correlação negativa forte entre a resistência à compressão e o módulo elástico G'. Para misturas mais fluidas, com relação a/c de 0,65, por exemplo, esta correlação apresentou coeficiente de determinação mais baixo, mas ainda assim é possível observar uma correlação entre estes valores.

Capítulo 5

Conclusões e Considerações Finais

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação proporciona uma contribuição ao estudo reológico de pastas cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO). Foram analisadas pastas cimentícias produzidas com três diferentes relações água/cimento e quatro teores de adição do resíduo, para a determinação de importantes propriedades reológicas submetidas ao ensaio de fluxo e o ensaio oscilatório (varredura de deformação).

O objetivo do trabalho foi utilizar dos conceitos de reologia para investigar a influência do RBRO nas propriedades reológicas de pastas cimentícias, analisando o potencial de aproveitamento deste rejeito como adição mineral em sua condição natural, bem como suas interações entre outros constituintes das pastas (cimento e água, nesse estudo).

Estão apresentadas neste capítulo as conclusões gerais e específicas deste trabalho e algumas sugestões para pesquisas futuras dentro deste tema.

5.1 CONCLUSSÃO GERAL

A partir do programa experimental proposto neste trabalho, obtivemos resultados apresentando RBRO como um material de finura e massa específica próximas do cimento, possuindo baixa atividade reativa. Isso indica que o resíduo pode ser utilizado como adição mineral inerte na matriz cimentícia. O teor de adição de RBRO que proporcionou desempenho satisfatório quanto às propriedades estudadas foi o de 5%, em relação à massa do material cimentício.

Com relação à caracterização do comportamento reológico, verificou-se que as pastas cimentícias apresentam um comportamento não newtoniano, pseudoplástico e tixotrópico.

Portanto, pode-se concluir de forma geral que a utilização desse resíduo apresenta benefícios de categoria ambiental, proporcionando um destino útil e plausível para o material que é descartado no meio ambiente pelas empresas brasileiras de beneficiamento de rochas ornamentais.

5.1.1 Conclusões específicas

5.1.1.1 Quanto à caracterização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais

O resíduo estudado apresentou a caracterização física de um material pulverulento, com superfície específica maior que a do cimento, ou seja, seus grãos são menores que os grãos do cimento, com poder de efeito fíler em matrizes cimentícias.

A caracterização química do RBRO mostrou que o resíduo é um material sílico-aluminoso formados por compostos cristalinos com baixa atividade reativa, indicando estabilidade química.

Mineralogicamente, foi possível observar através das micrografias que os grãos do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais são angulosos, não possuindo uma forma definida e conter uma distribuição granulométrica variada.

O resíduo não alcançou os requisitos físicos estabelecidos na NBR 12653 (ABNT, 2014), relacionado à atividade pozolânica, classificando-o como Classe E.

Conclui-se, portanto, que o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, no seu estado natural, pode ser considerado como uma adição mineral de preenchimento (fíler) dos poros intergranulares por não possuir atividade química e ter uma alta superfície específica.

5.1.1.2 Quanto ao procedimento de mistura ideal das pastas cimentícias

Pra analisar e definir qual o melhor procedimento de mistura para preparação das amostras, foram realizados vários testes utilizando com base uma modificação do método de mistura desenvolvido pela *Texas Transportation Institute*.

- **Tempo de mistura**

Com relação ao tempo de mistura das pastas cimentícias, a área de histerese encontrada para os dois tempos de mistura (100 e 300 segundos) não variaram significantemente apesar de os valores das tensões de cisalhamento da amostra de 100 segundos serem maiores que os da mistura de 300 segundos. Assim, o tempo de mistura adotado nesta pesquisa foi de 100 segundos.

- **Pré-cisalhamento**

Após os testes com tempos de mistura distintos, percebeu-se que os valores encontrados em cada ciclo eram ainda dispersos, não observando uma constância de valores das áreas de

histerese. Foi então adotado, além do tempo de mistura de 100s, um pré-cisalhamento executado no reômetro, para quebrar as estruturas das partículas antes do ensaio, tornando a pasta mais homogênea.

Realizando a segunda etapa de testes com três pré-cisalhamentos diferentes, observou-se que o processo de mistura com pré-cisalhamento $100s^{-1}$ por 2 minutos (PM 4) apresentou resultados mais constantes entre os três ciclos de carregamento, com uma menor área de histerese e menor tensão de escoamento. Isso indica que a mistura foi eficaz com energia suficiente para quebrar todos os aglomerados e tornar a amostra mais homogênea que as outras. Logo, adotou-se o processo de mistura PM 4 no reômetro.

A partir da definição do procedimento de mistura ideal, foram realizados no reômetro ensaios de fluxo e oscilatório (varredura de deformação) em pastas cimentícias contendo três relações água/cimento (0,45; 0,55; 0,65) e diferentes percentuais de adição de RBRO (5%, 10%, 15%), utilizando o DSR.

5.1.1.3 Quanto ao ensaio de fluxo

Realizados os ensaios de fluxo, observou-se que as amostras se comportam como um fluido:

- não newtoniano - tensão de cisalhamento não varia linearmente com taxa de cisalhamento;
- pseudoplástico - diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa ou da tensão de cisalhamento;
- tixotrópico - curva de aceleração com valores de tensão de cisalhamento maiores que os valores da curva de desaceleração.

É possível observar que o resíduo C R15 (15% de resíduo) apresenta os maiores valores de tensão de cisalhamento e viscosidade. Isso se deve a finura do RBRO, preenchendo os poros intergranulares, o que dificulta o escoamento inicial (tensão de escoamento maior) do fluido.

Quando se aumenta a relação água cimento, há uma queda significativa da tensão de escoamento. Isso ocorreu pelo aumento da quantidade de água adicionada na pasta, apresentando um fluido menos viscoso, com maior consistência e fluidez. Contudo, na relação a/c de 0,65, a tensão de escoamento é praticamente constante, mostrando sua homogeneidade mesmo com a adição do resíduo.

5.1.1.4 Quanto ao ensaio oscilatório (varredura de deformação)

Independentemente da relação a/c, as pastas cimentícias de referência e as pastas com adição de 5% de RBRO apresentaram uma deformação crítica muito próxima, com uma maior capacidade de suportar maiores deformações.

Já a pastas com teores de 10 e 15% de resíduo apresentaram uma queda de deformação crítica com o aumento da relação a/c. Esta redução indica que a pasta é menos resistente a deformações, explicando a obtenção de pequenas áreas de histerese para pastas com relação a/c de 0,65, mesmo com adição de altos teores de resíduo (acima de 10%).

5.1.1.5 Quanto a correlação entre os parâmetros reológicos das pastas de cimento com adição de RBRO com a consistência do concreto no estado fresco

Analisando os resultados, observou-se que a os valores de tensão de escoamento e os valores de consistência dos respectivos traços estão inversamente proporcionais. Com o aumento do teor de RBRO, diminui o abatimento e aumenta a tensão de escoamento. Isso confirma que o resíduo se comportou como um fíler, tornando a amostra mais viscosa e com menor consistência, pois preenche os vazios intergranulares na matriz.

Acredita-se que o uso deste tipo de correlação, com base em análise de parâmetros reológicos pode levar a medidas do grau de consistência de uma maneira mais científica.

5.1.1.6 Quanto a correlação entre os parâmetros reológicos das pastas de cimento com adição de RBRO com a resistência à compressão do concreto no estado endurecido

Através dos resultados, é possível perceber uma tendência de correlação entre os parâmetros analisados utilizando uma função de potência. Os coeficientes de determinação (R^2) para as pastas com relação a/c de 0,45 e 0,55 mostram uma correlação negativa forte entre a resistência à compressão e o módulo elástico G'. Para as misturas mais fluidas, esta correlação apresentou coeficiente de determinação também significativo, entretanto são inferiores aos coeficientes das relações a/c menores.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

Durante o desenvolvimento do presente trabalho, devido às limitações do tempo disponível e do programa experimental, surgiram alguns aspectos não puderam ser incluídos. Deste modo,

são apresentadas a seguir algumas sugestões para a complementação e prosseguimento do estudo da utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, visando principalmente os aspectos reológicos.

- Avaliação das propriedades reológicas das pastas cimentícias com e sem a incorporação de RBRO através de outros ensaios reológicos como o de palheta e *squeeze-flow*;
- Estudo da microestrutura por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das pastas cimentícias com e sem a adição de RBRO para verificar o efeito filler deste material que afetou as propriedades reológicas;
- Estudo do processo de hidratação do cimento em pastas cimentícias com e sem adição de RBRO;
- Avaliar o calor de hidratação de vários tipos de cimento.
- Determinação da relação custo/benefício para utilização do RBRO como adição em matrizes cimentícias.
- Estudar a viabilidade da utilização de RBRO na produção de cimentos, devido à sua composição química, possuindo matérias primas necessárias para produção do aglomerante.

Referências

Referências Normativas e Bibliográficas

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **O setor**. Informe 12/2012. São Paulo. 2006. Disponível em: <http://www.vitoriastonefair.com.br/site/2012/pt/setor>. Acesso em: 27 fev. 2013.

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

_____. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7215**: Cimento portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 9202**: Cimento portland e outros materiais em pó - determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (n° 325) - método de ensaio. São Paulo, 1985.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n° 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12127**: Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Especificação. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento portland - preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 14656**: Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 15**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 23**: Cimento Portland - Determinação e massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 24**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 26**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 76**: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; SANTOS, J. R.. Recycling of stone slurry in industrial activities: application to concrete mixtures. In: **Building and Environment**, Lisboa, v. 42, n. 2, p. 810-819, fev. 2007.

ALVES, M. S. **Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos.** 2008. 133p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ALZBOON, K. K.; MAHASHEH, K. N. Effect of using stone cutting waste on the compression strength and slump characteristics of concrete. In: **International Journal of Civil and Environmental Engineering**, Jordânia, v. 1, n. 4, p. 168-173, 2009.

ARUNTAS, H. Y.; GÜRÜ, M.; DAYI, M.; TEKIN, İ. Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. In: **Materials & Design**, Turquia, v. 31, n. 8, p. 4039-4042, set. 2010.

ATZENI, C.; MASSIDDAT, L.; SANNA, U. Rheological behaviour of cements mixed with polymeric lattices. In: **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, Quebéc, v. 11, n. 4, p. 215-219, nov. 1989.

AULTON, M. E. **Delineamento de formas farmacêuticas**. 2. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2008.

BANFILL, P. F. G.; BEAUPRÉ, D.; CHAPDELAINE, F.; DE LARRARD, F.; DOMONE, P.; NACHBAUR, L.; SEDRAN, T.; WALLEVIK, O.; WALLEVIK, J. E. **Comparison of concrete rheometers: international tests at LCPC (Nantes, France) in October, 2000**, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, set. 2001.

BANFILL, P. F. G. The Rheology of Fresh Cement and Concrete-a Review, In: International Cement Chemistry Congress, 11, 2003, Durban. **Proceedings**… Durban, mai. 2003.

BARTOS, P. **Fresh concrete: properties and tests**, Elsevier, New York, 1992.

BEAUPRÉ, D. **Rheology of High Performance Shotcrete**. 1994. 265f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, The University of British Columbia, Canadá, 1994.

BETIOLI, A. M. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. 2007. 188p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BETIOLI, A. M.; JOHN, V. M.; GLEIZE, P. J. P., PILEGGI, R. G. Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares. In: **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 37-48, out./dez. 2009.

BHATTACHARJA, S.; TANG, F. J. **Rheology of cement paste in concrete with different mix designs and interlaboratory evaluation of the mini-slump cone test**, PCA R&D, Serial No. 2412, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2000.

BINICI, H.; KAPLAN, H.; YILMAZ, S. Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. In*:* **Scientific Research and Essay**, Turquia, v. 2, n. 9, p. 372-379, set. 2007.

BINGHAM, E. C. The new science of rheology. In: **Review of Scientific Instruments**, v. 4, n. 9, p. 473-476, set. 1933.

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. In: **Geraldo Cechella Isaia. (Org.). Materiais de Construção Civil e Principios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 2ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2010, v. 2, p. 1651-1687.

CALMON, J. L., MORATTI, M., MORAES S., CENCI D., Self-compacting concrete using marble and granite sawing wastes as filler. In: The 2005 World Sustainable Building, SB05 Tokyo, 2005, Tokyo. **Proceedings**... Tokyo: SB05 Tokyo National Confrence Board, v. 1, p. 4146-4153.

CALMON, J. L.; SILVA, S. A. C. Mármore e granito no Espírito Santo: problemas ambientais e soluções. In: **Domingues, A. F.; Boson, P. H. G.; Alípaz, S. (Org.). A gestão dos recursos hídricos e a mineração**. 1ed. Brasília – DF: Agência Nacional das Águas e Instituto Brasileiro de Mineração, 2006, p. 199-231.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; SOUZA, F. L. S.; SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2, 1997, Salvador. *Anais*... Salvador: ANTAC, 1997, p. 64-75.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; SOUZA, F. L. S.; SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. Reciclagem de resíduos provenientes do corte de granito na produção de argamassas de assentamento. In: **Revista Engenharia, Ciência & Tecnologia**, Vitória, v. 2, p. 1-7, 1998.

CARAM, Rubens. Estrutura e propriedades dos materiais: **Estrutura cristalina**. [s.d.]. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~caram/estrutura.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2013.

CASTRO A. L., LIBÓRIO J. B. L., PANDOLFELLI V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão. In: **Revista Cerâmica**, São Carlos, v. 57, p. 63-75, 2011.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos / Instituto de Física de São Carlos/ Instituto de Química de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 141f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

CHEN, C.; STRUBLE, L. J.; ZHANG, H. Using Dynamic Rheology to Measure Cement-Admixture Interactions. In: **Journal of ASTM International**, v. 3, n. 3, mar. 2006.

CORRÊA, N. M.; CAMARGO JÚNIOR, F. B.; IGNÁCIO, R. F.; LEONARDI, G. R. Avaliação do comportamento reológico de diferentes géis hidrofílicos. In: **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 41, n. 1, jan./mar. 2005.

COSTA, M. R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. 2006. 131p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DE AZEREDO, S. R.; BOBROVNITCHII, G. S.; GUIMARÃES, R. S.; FILGUEIRA, M. Desenvolvimento de um novo compósito abrasivo de desbaste de rochas ornamentais. In: **Revista Matéria**, v. 13, n. 1, p. 203-208, 2008.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T.; HU, C.; SZITKAR, J. C.; JOLY, M.; DERKX, F. Evolution of the workability of superplasticized concretes: assessment with the BTRHEOM rheometer. In: International Rilem Conference – Production Methods and Workability of Concrete, 1996, Paisley/Scotland. **Proceedings**… London: E & FN Spon, jun. 1996, p. 377-388.

DE LARRARD, F.; HU, C.; SETRAN, T.; SZITKAR, J. C.; JOLY, M.; CLAUX, F.; DERKX, F. A new rheometer for soft-to-fluid concrete. In: **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 3, p. 234-243, mai./jun. 1997.

DE NOTTA, H. **Introducción a la Reología**. Sociedad Argentina de Tecnólogos en Recubrimientos – SATER. Disponível em: <http://www.sater.org.ar/Art.%20de%20De%20Notta.htm>. Acesso em: 30 de setembro de 2011.

FALCÃO I. P.; STELLIN JÚNIOR, A. Utilização de Finos de Serrarias do Espírito Santo nas Indústrias de Construção Civil. In: **Jornadas IBERMAC Materiais de Construção**. Madri, Espanha: 2001.

FERRARIS, C. F. Connection between the rheology of concrete and rheology of cement past. In: **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 43, p. 388-393, 1992.

FERRARIS, C. F. Measurements of rheological properties of high performance concrete: state of the art report. In: **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 104, n. 5, p. 461-478, 1996.

FERRARIS, C. F. **Measurement of the rheological properties of cement paste: a new approach, role of admixture in high performance concrete**, RILEM International Symposium, 1999.

FRANÇA, M. S.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Avaliação do comportamento de mistura de argamassas através de reometria rotacional. In: **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 165-174, abr./jun. 2012.

FRANÇA, M. S.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Influência do tempo de mistura nas propriedades reológicas de argamassas. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 9, 2011, Belo Horizonte. **Anais**... Belo Horizonte: SBTA, 2011.

FRANÇA, M. S.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Influência do procedimento de mistura em laboratório nas propriedades de argamassas. In: **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 111-124, abr./jun. 2013.

FREIRE, A. S.; MOTTA, J. F. M. Potencialidades para o aproveitamento econômico do rejeito da serragem do granito. In: **Revista Rochas de Qualidade**, São Paulo, ano XXV, Edição 123, p. 98-108, jul./ago. 1995.

FREITAS, C. **Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido**. 2010. 135f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

GHIO, V. A.; MONTEIRO P. J. M.; DEMSETZ, L. A. The rheology of fresh cement paste containing polysaccharide gums. In: **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 2, p. 243-249, 1994.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W.A. Reciclagem do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na construção civil. In: Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 3, 2002, Recife. **Anais**... Recife, 2002, p. 179-189.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos.** 2000. 135p. Dissertação (Mestrado) – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

HACKLEY, V. A.; FERRARIS, C. F. **Guide to rheological nomenclature: measurements in ceramic particle systems**, NIST special publication 946, 2001.

HAMINIUK, C. W. I. **Comportamento reológico e fracionamento péctico das polpas integrais de araçá (psidium catlleianum sabine) e amora-preta (rubus spp)**. 2005. 99f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de alimentos, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

HANSEN, W. C. False set in portland cement, In: International Symposium on the Chemistry of Cement, 4, 1960, Washington D.C. **Proceedings**… Washington D.C, 1960, p. 387-428.

HELMUTH, R. A. **Fly ash in cement and concrete**, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1987.

HELMUTH, R.; HILLS, L. M.; WHITING, D.A.; BHATTACHARJA, S. **Abnormal concrete performance in the presence of admixtures**, PCA, RP333, 1995, p. 25-26.

HU, C.; DE LARRARD, F.; SEDRAN, T.; BOULAY, C.; BOSC, F.; DEFLORENNE, F. Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete. In: **Materials and Structures**, v. 29, n. 10, p. 620-631, dez. 1996.

IZIDORO, D. R. **Influência da polpa de banana (musa cavendishii) verde no comportamento reológico, sensorial e físico-químico de emulsão**. 2007. 167f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste-a miniature slump test. In: **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102, jan. 1980.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. C. **Design and control of concrete mixtures**, 14th Edition, EB001.14T, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2002, 355p.

LABA, D. **Rheological properties of cosmetics and toiletries**. New York: Marcel Dekker, 1993, p. 09-33.

LEONARDI, G. R.; MAIA CAMPOS, P. M. B. G. Estabilidade de formulações cosméticas. In: **International Jornal Pharmaceutical Compounding**, v. 3, n. 4, p.154-156, 2001.

LI, Y.; YU, H.; ZHENG, L.; WEN, J.; WU, C.; TAN, Y. Compressive strength of fly ash magnesium oxychloride cement containing granite wastes. In: **Construction and Building Materials**, China, v. 38, p. 1-7, jan. 2013.

LIMA FILHO, V. X.; BEZERRA, A. C.; SANTOS, F. C.; NOGUEIRA, R. E. F. Q.; FERNANDES, A. H. M. Determinação de parâmetros para racionalização do processamento de rochas graníticas por abrasão. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 15, 1999, São Paulo. **Anais**... São Paulo: Sonopress, 1999.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. 121f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

LOPES, J. L. M. P.; BACARJI, E.; PAZINI A. E. J.; RÊGO, J. H. S.; PEREIRA, A. C. Estudo do potencial de utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como fíler, para a produção de concretos. In: Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão da UFG, 3, 2006, Goiânia. **Anais**... Goiânia: COMPEEX, 2006.

LYRA, J. S. **Estudo da influência de policarboxilato comercial na hidratação, reologia e físicoquímica de superfície do cimento**. 2010. 99f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MARTINS, A. L. P. **Estudo das propriedades reológicas do muco brônquico de pacientes sob fisioterapia respiratória**. 2004. 70f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fisioterapia. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

MEHTA, P. K. **Concrete: structure, properties, and materials**. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliff, New Jersey, 1986. 449p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

MESQUITA, E.; FROTA, C.; MARQUES, A.; MOREIRA, K.; COELHO, F. Avaliação das propriedades reológicas da pasta autoadensável com incorporação de resíduo de serragem de rochas ornamentais. In: Encontro de Pesquisa e Pós Graduação, 9., Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica, 9., Simpósio de Inovação Tecnológica, 3., Fortaleza. **Anais**... Fortaleza: IFCE, 2009.

MOTHÉ FILHO, H. F.; POLIVANOV, H.; MOTHÉ, C. G. Reciclagem dos resíduos sólidos de rochas ornamentais. In: **Anuário do Instituto de Geociências**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, v. 28, n. 2, p. 139-151, 2005.

MOURA, W. A.; LIMA, M. B. L.; CALMON, J. L.; MORATTI, M.; SOUZA, F. L. S. Produção de pisos intertravados com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais. In: Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 11, 2006, Florianópolis. **Anais**... Florianópolis: ENTAC, 2006, p. 4227-4236.

MUKHOPADHYAY, A. K.; JANG, S. **Using cement paste rheology to predict concrete mix design problems: technical report**, FHWA/TX-09/0-5820-1, Texas Transportation Institute, Austin, Texas, jul. 2009.

NEHDI, M.; RAHMAN, M. A. Effect of geometry and surface friction of test accessory on oscillatory rheological properties of cement pastes. In: **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 47, p. 416-424, set. 2004.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997, 828p.

NITA, C.; HOHN, V.M. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/451. ISSN 0103-9830. São Paulo, SP, 2007.

NUNES, R. L. S.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Reciclagem de resíduos de granito para uso na indústria de revestimentos cerâmicos. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 46, 2002, São Paulo. **Anais**… São Paulo, 2002, p. 1-13.

ODLER, I. Hydration, setting and hardening of portland cement. In: **Hewlett, P.C. (ed.). Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4ed. London: Arnold, 1998, Cap.6, p. 241-297.

PILEGGI, R. G., PANDOLFELLI, V. C. Reometria de concretos: Uma realidade brasileira para uma proposta internacional. In: Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 5, 2003, São Paulo. **Anais**... São Paulo, 2003, p. 1-20.

PILEGGI, R. G.; STUDART, A. R.; PANDOLFELLI, V. C. How mixing affects the rheology of refractory castables, part 1, part 2. In: **American Ceramic Society Bulletin**, Estados Unidos, v. 80, n. 6, p. 27-42, 2001.

PRINCE, W.; EDWARDS-LAJNEF, L. A.; AITCIN, P. C. Interaction between ettringite and a polynaphthalene sulfonate superplasticizer in a cementitious paste. In: **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 1, p.79-85, jan. 2002.

RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques, and applications**. Institute for Research in Construction National Research Council Canada Ottawa, Ontario, Canada, 2001.

REIS, A. S.; TRISTÃO, F. A. Ladrilho hidráulico piso tátil com adição de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais. In: **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 3, n. 4, p. 390-419, dez. 2010.

REIS, J. F. A. **Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado: estudo de caso**. 2008. 177f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

ROCHA, J. M. S. **Estudo da migração de gases em pastas de cimento para uso em poços de petróleo**. 2010. 143p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

ROMANO, R. C. O.; Schreurs, H.; Silva, F. B.; Cardoso, F. A.; Barros, M. M. S. B.; John, V. M.; Pileggi, R. G. Impacto do tipo de misturador e do tempo de mistura nas propriedades de argamassas industrializadas. In: **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 109-118, out./dez. 2009.

ROMANO, R. C. O.; TAKAHASHI, M. M.; LIBERATO, C. C.; PILEGGI, R. G. Caracterização reológica de pastas cimentícias com incorporadores de ar em diferentes temperaturas. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 9, 2011, Belo Horizonte. **Anais**... Belo Horizonte: SBTA, 2011.

SANTANA, J. G. A. **Cerâmicas porosas de dióxido de titânio aditivadas com proteínas de soja**. 2005. 145f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

SANTOS, G. R. S.; APOLINÁRIO, E. C. A.; RIBEIRO, D. V. Influência da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) na reologia das argamassas. In: **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 70-86, 2013.

SATO, V. Y.; EVANGELISTA, K. T. C.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; TRISTÃO, F. A. Estudo das propriedades reológicas de pastas de cimento de concretos bombeados. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 54., 2012, Maceió. **Anais**... Maceió: IBRACON, 2012.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Artiliber, 2006.

SCHULTZ, M.A. **Rheological studies of fresh cement pastes**. 1991. 192f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Cerâmica, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, 1991.

SCHULTZ, M. A.; STRUBLE, L. J. Use of oscillatory shear to study flow behavior of cement paste. In: **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 2, p. 273-283, mar. 1993.

SENAI. **Relatório técnico de distribuição granulométrica de materiais**. Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais – LDCM, Santa Catarina, Criciúma. 2013.

SOARES, R. B. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**. 2014. 163f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

STRUBLE, L. J.; JI. X. **Rheology**, Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology, Noyes Publications, New Jersey, 2001, p. 333-367.

STRUBLE, L. J; LEI, W. G. Rheological changes associated with setting of cement paste. In: **Advance Cement Based Material**, v. 2, n. 6, p. 224-230, nov. 1995.

STRUBLE, L. J.; SZECSY, R.; LEI, W. G.; SUN, G.K. Rheology of cement paste and concrete. In: **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 20, n. 2, p. 269-277, dez. 1998.

TA INSTRUMENTS. **Discovery hybrid accessories**. Disponível em: <http://www.tainstruments.com>. Acesso em: 20 out. 2011.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh concrete**, Pitman, 1983, 356p.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. Londres: Academic Press Limited, 1990.

TAYLOR, P. C.; GRAF, L. A.; ZEMAJTIS, J. Z.; JOHANSEN, V. C.; KOZIKOWSKI, R. L.; FERRARIS, C. F. **Identifying incompatible combinations of concrete materials: volume II**, FHWA HRT-06-080, Technical report, Alexandria, set. 2006.

TEIXEIRA, J. E. S. L.; SATO, V. Y.; AZOLIN, L. G.; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L.; CALMON, J. L. Estudo do comportamento reológico de pastas cimentícias utilizando reômetro de cisalhamento dinâmico. In: **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 7, n. 6, p. 922-939, dez. 2014.

ULIANA, J. G. **Estudo de tratamento térmico para aplicação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais como substituição parcial de cimento**. 2014. 214f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

VENÂNCIO, P. B. F. **Dosagem de argamassa para estaca raiz**. 2008. 173f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

WALLEVIK, O. The use of BML viscometer for quality control of concrete. In: Nordic Concrete Research, 1996, Finland. **Proceedings**... Nordic Concrete Research Meeting, Espoo, Finland, p. 235-236.

WILLIAMS, D. A.; SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M. The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste. In: **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 9, p. 1491-1496, jun. 1999.

WONG, G. S.; ALEXANDER, A. M.; HASKINS, R.; POOLE, T. S.; MALONE, P. G.; WAKELEY, L. **Portland-cement concrete rheology and workability: final report**, FHWA-RD-00-025, Federal Highway Administration, McLean, Virginia, abr. 2001.

YANG, M.; JENNINGS H. M. Influence of mixing methods on the microstructure and rheological behavior of cement paste. In: **Advanced Cement Based Materials**, v. 2, n. 2, p. 70-78, mar. 1995.

ZHANG, H. **Using dynamic rheology to explore the microstructure and stiffening of cementitious materials**, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.