

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

JULIA DELBONI DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E REOLÓGICAS DE
MATRIZES CIMENTÍCIAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DO
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS TRATADO
TERMICAMENTE**

VITÓRIA

2017

JULIA DELBONI DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E REOLÓGICAS DE
MATRIZES CIMENTÍCIAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DO
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS TRATADO
TERMICAMENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em 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.

VITÓRIA

2017

JULIA DELBONI DE OLIVEIRA

Análise de propriedades mecânicas e reológicas de matrizes cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente

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

COMISSÃO EXAMINADORA

Profª. Drª. Geilma Lima Vieira

Universidade Federal do Espírito Santo

Orientadora

Profª. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira

Universidade Federal do Espírito Santo

Examinadora Interna

Profª. Drª. Ing. Georgia Serafim Araújo

Instituto Federal do Espírito Santo

Examinadora Externa

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

O48a Oliveira, Julia Delboni de, 1989-
Análise de propriedades mecânicas e reológicas de matrizes
cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas
ornamentais tratado termicamente / Julia Delboni de Oliveira. –
2017.

159 f. : il.

Orientador: Geilma Lima Vieira.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Rochas ornamentais – Resíduos. 2. Resistência de
materiais. 3. Reologia. 4. Pozolanas. 5. Cimento. 6. Argamassa.
7. Pozolanicidade. I. Vieira, Geilma Lima. II. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à minha orientadora nesta pesquisa, Prof^a Geilma Lima Vieira, que esteve sempre presente ajudando nas tomadas de decisão com muita atenção e incentivo. Obrigada por acreditar na minha capacidade para realização da pesquisa e pelas conversas com sugestões valiosas não só para o trabalho, como também para a vida!

Agradeço também a querida Prof^a Jamilla, sempre disposta a conversar e sanar minhas dúvidas. Obrigada pelo carinho, atenção, incentivo e conhecimento compartilhado!

Aos técnicos do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC) da Ufes, Loriato, Márcio e Henrique agradeço pelo carinho, disposição e empenho na realização de parte dos ensaios desta pesquisa.

Ao Laboratório de Materiais Cerâmicos do IFES – Campus Vitória pela realização do ensaio de granulometria à laser do RBROTT e do cimento. Também agradeço à empresa Lafarge/Holcim pela doação do cimento e pela realização do ensaio de finura pelo método de Blaine no RBROTT.

Aos meus pais, Rubens e Eliana, por sempre acreditarem em mim, me apoiarem e me incentivarem. São meu porto seguro e minha fortaleza. A minha irmã, Rubia, por ser desde sempre minha amiga e companheira, com quem sempre posso contar. A vocês meu muito obrigada com muito carinho e amor.

Agradeço com muito carinho a Luís Gustavo, que foi fundamental durante essa trajetória. Sempre esteve presente me ajudando e incentivando, sendo meu companheiro e meu amigo. Concluímos mais uma etapa juntos!

Aos meus amigos, por sempre acreditarem em mim e me apoiarem e, principalmente, por entenderem a minha ausência em diversos momentos.

A CAPES, pelo apoio financeiro em parte desta pesquisa.

E principalmente à Deus, por mais essa conquista.

RESUMO

OLIVEIRA, Julia Delboni. ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E REOLÓGICAS DE MATRIZES CIMENTÍCIAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS TRATADO TERMICAMENTE. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

O Brasil é destaque na produção rochas ornamentais mundial, e o Espírito Santo sobressai como um dos principais estados produtores. Porém o processo de beneficiamento deste setor é grande gerador de resíduos, principalmente a lama abrasiva. Diversas pesquisas têm sido feitas utilizando o resíduo em matrizes cimentícias como material inerte com efeito fíler com intuito de incorporá-lo à construção civil. Entretanto, apesar dos bons resultados já encontrados o resíduo ainda não foi incorporado como material de construção civil. Buscando melhorar as características do resíduo foi realizado um tratamento térmico com objetivo de transformar o material em pozolana. O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico (RBROTT) foi submetido a ensaios de caracterização. Foram produzidas pastas cimentícias e argamassas contendo 0%, 10%, 15% e 20% de adição de RBROTT, em relação a massa de cimento, em três relações a/c (0,45, 0,55 e 0,65) e as argamassas no estado endurecido foram ensaiadas em 3 idades (28, 63 e 91 dias). De forma a avaliar a influência da adição no comportamento reológico das pastas, foram realizados ensaios de fluxo e de varredura de deformação e analisou-se a tensão de escoamento, viscosidade e módulo complexo. Nas argamassas foram feitos os ensaios de índice de consistência e massa específica no estado fresco e resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico no estado endurecido. O RBROTT apresentou resultados que atenderam aos critérios da norma e, portanto, pode ser considerado um material pozolânico. As pastas cimentícias com adição de RBROTT apresentaram aumento significativo na tensão de escoamento e viscosidade, assim como as argamassas tiveram aumento significativo na resistência à compressão axial.

Palavras chave: resíduo de rochas ornamentais, reologia, resistência mecânica, pozolanidade, pastas cimentícias, argamassas.

ABSTRACT

OLIVEIRA , Julia Delboni. MECHANICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES ANALYSIS OF CEMENT MATRICES WITH ADDITION OF ORNAMENTAL STONE WASTE AFTER THERMAL TREATMENT . 2017. Dissertation (Master in Civil Engineering) –Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2017.

Brazil is prominent in the production of ornamental stones worldwide, and Espírito Santo stands out as one of the main producing states. However the process of beneficiation of this sector is great generator of waste, mainly the abrasive mud. Several researches have been done using the residue in cementitious matrices as inert material with filler effect with the intention of incorporating it to the civil construction. However, despite the good results already found the waste has not yet been incorporated as civil construction material. In order to improve the characteristics of the residue, a thermal treatment (melting at 1200°C) was carried out in order to transform the material into pozzolana. The ornamental stone waste after thermal treatment (RBROTT) was submitted to characterization tests mainly to determine the index of pozzolanic activity. Cement pastes and mortar containing 0%, 10%, 15% and 20% of RBROTT addition were produced in three a/c ratios (0.45, 0.55 and 0.65) and the mortars in the hardened state were tested at 3 ages (28, 63 and 91 days). In order to evaluate the influence of the addition on the rheological behavior of the cement pastes, flow and strain sweep tests were performed and the yield stress, viscosity and complex modulus were analyzed. In the mortars were made tests of consistency (flow table tests) and specific mass in the fresh state and axial compressive strength and dynamic modulus of elasticity in the hardened state. The RBROTT presented results that met the criteria of the standard and, therefore, can be considered a pozzolanic material. The cement pastes with addition of RBROTT presented a significant increase in the yield stress and viscosity, as well as the mortars had a significant increase in the axial compressive strength.

Keywords: Ornamental waste stones, rheology, mechanical strength, pozzolanicity, cement pastes, mortars.

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1: Produção de rochas ornamentais no Brasil em 2016	28
Tabela 2: Compostos anidros do cimento Portland.....	34
Tabela 3: Traços utilizados na pesquisa	63
Tabela 4: Quantidade de amostras para caracterização reológica das pastas cimentícias	64
Tabela 5: Características do reômetro rotacional AR 2000ex	65
Tabela 6: Quantidade de corpos de prova para realização da etapa 2 da pesquisa	68
Tabela 7: Caracterização do RBRO sem tratamento térmico	70
Tabela 8: Caracterização do CP V ARI	71
Tabela 9: Caracterização agregado miúdo	71
Tabela 10: Pré-cisalhamentos testados por Sato (2015)	84
Tabela 11: Valores de área de histerese para os pré-cisalhamentos analisados	86
Tabela 12: Níveis adotados para as variáveis independentes	94
Tabela 13: Composição química do RBROTT	97
Tabela 14: Comparação do RBROTT com os limites da NBR 12653 (ABNT, 2015)	98
Tabela 15: Caracterização física do RBROTT	98
Tabela 16: Parâmetros reológicos definidos pelo modelo de Bingham e por Herschel-Bulkley	108
Tabela 17: Resultados da ANOVA para o modelo de Bingham	109
Tabela 18: Resultados da ANOVA para o modelo de Herschel-Bulkley	109
Tabela 19: Deformação crítica e módulo elástico para todos os traços	118
Tabela 20: Resultados da ANOVA para o módulo elástico	121
Tabela 21: Massa específica e índice de consistência para todos os traços .	124
Tabela 22: Valores médios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico para todos os traços.....	128
Tabela 23: Resultados da ANOVA para a resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aspersão da lama abrasiva sobre bloco durante o corte	30
Figura 2: Tear multifios em processo de corte	31
Figura 3: Evolução do volume de rochas processadas exportado pelo Brasil de 2011 a 2016	33
Figura 4: Estágios da hidratação do cimento Portland	35
Figura 5: Curvas de fluxo (a) e curvas de viscosidade (b) para diferentes tipos de fluidos	38
Figura 6: Comportamento tixotrópico e reopéxico representados através de gráficos.....	39
Figura 7: Geometrias de cilíndricos coaxiais, cone placa e placas paralelas ...	43
Figura 8: Área de histerese e curvas de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento e viscosidade x taxa de cisalhamento	46
Figura 9: Gráficos representativos do ensaio oscilatório com aplicação de deformação e tensão obtida como resposta	47
Figura 10: Ensaio de varredura de deformação em função do tempo.....	49
Figura 11: Gráfico componente elástica versus deformação para determinação da deformação crítica na região viscoelástica linear	49
Figura 12: Fluxograma geral do programa experimental.....	61
Figura 13: Reômetro rotacional AR 2000ex e computador acoplado	65
Figura 14: Detalhe do adesivo texturizado na geometria de placas paralelas e da placa peltier	65
Figura 15: Resultados do teste realizado com gap de 1 mm, 0,7 mm e 0,5 mm	67
Figura 16: RBRO antes e após tratamento térmico.....	72
Figura 17: Moinho de argolas.....	73
Figura 18: Recipiente de gesso antes e após tratamento térmico.....	73
Figura 19: Forno do tipo Mufla e RBRO preparado para dar início ao tratamento térmico	74
Figura 20: Procedimento de preparo do recipiente de gesso	75
Figura 21: RBROTT logo após o tratamento térmico e após limpeza da superfície	76
Figura 22: Trituradores de mandíbula utilizados (1 e 2)	76

Figura 23: Moinho de bolas	77
Figura 24: Ensaios de caracterização do RBROTT.....	77
Figura 25: Resíduo pronto para ensaio e visão geral do granulômetro à laser	78
Figura 26: Aparato experimental realização do ensaio de Blaine.....	79
Figura 27: Frasco de Le Chatelier	80
Figura 28: Hélice e liquidificador utilizados para mistura das pastas cimentícias	83
Figura 29: Tempos de mistura testados por Sato (2015)	83
Figura 30: Procedimento de mistura adotado nesta pesquisa	84
Figura 31: Procedimento de teste para verificação do pré-cisalhamento.....	85
Figura 32: Ciclos de cisalhamento com pré-cisalhamento de 100 s^{-1}	86
Figura 33: Ciclos de cisalhamento com pré-cisalhamento de 50 s^{-1}	87
Figura 34: Ciclos de cisalhamento com pré-cisalhamento de 150 s^{-1}	87
Figura 35: Misturador planetário.....	91
Figura 36: Mesa para determinação do índice de consistência.....	91
Figura 37: Equipamento para determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica	92
Figura 38: Detalhe do corpo de prova e prensa para rompimento dos corpos de prova	93
Figura 39: Distribuição granulométrica do RBROTT	99
Figura 40: Distribuição granulométrica do CP V ARI.....	99
Figura 41: Compração do volume retido (%) entre o RBROTT e o CP V ARI	100
Figura 42: Verificação do índice de desempenho com o cimento	101
Figura 43: Verificação do índice de atividade pozolânica com a cal	101
Figura 44: Curvas de fluxo (a) e curvas de viscosidade (b) para relação a/c 0,45	103
Figura 45: Curvas de fluxo (a) e curvas de viscosidade (b) para relação a/c 0,55	104
Figura 46: Curvas de fluxo (a) e curvas de viscosidade (b) para relação a/c 0,65	105
Figura 47: Efeito isolado da variável relação a/c sobre a tensão de escoamento determinada pelo modelo de Bingham.....	110
Figura 48: Efeito da interação entre a porcentagem de adição e a relação a/c na tensão de escoamento obtida pelo modelo de Bingham.....	110

Figura 49: Efeito isolado da variável relação a/c sobre a tensão de escoamento determinada pelo modelo de Herschel-Bulkley	111
Figura 50: Efeito da interação entre a porcentagem de adição e a relação a/c na tensão de escoamento obtida pelo modelo de Herschel-Bulkley	111
Figura 51: Efeito isolado da variável relação a/c sobre a viscosidade aparente determinada pelo modelo de Bingham	114
Figura 52: Efeito da interação entre a porcentagem de adição e a relação a/c viscosidade aparente obtida pelo modelo de Bingham	114
Figura 53: Efeito isolado da variável porcentagem de adição sobre o índice de consistência determinado pelo modelo de Herschel-Bulkley	115
Figura 54: Efeito isolado da variável relação a/c sobre o índice de consistência determinado pelo modelo de Herschel-Bulkley	115
Figura 55: Efeito da interação entre a porcentagem de adição e a relação a/c no índice de consistência obtido pelo modelo de HB	116
Figura 56: Curva de módulo elástico x deformação para relação a/c 0,45.....	119
Figura 57: Curva de módulo elástico x deformação para relação a/c 0,55.....	119
Figura 58: Curva de módulo elástico x deformação para relação a/c 0,65	120
Figura 59: Efeito isolado da variável porcentagem de adição sobre o módulo elástico	122
Figura 60: Efeito isolado da variável relação a/c sobre o módulo elástico	122
Figura 61: Resultados de massa específica com relação a porcentagem de adição de RBROTT	125
Figura 62: Resultados de índice de consistência com relação à porcentagem de adição de RBROTT para as diferentes relações a/c	126
Figura 63: Efeito isolado da variável porcentagem de adição sobre a resistência à compressão axial	129
Figura 64: Efeito isolado da variável idade sobre a resistência à compressão axial	130
Figura 65: Efeito isolado da variável relação a/c sobre a resistência à compressão axial	130
Figura 66: Efeito da interação entre porcentagem de adição de RBROTT e relação a/c sobre a resistência à compressão axial	131
Figura 67: Efeito da interação entre porcentagem de adição de RBROTT e idade sobre a resistência à compressão axial	133

Figura 68: Efeito isolado da variável porcentagem de adição no módulo de elasticidade dinâmico	135
Figura 69: Efeito isolado da relação a/c no módulo de elasticidade dinâmico	135
Figura 70: Efeito da interação entre porcentagem de adição de RBROTT e relação a/c sobre o módulo de elasticidade dinâmico	136
Figura 71: Correlação entre a tensão de escoamento obtida pelo modelo de Bingham e o índice de consistência das argamassas	139
Figura 72: Correlação entre a tensão de escoamento obtida pelo modelo de Herschel-Bulkley e o índice de consistência das argamassas	139
Figura 73: Correlação do módulo elástico e do módulo de elasticidade dinâmico	141

LISTAS DE SIGLAS

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de Variância

CESAN – Companhia Espírito Santense de Saneamento

CP V ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

DRX – Difração de raios X

HB – Herschel-Bulkley

IFES – Instituto Federal do Espírito Santo

LEMAC – Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção

NBR – Norma Brasileira

NE – Não Especificado

PF – Perda ao Fogo

RBRO – Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais

RBROTT – Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais após Tratamento Térmico

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos	21
1.1.1	Objetivo Geral.....	21
1.1.2	Objetivos Específicos	22
1.2	Estrutura do trabalho.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	Adições minerais	25
2.2	Rochas ornamentais	27
2.2.1	Processo de produção das rochas ornamentais.....	29
2.2.2	Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.....	31
2.3	Comportamento reológico de pastas cimentícias.....	33
2.3.1	Hidratação do cimento Portland.....	34
2.3.2	Conceitos reológicos	36
2.3.3	Modelos reológicos.....	41
2.4	Caracterização do comportamento reológico de pastas cimentícias ..	42
2.4.1.1	Ensaio de Fluxo	44
2.4.2	Ensaio de varredura de deformação.....	47
2.4.3	Influência do tipo de misturador e do tempo de mistura	50
2.5	Estudos e aplicações do RBRO em matrizes cimentícias.....	51
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1	Planejamento dos experimentos	59
3.1.1	Variáveis dependentes	59
3.1.2	Variáveis independentes	59
3.1.3	Variáveis de controle	59
3.2	Programa experimental	60

3.2.1	Pastas cimentícias.....	63
3.2.2	Argamassas.....	67
3.3	Materiais.....	69
3.3.1	Resíduo do corte de rochas ornamentais.....	69
3.3.2	Cimento.....	70
3.3.3	Água.....	71
3.3.4	Agregado miúdo.....	71
3.4	Métodos.....	72
3.4.1	Produção do RBROTT.....	72
3.4.2	Caracterização do RBROTT.....	77
3.4.2.1	Caracterização Física.....	77
3.4.2.2	Caracterização química.....	81
3.4.3	Pastas cimentícias.....	82
3.4.3.1	Procedimento de mistura das pastas cimentícias.....	82
3.4.3.2	Métodos de ensaios reológicos.....	88
3.4.4	Produção e ensaios nas argamassas.....	90
3.4.5	Análise estatística dos dados.....	93
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	96
4.1	Caracterização do RBROTT.....	96
4.1.1	Caracterização química.....	96
4.1.2	Caracterização física.....	98
4.1.3	Atividade pozolânica.....	100
4.2	Ensaio reológicos.....	102
4.2.1	Ensaio de fluxo.....	102
4.2.1.1	Análise dos parâmetros reológicos.....	107
4.2.2	Ensaio de varredura de deformação.....	118
4.3	Ensaio nas argamassas.....	123

4.3.1	Estado fresco.....	124
4.3.1.1	Massa específica	124
4.3.1.2	Índice de consistência.....	126
4.3.2	Estado endurecido.....	127
4.3.2.1	Resistência à compressão axial.....	129
4.3.2.2	Módulo de elasticidade dinâmico	134
4.4	Correlação entre as propriedades reológicas das pastas cimentícias e as propriedades das argamassas.....	138
4.4.1	Correlação entre a tensão de escoamento das pastas cimentícias e o índice de consistência das argamassas.....	138
4.4.2	Correlação entre o módulo elástico das pastas cimentícias no estado fresco e o módulo de elasticidade das argamassas.....	141
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	144
5.1	Conclusão geral	144
5.2	Conclusões específicas.....	144
5.2.1	Quanto a atividade pozolânica do RBROTT	144
5.2.2	Pastas cimentícias.....	145
5.2.2.1	Ensaio de fluxo.....	145
5.2.2.2	Ensaio de varredura de deformação	146
5.2.3	Argamassas.....	146
5.2.3.1	Estado fresco	146
5.2.3.2	Estado endurecido	147
5.2.4	Correlação entre os parâmetros reológicos das pastas cimentícias e as propriedades das argamassas	147
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	148
	REFERÊNCIAS.....	150

Capítulo 1

Introdução

1 INTRODUÇÃO

Discussões acerca da questão ambiental são cada vez mais presentes na sociedade, seja buscando uma maior consciência ambiental da população, ou através da busca de soluções mais sustentáveis para os impactos negativos gerados ao meio ambiente pela indústria.

Assim, espera-se que o desenvolvimento de novas técnicas e novos materiais não esteja ligado tão somente à questão econômica, mas que, além disso, envolva também a questão ambiental, uma vez que já é possível observar os efeitos da intensa industrialização como, por exemplo, a elevada quantidade de resíduos que são produzidos e descartados pelos diversos setores da indústria.

A deposição em aterros sanitários legalizados é uma opção bastante utilizada para destinação de resíduos, porém tem custos substanciais, ocupa uma quantidade elevada de área e pode trazer prejuízos ao meio ambiente (MÁRMOL *et al.*, 2011). Portanto, a reciclagem e o reaproveitamento de resíduos se apresentam como uma alternativa a deposição desses materiais em aterros sanitários e já é uma prática estabelecida há anos no Brasil (JOHN, 2000).

A indústria da construção civil se apresenta como uma grande absorvedora de resíduos, uma vez que é uma das maiores consumidoras de matéria prima do mundo. Além disso, também é observada elevada demanda de novas construções, já que é responsável por prover um ambiente construído adequado para toda e qualquer atividade humana (MÁRMOL *et al.*, 2011; JOHN, 2000).

Destaca-se, dentre os setores da indústria com ampla geração de resíduos, o setor de rochas ornamentais que vem apresentando um crescimento promissor nos últimos anos, principalmente no Brasil. O país está entre os cinco maiores produtores de rochas ornamentais do mundo, em 2016 produziu cerca de 9,5 milhões de toneladas e movimentou, com exportações, aproximadamente US\$ 1,14 milhão (ABIROCHAS, 2017).

Entre os estados brasileiros, o Espírito Santo é destaque nacional na produção e exportação de rochas ornamentais. No ano de 2016 o Espírito Santo exportou aproximadamente 1,8 milhão de toneladas, o que corresponde a

aproximadamente 75% de participação no mercado nacional de exportação de rochas ornamentais (ABIROCHAS, 2017).

O processo de produção de rochas ornamentais consiste, principalmente, em duas fases, sendo elas a extração dos blocos de rocha nas lavras, seguida do beneficiamento nas serrarias que inclui o desdobramento dos blocos, polimento e corte das chapas em dimensões comerciais.

A etapa de desdobramento dos blocos é realizada com equipamentos denominados teares que podem ser de fio diamantado, que geram resíduo composto de rocha moída e água, ou de lâminas metálicas (denominado tear convencional) em que o resíduo é composto de rocha moída, cal e granalha de aço.

Sabe-se que durante o beneficiamento dos blocos de rocha parte de seu volume é perdido sob a forma de pó, que misturado com água e outros materiais se apresenta em forma de lama abrasiva. De acordo com Chiodi (2004) e Calmon e Silva (2006), esse valor corresponde de 25% a 30% do volume do bloco.

A lama abrasiva ou resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) gerado nas serrarias deve ser descartado em aterros sanitários legalizados e o descarte é de responsabilidade da empresa produtora de rochas ornamentais, de acordo com a instrução normativa nº 019/2005 do IEMA (ESPÍRITO SANTO, 2005), o que gera custos adicionais para a empresa.

Segundo Uliana (2014), o RBRO vem sendo pesquisado e utilizado em diversos produtos da construção civil como blocos, telhas, ladrilhos, argamassas e concretos, principalmente levando em consideração o efeito fíler que a aplicação do resíduo proporciona. A incorporação do RBRO busca melhorias no comportamento mecânico dos materiais, na durabilidade, além de proporcionar redução no uso de agregados naturais e aglomerantes.

Inúmeras pesquisas são realizadas visando à utilização do RBRO na construção civil, em diversas áreas e aplicações, como por exemplo, em ladrilhos hidráulicos (REIS, 2008), para produção de telhas (TORRES *et al.*, 2008), tijolos (ELICHE-QUESADA *et al.*, 2012; BILGIN *et al.*, 2013), concreto betuminoso (KARASBAHIN e TERZI, 2007; AKBULUT, 2012; GOTTARDI, 2012; FONSECA,

2015; COSME, 2014), argamassas (MÁRMOL *et al.*, 2010; AL-AKHRAS *et al.*, 2010; CORINALDESI *et al.*, 2010; COLANGELO *et al.*, 2010; VARDHAN *et al.*, 2015), na produção de cimento (ARUNTAS *et al.*, 2010; JAIN, 2012), na produção de vidros (MARÇAL, 2011; BABISK, 2009) e na produção de concretos (CALMON *et al.*, 2005; GENDEL *et al.*, 2012).

Outras pesquisas ainda apontam as características pozolânicas que o RBRO apresenta após tratamento térmico a elevadas temperaturas (ULIANA, 2014; VAZZOLER, 2015; MITTRI, 2016) e enfatizam o potencial de utilização desse material como adição pozolânica em matrizes cimentícias, pois oferecem conclusões positivas quanto ao uso do RBRO após tratamento térmico.

Pozolanas são materiais que, quando em contato com a água, reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e formam compostos naturalmente resultantes do processo de hidratação do cimento Portland e assim passam a ter propriedades cimentantes. Entretanto, as reações pozolânicas ocorrem de forma mais lenta do que as principais reações de hidratação do cimento Portland (ALVES 2008; MEHTA E MONTEIRO, 2014)

A maior parte das pesquisas é voltada para o emprego do RBRO em argamassas e concretos para a verificação das propriedades mecânicas, como resistência à compressão e resistência à tração e para verificação no estado fresco de propriedades como a consistência.

Porém, em geral o comportamento de concretos e argamassas no estado fresco está diretamente relacionado com o comportamento da pasta cimentícia (CASTRO *et al.*, 2011). Uma forma de avaliar o comportamento de pastas cimentícias é através da reologia, que é um ramo da ciência que estuda o comportamento de corpos sólidos, líquidos ou gasosos após a aplicação de tensões ou deformações, relacionando as variáveis tensão de cisalhamento, tempo e taxa de deformação (CARDOSO *et al.*, 2005; SCHRAMM, 2006).

A literatura sugere alguns ensaios que podem ser realizados para avaliação do comportamento reológico, tais como: ensaio de fluxo, ensaio de varredura de deformação, varredura de tempo e varredura de frequência, *squeeze flow*, *vane test*, entre outros.

Através desses ensaios é possível determinar parâmetros reológicos que auxiliam na análise do comportamento do material no estado fresco e que estão relacionados à diversas etapas da aplicação de concretos e argamassas.

Segundo Betioli *et al.*, (2009), processos relacionados à mistura, transporte e aplicação são melhores avaliados pelo ensaio de fluxo, já processos relacionados a consolidação e pega do cimento são melhor descritos por ensaios oscilatórios e, em situação em que o material é submetido a esmagamentos (compressão) a melhor técnica de avaliação é o *squeeze-flow*.

Além disso, os ensaios fornecem valores para propriedades como tensão de escoamento e viscosidade aparente. A tensão de escoamento refere-se à mínima tensão que deve ser aplicada para que o material dê início ao escoamento, ou seja, deformar-se. Já a viscosidade aparente relaciona-se com a capacidade do material em manter-se coeso, ou seja, evitar a segregação e manter a trabalhabilidade durante toda a aplicação.

Porém, pesquisas relacionadas ao estudo do comportamento reológico de pastas cimentícias com incorporação do RBRO e do RBRO após tratamento térmico ainda são incipientes. Nota-se que a maior parte das pesquisas é voltada para avaliação do comportamento mecânico de concretos e argamassas.

Dessa forma, esta pesquisa visa avaliar a incorporação de RBRO após tratamento térmico em pastas cimentícias em percentuais de 0%, 10%, 15% e 20% através da determinação de parâmetros reológicos, como tensão de escoamento e viscosidade aparente e de propriedades no estado fresco e propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico de argamassas produzidas com os mesmos percentuais de incorporação de RBRO após tratamento térmico.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico no comportamento reológico de pastas cimentícias e nas propriedades de argamassas no estado fresco e no estado endurecido.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar se após tratamento térmico o RBRO apresenta atividade pozolânica;
- Avaliar a influência de diferentes percentuais de adição de RBROTT nas propriedades reológicas de tensão de escoamento e viscosidade aparente de pastas cimentícias através do ensaio de fluxo;
- Avaliar a influência de diferentes percentuais de adição de RBROTT na componente elástica (G') do módulo complexo (G^*) e na deformação crítica de pastas cimentícias através do ensaio da varredura de deformação;
- Avaliar a influência de diferentes percentuais de adição de RBROTT nas propriedades das argamassas no estado fresco (massa específica e índice de consistência) com diferentes relações a/c;
- Avaliar a influência de diferentes percentuais de adição de RBROTT na resistência à compressão axial (estado endurecido) das argamassas em diferentes idades e com diferentes relações a/c;
- Avaliar a influência de diferentes percentuais de adição de RBROTT no módulo de elasticidade dinâmico (estado endurecido) das argamassas em diferentes idades e com diferentes relações a/c;
- Determinar se há uma correlação entre a tensão de escoamento obtida nos ensaios reológicos com o índice de consistência das argamassas no estado fresco;
- Determinar se há uma correlação entre o módulo elástico (G') obtido nos ensaios reológicos com o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas no estado endurecido.

1.2 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas e é apresentada a seguir uma descrição sucinta do conteúdo de cada capítulo.

No capítulo 1 é feita a introdução do trabalho onde são descritas a importância e a justificativa do tema, além dos objetivos e da estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica e traz o contexto e a produção do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, a importância e a utilização de adições minerais, principalmente das pozolanas, aspectos sobre reologia de pastas e ensaios reológicos, assim como aspectos relacionados a análise de argamassas e seus ensaios e resultados de pesquisas anteriores que utilizaram o resíduo em matrizes cimentícias tanto no aspecto reológico de pastas quanto em relação a argamassas.

O capítulo 3 é destinado ao programa experimental desta pesquisa e descreve as variáveis envolvidas, os materiais utilizados e suas características e os métodos utilizados para tratamento térmico e moagem do resíduo e para realização dos ensaios realizados durante a execução do programa experimental.

O capítulo 4 traz os resultados obtidos através da realização dos ensaios expostos no capítulo anterior, os resultados da análise estatística aplicada aos dados coletados e uma discussão baseada na revisão bibliográfica e em um comparativo dos resultados encontrados.

O capítulo 5 contém as principais conclusões obtidas com esta pesquisa através das observações, resultados e análises realizadas e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas e normativas utilizadas para fundamentação e elaboração deste trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa fornecer a base teórica utilizada para realização desta pesquisa, que auxiliou o aprimoramento e compreensão dos métodos utilizados. São apresentados conceitos de reologia e técnicas experimentais que ajudaram na elaboração do programa experimental desta pesquisa, além de estudos que envolvem a utilização do RBRO e do RBROTT em matrizes cimentícias de forma a entender melhor as questões relacionadas a utilização destes materiais.

2.1 Adições minerais

A construção civil é um setor que consome elevada quantidade de matéria-prima, visto que demanda a utilização de diversos materiais tais como cimento, água, areia, brita, concreto, argamassas, madeira, vidros, aço, blocos entre outros.

Um dos materiais consumidos pela construção civil são as adições minerais que vêm sendo amplamente utilizadas para fabricação de cimentos compostos e também como componentes de materiais cimentícios como concretos e argamassas, tanto pela diminuição de custos quanto pela melhoria acarretada em diversas propriedades (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Adições minerais normalmente caracterizam-se por serem materiais silicosos e finamente divididos, que quando utilizados em matrizes cimentícias provocam melhorias tanto em propriedades no estado fresco como a trabalhabilidade, quanto no estado endurecido como a resistência mecânica e a durabilidade (PARK *et al.*, 2005; MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) as adições minerais podem ser classificadas quanto ao tipo de reação que proporcionam em: pozolânicas, cimentantes e inertes. Também podem ser classificadas quanto a sua origem em materiais naturais e em subprodutos industriais, que vem sendo cada vez mais utilizados como adições minerais devido a aspectos econômicos e ambientais.

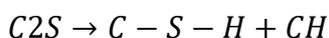
As adições inertes são aquelas que não apresentam nenhuma reação química com a água ou com demais compostos presentes na mistura. São comumente denominados de fíleres devido a elevada finura que apresentam e são normalmente utilizados com função de preenchimento de poros e densificação da matriz cimentícia, devido a ação física de empacotamento granulométrico,

que provoca melhorias em algumas propriedades de materiais cimentícios como concretos e argamassas (GONÇALVES, 2000; DAL MOLIN 2011).

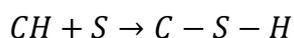
Já as adições cimentantes são aquelas que, ao contrário dos materiais inertes, reagem com a água e formam produtos com características cimentantes. Porém, a reação apenas na presença de água ocorre de forma lenta, que pode ser acelerada na presença de hidróxido de cálcio originário da reação do cimento Portland com a água (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Por fim, as adições pozolânicas, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014) são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, quando finamente moídos e na presença de água são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio (CH) oriundo da hidratação do cimento à temperatura ambiente e formar compostos com propriedades aglomerantes.

Para entender melhor como a reação pozolânica funciona, é mostrado logo abaixo como se dá a reação de hidratação dos compostos anidros do cimento Portland, tomando o silicato dicálcio (C_2S), como exemplo (MEHTA E MONTEIRO, 2014).



De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o produto principal oriundo da reação de hidratação é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), porém também é formado hidróxido de cálcio (CH). A reação da pozolana acontece justamente com o CH disponível, conforme segue.



Ainda segundo os autores, a eficiência e importância do uso de pozolanas em cimentos e concretos é devido a principalmente três aspectos da reação pozolânica.

Um deles é que a reação consome o hidróxido de cálcio gerado da reação de hidratação, o que resulta em melhoria na durabilidade da pasta hidratada em ambientes ácidos. O segundo é que a reação é lenta, fazendo com que a liberação de calor e o ganho de resistência mecânica também sejam lentos. Por fim, o último aspecto refere-se ao fato de que a reação pozolânica produz

compostos eficientes no preenchimento dos vazios da pasta, conferindo melhoria na resistência mecânica e impermeabilidade da matriz (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Além disso, a finura do material pozzolânico tem grande influência sobre sua potencialidade pozzolânica. Exemplo disso é o metacaulim, pozzolana utilizada usualmente para produção de concretos que é um material amorfo cuja atividade pozzolânica se dá devido a sua desordem cristalina e pela sua elevada área específica (MEDEIROS *et al.*, 2015). Com relação ao pó de vidro, Shi *et al.*, (2005) mostraram que quanto maior a finura deste material, maior era sua atividade pozzolânica.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) classifica as pozzolanas de acordo com a sua origem, como segue:

- Classe C: cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, que obedeçam aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014)
- Classe N: pozzolanas naturais e artificiais que obedeçam aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014), como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calocinadas.
- Classe E: quaisquer pozzolanas, não contempladas nas classes C e N que obedeçam aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014)

2.2 Rochas ornamentais

As rochas ornamentais são produtos naturais, pedras extraídas diretamente da natureza, que após a extração passam por um processo de beneficiamento e então podem ser utilizadas para diversos fins. Para Frascá (2007), rochas ornamentais são todas aquelas aproveitadas devido a sua aparência estética e utilizadas como peças decorativas, trabalhos artísticos e materiais de construção civil, em bancadas, soleiras, revestimento de paredes, entre outros.

Há uma grande aceitação do mercado com relação aos produtos de rochas ornamentais, pois estes podem apresentar uma diversidade de padrões

estéticos que se adequam a necessidade do usuário e proporcionam à edificação imponência, beleza, sofisticação e durabilidade (REIS, 2008).

O mercado de rochas ornamentais mundial é muito expressivo e movimenta bilhões de dólares por ano. Em 2013, a produção estimada de rochas ornamentais atingiu 123,5 Mt e para 2020 estima-se que essa produção ultrapasse 170 Mt. É visível o crescimento do setor de rochas ornamentais com o passar dos anos, saindo de uma produção de 1,8 milhão t/ano na década de 1920, para uma produção atual de 130 milhão t/ano e movimentando cerca de US\$ 130 bilhões por ano (ABIROCHAS, 2014).

A produção brasileira de rochas ornamentais é destaque mundial e tem se modificado ao longo dos anos, passando apenas de exportadora de rochas brutas para comercializadora de rochas processadas também. Em 2016 as exportações de rochas processadas compuseram 80,15% do faturamento e 55,94% do volume físico (ABIROCHAS, 2017).

A produção de rochas ornamentais no Brasil concentra-se principalmente em mármore e granitos, visto que é o principal produto de exportação, como observa-se na Tabela 1.

Tabela 1: Produção de rochas ornamentais no Brasil em 2016

Tipos de rochas	Volume físico exportado (1000 t)	Participação no faturamento (%)
Granitos e rochas similares, incluindo quartzito e pedrasabão	2215,7	87,6
Mármore e rochas similares	59,1	5,14
Ardósias	99,7	3,50%
Quartzitos foliados e maciços	82,4	3,68

Fonte: ABIROCHAS (2017)

Dentre os estados brasileiros produtores de rochas ornamentais, o Espírito Santo se destaca como o maior produtor e exportador, seguido pelo estado de Minas Gerais e pelos estados da Região Nordeste (ABIROCHAS, 2017).

De acordo com a CENTRORochas (2014) mais de 90% dos investimentos do setor de rochas ornamentais no Brasil são realizados no Espírito Santo. Em 2016, o Espírito Santo exportou 1,8 Mt, correspondendo a aproximadamente

75% do total nacional exportado e 81% do total do faturamento das exportações brasileiras (ABIROCHAS, 2017).

2.2.1 Processo de produção das rochas ornamentais

A produção de rochas ornamentais é feita através de várias etapas que partem da extração de blocos diretamente da natureza e vão até o acabamento do produto final, e em todas estas etapas ocorre à geração de resíduos (CALMON; SILVA, 2006).

A primeira etapa é a extração do material da jazida e é um processo chamado lavra em que são retirados blocos de pedra da matriz rochosa, que deve ser definida e estudada anteriormente para definição de aspectos como custo da extração, melhor técnica a ser utilizada, dimensão ideal dos blocos, entre outros. Normalmente são extraídos blocos que tem entre 5m³ e 10m³ de volume e é gerado o resíduo da lavra, que consiste em pedaços de pedra que não foram utilizados ou rochas que fissuraram (REIS, 2008; GONÇALVES, 2000).

Após a lavra os blocos são transportados para as usinas de beneficiamento, onde ocorrem às etapas de desdobramento, polimento e corte.

O processo de desdobramento transforma o bloco em chapas através de serragem e corte utilizando equipamentos denominados teares, que podem ser de dois diferentes tipos: tear convencional, que utiliza lâminas metálicas ou tear de fios diamantados. O tear convencional é assim denominado, pois é o tipo mais comum encontrado nas serrarias do Brasil, porém a quantidade de teares de fio diamantado vem crescendo a cada ano, pois apesar de ser mais caro que o tear de lâminas metálicas, possui uma capacidade de corte maior (ULIANA, 2014; REIS, 2008).

Segundo a ABIROCHAS (2015), houve um aumento de 10% da capacidade de serragem no Brasil, devido ao aumento do número de teares de fio diamantado. Com cerca de 320 teares de fio diamantado em operação em 2015, o Brasil possui o maior parque mundial de serragem baseado nessa tecnologia ABIROCHAS (2016).

A utilização de teares para a serragem e corte dos blocos requer o uso de uma polpa (lama) abrasiva que auxilia o processo de corte, como mostra a Figura 1.

Figura 1: Aspersão da lama abrasiva sobre bloco durante o corte



Fonte: Uliana (2014)

Quando utilizado o tear convencional para a serragem e corte dos blocos a lama abrasiva é constituída de água, cal, granalha de aço e resíduo de rocha oriundo do corte de outros blocos.

Essa lama tem como função lubrificar, esfriar as lâminas de serragem, evitar a oxidação, limpar os canais entre as chapas e servir como abrasivo para facilitar o processo de corte, que ocorre devido ao atrito das lâminas de aço contra o bloco (REIS, 2008; ULIANA 2014; SOARES, 2014).

A lama abrasiva deve ser recirculada no tear para utilização no corte de diversos blocos, esse processo é realizado através de uma bomba de eixo vertical que é responsável por aspergir a lama sobre as lâminas e blocos e também por retirar de circulação a parcela da lama que já teve sua viscosidade elevada devido ao acréscimo contínuo de finos provenientes do corte. O controle da viscosidade é feito através da adição de água e cal na lama quando recirculada, porém quando esse controle já não é mais possível a lama deve ser descartada (REIS, 2008; CALMON *et al.*, 1997).

Já no tear de fios diamantados a lama é composta apenas por água e resíduo de rocha moída, uma vez que é necessária apenas a aspersão de água para resfriamento e lubrificação dos fios, como é possível observar na Figura 2. E, ao contrário do que ocorre com o tear convencional, a lama é descartada sem recircular pelo processo de corte.

Figura 2: Tear multifios em processo de corte



Fonte: Uliana (2014)

Depois de concluída a etapa de serragem e corte dos blocos, as chapas produzidas devem passar pela etapa de acabamento da superfície que pode ser feito por polimento, levigamento e lustro. Esta etapa também é geradora de resíduo, que é composto por água, resíduo de rocha e resinas utilizadas para o acabamento do polimento (MARÇAL, 2011).

Por fim, a última etapa do processo produtivo é o corte da chapa nas dimensões requeridas através de projeto pelo cliente final nas marmorarias e também gera resíduo composto por água e resíduo de rocha. Este resíduo, assim como o resíduo da etapa de polimento é gerado em menor quantidade que o resíduo proveniente da etapa de corte (MARÇAL, 2011).

2.2.2 Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais

A principal etapa geradora de resíduo é a de serragem e corte dos blocos, seguida pela etapa de polimento. Os resíduos das duas etapas são armazenados juntos depois de eliminados sob a forma de lama. Esse resíduo é o enfoque deste trabalho, denominado por resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO).

Esse resíduo, após certo período de uso durante o processo de beneficiamento das rochas ornamentais deve ser descartado após atingir um determinado grau de viscosidade a partir do qual perde sua funcionalidade no processo (ULIANA, 2014). O descarte desse resíduo durante muitos anos foi realizado depositando-o em lagoas de sedimentação diretamente em contato com o solo.

No entanto, atualmente o que observa-se é que diversas empresas têm utilizado um sistema de canaletas e tubulações para transportar o resíduo até locais de armazenagem, em seguida o resíduo é encaminhado para um sistema de filtro prensa que tem como objetivo a redução do teor de umidade do resíduo e reaproveitamento da água utilizada no processo.

Após a secagem no filtro prensa o resíduo deve ser encaminhado para aterros legalizados para seu descarte, o que gera custos consideráveis para a empresa beneficiadora de rochas ornamentais, tanto com a deposição do resíduo nos aterros, como com o transporte até os locais de destinação.

Quando o descarte não ocorre de forma correta, o resíduo é descartado em aterros clandestinos ou até mesmo é lançado diretamente na natureza. O descarte inadequado pode causar poluição das águas dos rios, comprometimento da sobrevivência da fauna e flora e outros impactos ambientais (MOURA E LEITE, 2011).

Além disso, Marmól *et al.*, (2010) enfatizam que a deposição do resíduo em rios e aterros não é uma solução ambientalmente segura e que a reutilização em outros setores da indústria é uma alternativa viável.

Al-Akhras *et al.*, (2010) comentam que além das questões ambientais, há também a preocupação com problemas de saúde que podem ser gerados na população devido a deposição incorreta do resíduo e, ainda sobre essa temática, Gonçalves (2000) cita a silicose como uma doença que pode ser causada em trabalhadores do setor de rochas, uma vez que o resíduo quando seco se apresenta na forma de pó que pode ser facilmente aspirado.

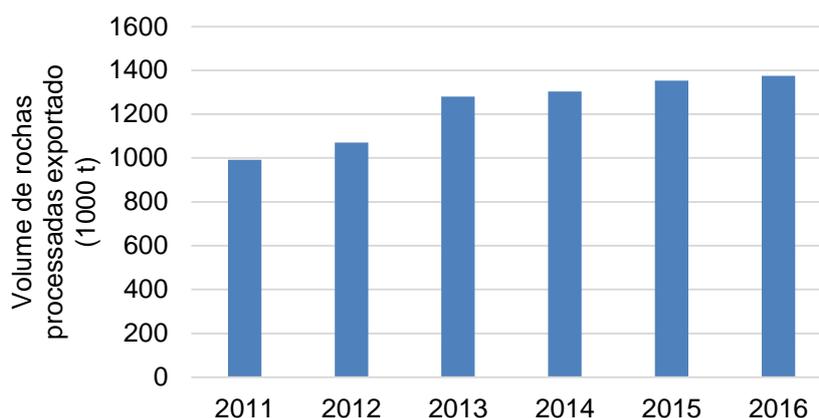
De acordo com Calmon e Silva (2006), de 25% a 30% do bloco é transformado em resíduo durante o processo de serragem e corte, quando utilizado o tear convencional. Já quando utilizado o tear de fio diamantado esse percentual cai para 20%. Careddu *et al.*, (2013) afirmam que aproximadamente 20% a 30% do produto final do processamento se torna resíduo.

De acordo com a ABIROCHAS (2016), em 2015 foram produzidas 9,5 Mt de rochas ornamentais, gerando aproximadamente 3,50 Mt de resíduo do processamento, o que corresponde a 41% da produção total de rochas, considerando desde a extração até o esquadrejamento das peças.

Dessa forma, merece destaque a análise de que, mesmo que o montante de resíduo seja depositado em aterros adequados, a exportação de rochas beneficiadas vem crescendo expressivamente a cada ano e a proliferação de aterros acabará por esgotar as áreas aptas para este tipo de deposição e transformará diversas regiões em áreas desérticas.

A Figura 3 traz informações sobre o volume de exportação de rochas processadas no Brasil de 2011 a 2015.

Figura 3: Evolução do volume de rochas processadas exportado pelo Brasil de 2011 a 2016



Fonte: Adaptado de ABIROCHAS (2017)

2.3 Comportamento reológico de pastas cimentícias

Pastas de cimento são normalmente o foco da maior parte das pesquisas reológicas, pois exercem grande influência na reologia do concreto fresco e portanto, compreender suas características pode fornecer informações importantes para entendimento da reologia do concreto (CASTRO, 2007; GHIO *et al.*, 1994).

Ainda, de acordo com Banfill (2003) é improvável que as propriedades do concreto no estado endurecido sejam satisfatórias se as propriedades no estado fresco não forem.

Assim, estudos para melhor compreender o comportamento reológico de pastas cimentícias são essenciais para ampliar o conhecimento sobre a correlação da reologia de pastas com a reologia de concretos e argamassas, principalmente na avaliação da influência de adições minerais e aditivos na mistura.

Contudo, antes de iniciar-se estudos sobre parâmetros, ensaios e modelos reológicos, se faz necessária uma análise sobre a hidratação do cimento Portland, pois ocorrem alterações com o tempo e com a temperatura que influenciam diretamente o comportamento da pasta cimentícia.

2.3.1 Hidratação do cimento Portland

O cimento Portland é um material que possui propriedades aglomerantes, mas estas só são evidenciadas quanto ocorre contato com a água. A reação química dos compostos anidros do cimento Portland com a água é denominada de reação de hidratação e resulta em produtos que possuem características de pega e endurecimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014; TAYLOR, 1990).

O cimento Portland é composto por diversas fases anidras (Tabela 2), que reagem simultaneamente com a água, mas não na mesma velocidade de hidratação. Os aluminatos reagem mais rapidamente que os silicatos e as características de enrijecimento e pega são mais influenciadas pela hidratação dos aluminatos (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

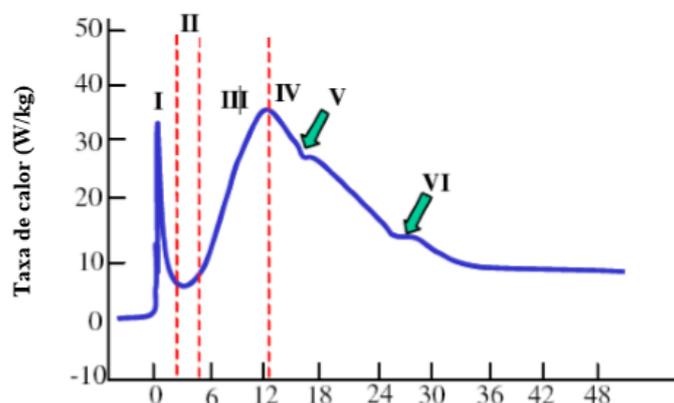
Tabela 2: Compostos anidros do cimento Portland

Composto anidro	Composição	Nomenclatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF

Fonte: Neville 1997

A hidratação do cimento é um processo contínuo e exotérmico, ou seja, há liberação de calor. Pode ser dividido em diferentes estágios, conforme a taxa de liberação de calor (BETIOLI, 2007). Os estágios apresentados na Figura 4 são descritos a seguir conforme Taylor (1990) apud Betioli (2007) e Odler (1998) apud Betioli (2007).

Figura 4: Estágios da hidratação do cimento Portland



Fonte: Bettioli (2007)

Estágio I – Durante os primeiros minutos após o contato do cimento com a água observa-se um pico de liberação de calor em função 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 . Esse estágio também é chamado de período pré-indução, onde ocorre a formação de uma camada de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que reveste a superfície dos grãos de cimento.

Estágio II – Este período é chamado de indução ou dormência e observa-se uma baixa taxa de liberação de calor, pois o gel formado anteriormente forma uma barreira que parece retardar as reações de hidratação. Esse período pode durar de 30 minutos a 3 horas e termina quando o gel depositado sobre os grãos de cimento é destruído ou torna-se mais permeável.

Estágio III – Nesse estágio ocorre uma aceleração das reações de hidratação onde ocorre uma rápida formação de C-S-H e hidróxido de cálcio (C-H) devido a supersaturação iônica da fase aquosa através do mecanismo de dissolução-precipitação.

Estágio IV – Ocorre neste momento uma diminuição da velocidade de hidratação, porém o C-S-H e o C-H continuam a se formar e o mecanismo de reação passa a ser controlado por difusão iônica.

Sendo observadas as características da reação de hidratação para cada um dos estágios analisados acima, é a existência dos estágios I e II que permite que as pastas sejam preparadas e analisadas no estado fresco e são os estágios que têm maior importância nas análises reológicas (BANFILL, 2006; HAN, 2014).

De forma a minimizar a influência da hidratação dos grãos de cimento nas análises reológicas de pastas cimentícias é interessante que os ensaios aconteçam durante o estágio II, ou período de dormência, onde é observada uma baixa taxa de liberação de calor e as reações ocorrem mais lentamente.

2.3.2 Conceitos reológicos

Reologia (originada dos termos *rheos* = fluir e *logos* = estudo) é um ramo da ciência que estuda o comportamento de corpos sólidos, líquidos ou gasosos após a aplicação de tensões ou deformações, relacionando as variáveis tensão ou taxa de cisalhamento aplicada, tempo e taxa de deformação (CARDOSO *et al.*, 2006; SCHRAMM, 2006; BANFILL, 1994).

Segundo Castro (2007, p. 31) a reologia “é o ramo da física que se preocupa com a mecânica de corpos deformáveis, os quais podem estar no estado sólido, líquido ou gasoso.”

Corpos reais não possuem comportamento nem de sólidos ideais nem de fluidos (líquidos ou gases) ideais. Sólidos ideais se deformam elasticamente e fluidos se deformam irreversivelmente, isto é, fluem. Já os corpos reais, na prática, apresentam um comportamento reológico mais complexo (CASTRO, 2007; SCHRAMM, 2006).

Um dos primeiros estudiosos a estabelecer a relação entre a taxa e a tensão de cisalhamento foi Isaac Newton, quando descreveu o comportamento de um líquido ideal da seguinte forma (SCHRAMM, 2006):

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Em que: τ = tensão de cisalhamento, η = viscosidade e $\dot{\gamma}$ = a taxa de cisalhamento.

Os fluidos newtonianos apresentam, como visto na Equação 1, uma relação linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento, a temperatura e pressão

constantes. Ou seja, a viscosidade é constante e única para determinado material e o exemplo mais comum de um fluido newtoniano é a água.

Dessa forma, considerando que a maioria dos fluidos reais não se comporta como ideal, pode-se dizer que os fluidos se classificam como Newtonianos ou não-Newtonianos.

Os fluidos não-newtonianos apresentam viscosidade aparente, uma vez que a viscosidade varia com a taxa de cisalhamento e as duas grandezas devem sempre ser citadas juntas, já que uma é dependente da outra. A viscosidade aparente é aquela que o fluido teria, naquela condição de fluxo, se fosse Newtoniano (MACHADO, 2002). A relação entre tensão e taxa de cisalhamento para fluidos não-Newtonianos é representada pela Equação 2.

$$\tau = \eta_{ap} \cdot \gamma \quad (2)$$

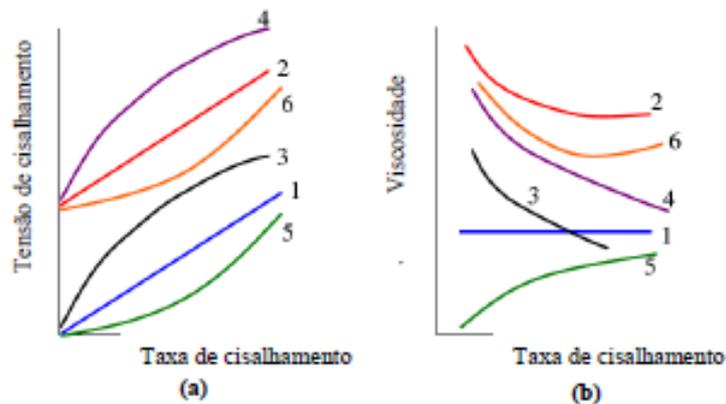
Em que: τ = tensão de cisalhamento, η_{ap} = viscosidade aparente e γ = a taxa de cisalhamento.

A viscosidade pode ser considerada uma das principais propriedades reológicas de um fluido e indica a resistência do fluido ao escoamento sob ação de tensões de cisalhamento externas a uma dada temperatura. Para que haja fluxo a tensão deve ser aplicada continuamente (SCHRAMM, 2006; SATO 2015).

Os materiais podem ser classificados de acordo com seu comportamento reológico. Uma forma comum e bastante utilizada para análise do comportamento de fluidos é a curva de fluxo que mostra a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento (HAN, 2014). A curva de viscosidade x taxa de cisalhamento também é amplamente utilizada para definir a classificação de um fluido baseado no seu comportamento reológico.

Como visto anteriormente os fluidos podem ser classificados inicialmente em Newtonianos e não-Newtonianos. A Figura 5 exemplifica o comportamento dos fluidos através das curvas de fluxo (tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento) e curvas de viscosidade (viscosidade x taxa de cisalhamento).

Figura 5: Curvas de fluxo (a) e curvas de viscosidade (b) para diferentes tipos de fluidos



Fonte: Betioli (2007)

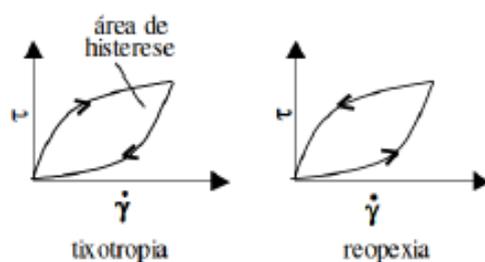
Observa-se através da Figura 5 que os fluidos não-Newtonianos podem ser classificados em pseudoplásticos, dilatantes e pseudoplásticos com limite de escoamento. O comportamento reológico dos fluidos é descrito a seguir:

- Fluidos Newtonianos: Estão representados na Figura 5 pela curva 1 e neste caso existe uma relação constante entre a tensão e a taxa de cisalhamento, que independe do tempo e da deformação. Dessa forma, a viscosidade de apresenta como uma grandeza constante (SCHRAMM, 2006; CASTRO, 2007).
- Fluidos não-Newtonianos: São aqueles caracterizados por uma relação não linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento, ou seja, a viscosidade varia de acordo com a taxa de cisalhamento aplicada e depende do histórico de cisalhamento (SCHRAMM, 2006; CASTRO, 2007). O comportamento de fluidos não-Newtonianos pode ser descrito da seguinte forma:
 - a) Fluidos Pseudoplásticos: Observa-se pela curva 3 da Figura 5 que os fluidos pseudoplásticos apresentam diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento. Isso ocorre pois, com o aumento da taxa de cisalhamento, há uma orientação das partículas na direção do fluxo, facilitando o escoamento do material (HAN, 2014; BETIOLLI, 2007).

- b) Fluidos dilatantes: Para esse tipo de fluido, quando há aumento da taxa de cisalhamento, ocorre aumento proporcional na viscosidade aparente principalmente devido ao aumento de volume do material quando há elevação da taxa de cisalhamento (BETIOLLI, 2007; CASTRO; 207). Estão representados pela curva 5 da Figura 5.
- c) Fluidos Binghamianos ou plásticos: São fluidos que apresentam comportamento de sólidos até que um limite de escoamento seja atingido, e em seguida a relação entre a taxa e tensão de cisalhamento torna-se linear, porém não passa pela origem. A tensão mínima necessária para provocar o escoamento é chamada de tensão de escoamento (BETIOLLI, 2007; CASTRO; 2007; HAN 2014). Os fluidos binghamianos estão representados pela curva 2 na Figura 5.
- d) Fluidos pseudoplásticos com limite de escoamento: Possuem um valor mínimo de tensão de cisalhamento para que tenha início o escoamento do material, assim como os fluidos binghamianos. Porém, a relação entre a taxa e a tensão de cisalhamento não é linear. A curva de fluxo deste tipo de material tem início no ponto de escoamento, como mostra a curva 4 da Figura 5.

Para fluidos que apresentam comportamento pseudoplástico ou dilatante, ou seja, em que a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento depende do tempo (também chamados de fluidos tempo-dependentes) podem apresentar tixotropia ou reopexia, uma vez que o comportamento do material depende da história ou do tempo de cisalhamento, conforme Figura 6 (PANDOLFELLI *et al.*, 2000; CARDOSO *et al.*, 2006).

Figura 6: Comportamento tixotrópico e reopéxico representados através de gráficos



Fonte: Betioli (2007)

A tixotropia é um fenómeno reológico em que com o aumento da taxa de cisalhamento ocorre uma diminuição da viscosidade aparente devido à quebra das estruturas moleculares e a perda da orientação/alinhamento das partículas em direção ao fluxo. Entretanto, para fluidos que apresentam comportamento tixotrópico esse fenómeno é reversível, ou seja, assim que o cisalhamento é interrompido e considerando um tempo de repouso apropriado, a viscosidade do fluido aumenta devido à capacidade do mesmo de se reconstruir (SCHRAMM, 2006; PILEGGI *et al.*, 2001; BETIOLI, 2007; HAN 2014).

A reopexia, no entanto, é um fenómeno reológico contrário a tixotropia. Fluidos que possuem comportamento reopéxico apresentam aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento e após determinado período de repouso voltam a sua condição original de baixa viscosidade. Esses materiais podem permanecer em um ciclo infinito entre o aumento da viscosidade que depende do tempo de cisalhamento e a diminuição da viscosidade dependente do tempo de repouso (SCHRAMM, 2006; HAN 2014; PILEGGI *et al.*, 2001; BETIOLI, 2007).

Estes dois comportamentos reológicos são avaliados através da utilização de ciclos de cisalhamento, ou seja, aceleração e desaceleração da taxa de cisalhamento aplicada ao material (BETIOLLI, 2007). Através da aplicação dos ciclos de cisalhamento podem ser obtidos gráficos semelhantes aos da Figura 6.

Nota-se que o gráfico representativo das duas propriedades é semelhante, diferenciando-se no sentido das curvas de fluxo. Na tixotropia o gráfico gira no sentido horário e, portanto os valores de tensão de cisalhamento para a curva de aceleração é maior que os da curva de desaceleração, já na reopexia o gráfico gira no sentido anti-horário e os valores de tensão de cisalhamento para a curva de aceleração são menores que para a curva de desaceleração (SCHRAMM, 2006).

Em ambos os gráficos é possível notar uma área entre as curvas de aceleração e desaceleração da taxa de cisalhamento, denominada de área de histerese que corresponde ao grau de tixotropia ou reopexia do material.

Para fluidos com comportamento tixotrópico quanto menor a área de histerese, mais homogêneo é o material e maior a sua estabilidade e para fluidos com comportamento reopéxico a área de histerese deve ser a mesma para diversos ciclos aplicados, caso não seja, o material não é realmente reopéxico (SCHRAMM, 2006; BETIOLLI, 2007; CASTRO 2007).

2.3.3 Modelos reológicos

Como visto anteriormente, Newton foi o primeiro pesquisador a descrever uma relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento, introduzindo o conceito de viscosidade. Nesse modelo a viscosidade é uma constante e é inerente ao material avaliado, por isso o modelo é válido para os chamados fluidos Newtonianos.

No entanto, a maioria dos fluidos reais não apresenta o comportamento descrito por Newton, pois possuem viscosidade que varia com a taxa de cisalhamento aplicada. Além disso possuem um limite de escoamento, em que o material abaixo deste limite apresenta-se como um sólido, mas para tensões acima do limite o material escoam. A tensão limite é chamada de tensão de escoamento (SCHRAMM, 2006).

Bingham apresentou pela primeira vez o conceito de tensão de escoamento e viscosidade plástica para descrever o comportamento de fluidos (BANFILL, 1994). A Equação 3 expressa o modelo de Bingham.

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \gamma \quad (3)$$

Em que: τ = tensão de cisalhamento, τ_0 = tensão de escoamento η_p = viscosidade plástica e γ = a taxa de cisalhamento

O modelo de Bingham é o mais conceitualmente aceito para descrever o comportamento de pastas, argamassas e concretos. Esse modelo representa fluidos que possuem comportamento semelhante aos fluidos Newtonianos, porém necessitam de uma tensão mínima de cisalhamento, a tensão de escoamento, para que o fluxo se inicie (BANFILL, 1994; FERRARIS, 1999; HAN, 2014).

Segundo Han (2014), o concreto é um material binghamiano devido a tensão de escoamento causada pela interligação dos agregados. No entanto, De Larrard e Ferraris (1998), observaram que o modelo de Herschel-Bulkley (HB) se adequava melhor para avaliação de concretos no estado fresco. O modelo de Herschel-Bulkley é descrito na Equação 4.

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^n \quad (4)$$

Em que: τ = tensão de cisalhamento, τ_0 = tensão de escoamento, γ = a taxa de cisalhamento, K = índice de consistência e n = índice de comportamento

O índice de comportamento (n) descreve o afastamento do fluido do modelo Newtoniano, se n é próximo de 1 o comportamento tende a ser Newtoniano, se $n < 1$ o fluido é pseudoplástico e se $n > 1$ o fluido apresenta comportamento dilatante (MA *et al.*, 2016; SENFF *et al.*, 2010).

Além dos modelos de Newton, Bingham e Herchel-Bulkley, outros modelos têm sido utilizados para ajustar as curvas de escoamento de materiais cimentícios, como os modelos de Casson (Equação 5) e Lei de Potência (Equação 6).

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (\mu_p \cdot \gamma)^{1/2} \quad (5)$$

$$\tau = K \cdot \gamma^n \quad (6)$$

2.4 Caracterização do comportamento reológico de pastas cimentícias

Existem diferentes técnicas para a avaliação do comportamento reológico de pastas cimentícias, como ensaios de fluxo e varredura de tempo, deformação e frequência, a técnica creep-recovery, *vane test* entre outros (BETIOLI, 2007).

Betioli *et al.*, (2009) avaliaram o comportamento reológico de pastas cimentícias através da combinação de técnicas reológicas diferentes. Foram realizados ensaios de reometria rotacional de fluxo e oscilação e *squeeze-flow*, de forma a simular todas as situações em que materiais como concretos e argamassas possam estar submetidos.

Cada método utilizado fornece uma solicitação com magnitudes de cisalhamento diferentes: alta para ensaio de fluxo e *squeeze-flow* e baixa para ensaio oscilatório, o que resulta em diferentes valores de viscosidade de tensão de

escoamento. Dessa forma, a autora concluiu que para uma melhor caracterização reológica de pastas cimentícias, uma combinação das técnicas utilizadas fornece melhores resultados.

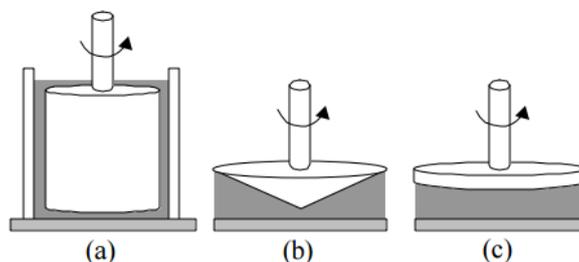
Neste trabalho são abordados os ensaios de fluxo e de varredura de deformação que permitem determinar algumas características do material como tensão de escoamento, viscosidade aparente, perfil reológico, módulo elástico e deformação crítica.

Para realização dos ensaios será utilizado um reômetro rotacional, que é um equipamento capaz de avaliar as propriedades reológicas de fluidos, suspensões, argamassas e concretos. É possível estudar o comportamento da tensão de escoamento e da viscosidade aparente em função de outras variáveis como tempo, temperatura e etc (CASTRO, 2007; CARDOSO 2009).

Os reômetros são equipamentos sensíveis e precisos que possibilitam análises mais objetivas e precisas, uma vez que os ensaios podem ser totalmente automatizados e controlados por softwares de computador (DE LARRARD *et al.*, 1996).

Para realização dos ensaios, os reômetros rotacionais geralmente permitem a escolha da geometria a ser utilizada, entre elas: cone e placa, cilindros coaxiais e placas paralelas (Figura 7). A escolha por determinada geometria se dá de acordo com a área, o produto e os parâmetros a serem analisados (SANTANA, 2005; Hackley e Ferraris, 2001).

Figura 7: Geometrias de cilíndricos coaxiais, cone placa e placas paralelas



Fonte: Hackley e Ferraris (2001)

O uso das três geometrias é bastante difundido em estudos reológicos, Ferraris (2000), Sant *et al.*, (2008), Vikan *et al.*, (2007), Betioli (2007), Sato (2015), Conte (2016), Jang (2009), Kaleta e Grzeszczyk (2015) e Couto (2016) utilizaram em suas pesquisas a geometria de placas paralelas, já Corinaldesi *et al.*, (2010), Janotka *et al.*, (2010), Ghafari *et al.*, (2016) e Ma *et al.*, (2016) escolheram os cilindros coaxiais para realização dos ensaios e Williams (1999) e Yang (1995) utilizaram a geometria de cone-placa.

Com relação a geometria de placas paralelas, alguns autores estudaram o efeito do deslizamento da amostra quando da utilização de placas paralelas lisas. Ferraris (1992) e Ferraris (1999) utilizaram placas serrilhadas para evitar o efeito de derrapagem da amostra. Outra questão importante quando utiliza-se placas paralelas é o espaçamento (*gap*) entre as placas.

Nehdi e Rahman (2004) estudaram o efeito de diferentes *gaps* (0,5 mm, 0,7 mm e 1 mm) na análise das propriedades reológicas de pastas cimentícias e concluíram que há uma tendência de diminuição nos valores de viscosidade com o aumento do *gap* e para a tensão de escoamento há uma tendência de se alcançar maiores valores com 0,7 mm. Entretanto, as diferenças nos valores encontrados para os diferentes *gaps* não foram consideradas significativas.

Para determinação dos parâmetros reológicos utilizando reômetros rotacionais são propostos alguns ensaios, como o ensaio de fluxo, ensaio de varredura de frequência, tempo e deformação, *squeeze flow*, *vane test* entre outros. Nesta pesquisa foram realizados os ensaios de fluxo e de varredura de deformação, que são apresentados a seguir.

2.4.1.1 Ensaio de Fluxo

Denominado também de ensaio estático, este ensaio consiste na aplicação de uma tensão de cisalhamento ou deformação no material de forma a simular seu comportamento durante misturas e aplicações e avaliar o efeito de matérias-primas, aditivos, adições, entre outros. Dessa forma, o ensaio mede a capacidade do material de resistir aos esforços aplicados, isto é, mede a tensão de cisalhamento a uma determinada taxa de cisalhamento ou vice-versa (SATO, 2015; BETIOLI, 2007).

Com a aplicação de diferentes taxas ou tensões de cisalhamento é possível traçar os gráficos de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento (curva de fluxo) e viscosidade x taxa de cisalhamento (curva de viscosidade) e avaliar o comportamento reológico do material (Figura 8). Através dessas curvas podem ser determinadas as propriedades reológicas como viscosidade aparente e tensão de escoamento do material (BETIOLI, 2007; HAN 2014, WILLIAMS *et al.*, 1999).

Outra resposta do ensaio, além das medidas de viscosidade e tensão de escoamento, é a área de histerese no gráfico tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento.

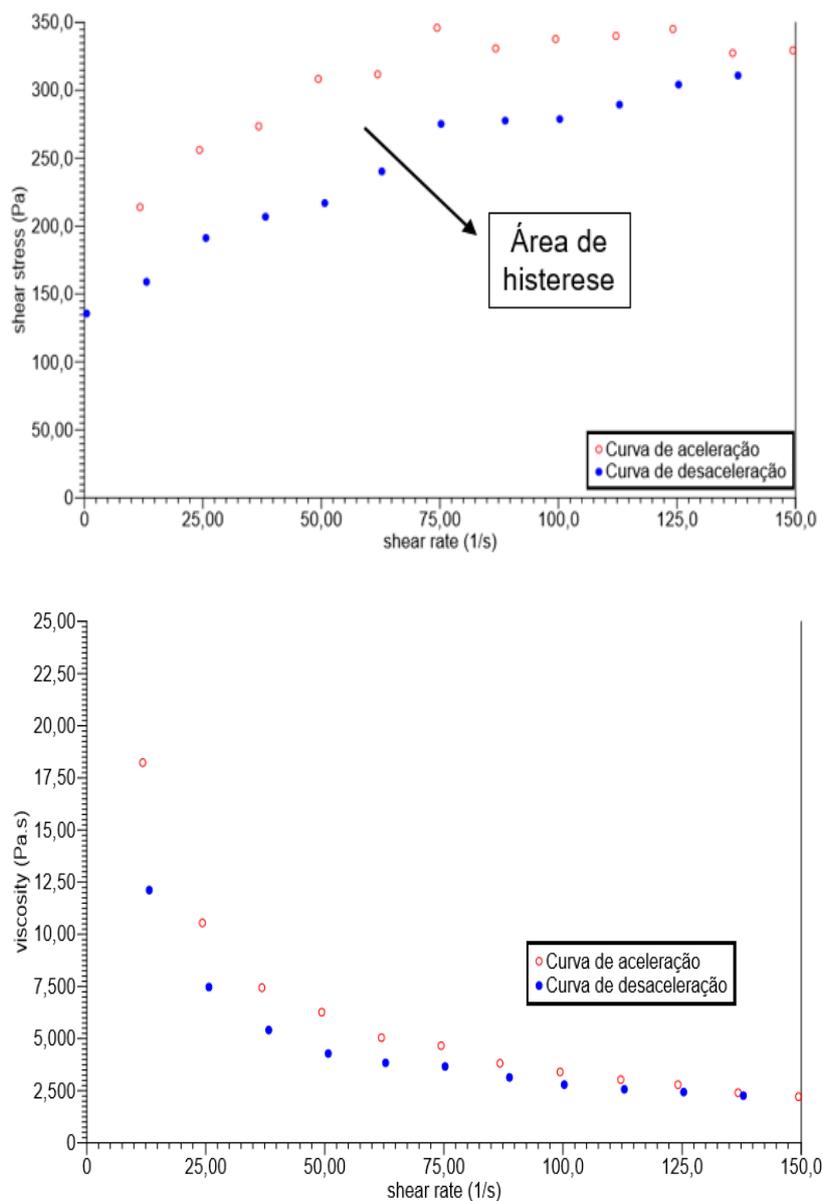
A área de histerese é a área compreendida entre as curvas de aceleração e desaceleração da taxa de cisalhamento (Figura 8) e representa a energia necessária para promover a quebra das estruturas formadas inicialmente na pasta de cimento (ROUSSEL, 2006; CORINALDESI *et al.*, 2010).

A viscosidade plástica pode ser medida para cada ponto da curva de fluxo dividindo-se a tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento. Já a tensão de escoamento não é uma medida direta do ensaio, sendo necessário utilizar modelos reológicos e extrapolação da curva até o eixo da tensão de cisalhamento (BARBOSA, 2010).

Com relação ao intervalo de taxa de cisalhamento que deve ser aplicada, não existe ainda norma brasileira que determine os valores que devem ser utilizados para realização do ensaio de fluxo em pastas cimentícias.

Além disso, não há um consenso entre os valores adotados em diversas pesquisas, pois para cada material ou equipamento utilizado são estipulados valores diferentes. Por exemplo, Sato (2015) e Betioli (2007) variaram a taxa de cisalhamento de 0 s^{-1} a 100 s^{-1} em 2 minutos, Barbosa (2010) variou a taxa de 0 s^{-1} a 150 s^{-1} durante 1 minuto, Couto (2016) utilizou variação de 0 s^{-1} a 400 s^{-1} durante 1 minuto e Corinaldesi *et al.*, (2010) variou a taxa de 0 s^{-1} a 100 s^{-1} durante 3 minutos.

Figura 8: Área de histerese e curvas de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento e viscosidade x taxa de cisalhamento¹



Fonte: Arquivo pessoal

¹ Neste trabalho serão utilizados os termos em inglês *shear stress*, *shear rate*, *viscosity* e *strain* para tensão de escoamento, tensão de cisalhamento, viscosidade e deformação, respectivamente, na representação gráfica dos resultados encontrados na análise reológica devido ao software utilizado para análise estar disponível apenas em inglês.

2.4.2 Ensaio de varredura de deformação

O ensaio consiste na aplicação de uma deformação senoidal, conforme a Equação 7 e como resposta a essa solicitação tem-se a tensão, como mostra a Equação 8.

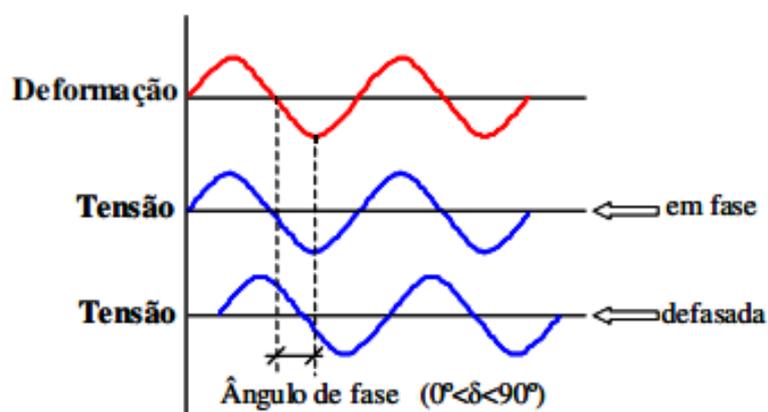
$$\gamma(t) = \gamma_0 x \cos(\omega t) \quad (7)$$

$$\tau = \tau_0 x \cos(\omega t + \delta) \quad (8)$$

Em que ω é a velocidade angular, t é o tempo, γ_0 é a amplitude máxima de deformação, δ é o ângulo de fase e τ_0 é a amplitude de tensão.

Existem dois limites para o comportamento dos materiais quando trata-se do ensaio oscilatório, os limites são: sólido Hookeano ou ideal, que ocorre quando a tensão está em fase com a deformação ($\delta = 0$) e fluido Newtoniano ou ideal, em que a tensão está defasada em relação a deformação ($\delta = 90^\circ$), como mostra a Figura 9. No entanto, a maioria dos materiais não demonstra comportamento nem de sólidos nem de líquidos ideais, mas sim uma combinação dos dois, que é chamada de viscoelasticidade ($0 < \delta < 90^\circ$) (HAN, 2014; BETIOLLI 2007; NACHBAUR *et al.*, 2001).

Figura 9: Gráficos representativos do ensaio oscilatório com aplicação de deformação e tensão obtida como resposta



Fonte: Betioli (2007)

Dessa forma, para materiais viscoelásticos, quando a tensão de cisalhamento é dividida pela deformação obtém-se como resultado um número complexo G^* , conforme Equação 9, que pode ser dividido em duas componentes, real e imaginária, Equações 10 e 11, respectivamente (NACHBAUR *et al.*, 2001).

$$G^* = \tau_0/\gamma_0 \quad (9)$$

$$G' = G^* x \cos\delta \quad (10)$$

$$G'' = G^* x \sin\delta \quad (11)$$

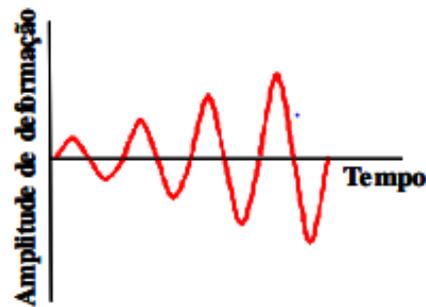
Em que G^* é o módulo complexo, γ_0 é a amplitude máxima de deformação, δ é o ângulo de fase, τ_0 é a amplitude de tensão, G' é o módulo elástico e G'' é o módulo viscoso.

A componente real é representativa da parcela elástica do material e é denominada componente elástica G' que indica a quantidade de energia, proveniente da tensão aplicada, que é temporariamente armazenada durante o ensaio, mas que ainda pode ser recuperada. E a componente imaginária representa a parcela viscosa e é denominada componente viscosa G'' que indica a quantidade de energia utilizada para dar início ao escoamento, ou seja, essa parcela de energia gasta não pode ser recuperada (BETIOLLI, 2007; COSME, 2015; NACHBAUER *et al.*, 2001).

Quando trata-se da análise de suspensões é necessário garantir que as propriedades reológicas sejam medidas na região viscoelástica linear, em que o módulo elástico não depende da deformação aplicada, pois essa região delimita a aplicação de deformação crítica sobre o material garantindo que não ocorrerão alterações na sua estrutura (BETIOLI, 2007; NACHBAUR *et al.*, 1997).

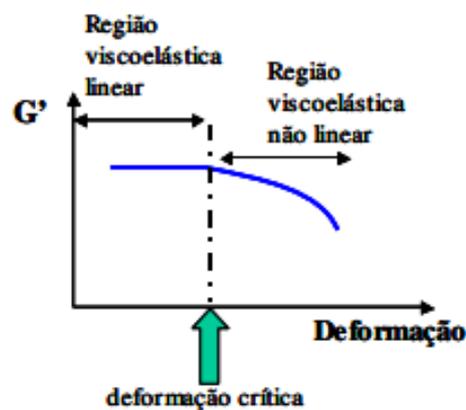
Para definir a deformação crítica é realizado um ensaio de varredura de deformação, em que a amplitude é elevada com frequência constante (Figura 10), então é possível traçar o gráfico deformação *versus* componente elástica (G'), com ambos os eixos em escala logarítmica, como mostra a Figura 11.

Figura 10: Ensaio de varredura de deformação em função do tempo



Fonte: Betioli (2007)

Figura 11: Gráfico componente elástica versus deformação para determinação da deformação crítica na região viscoelástica linear



Fonte: Betioli (2007)

Como é possível observar na Figura 11, até um certo ponto o módulo elástico é independente da deformação, porém quando a deformação atinge um valor crítico (chamado de deformação crítica) o módulo desce com o aumento da deformação, ou seja, a partir deste ponto a aplicação de mais deformação provoca a destruição da estrutura do material (BETIOLLI, 2007; NACHBAUR *et al.*, 1997)

Através do ensaio de varredura de deformação com frequência constante também é possível estimar o valor da tensão de escoamento através do produto da deformação crítica pelo G' naquela deformação (BETIOLLI, 2007), como mostra a Equação 12.

$$\tau_0 = G' x \gamma_{crit} \quad (12)$$

Em que τ_0 é a amplitude de tensão, G' é o módulo elástico e γ_{crit} é a deformação crítica.

Este comportamento foi descrito por Schultz (1991) apud Betioli (2007) quando analisou o modelo proposto por Chen e Zukoski (s.d.), que faz uma analogia a Lei de Hooke (Equação 13), na qual a constante de proporcionalidade é o módulo de elasticidade (E) ou módulo de Young.

$$\sigma = E x \varepsilon \quad (13)$$

Em que σ é a tensão, E é o módulo de elasticidade ou módulo de Young e ε é a deformação específica.

2.4.3 Influência do tipo de misturador e do tempo de mistura

O processo de mistura é um dos fatores mais importantes relacionados a produção de concretos, argamassas e pastas (HAN e FERRON, 2015). A etapa de mistura tem influência significativa nas propriedades tanto no estado endurecido quanto no estado fresco, principalmente frente as propriedades reológicas desses materiais (FRANÇA *et al.*, 2011; YANG e JENNINGS, 1995; HELMUTH, 1980 apud WILLIAMS *et al.*, 1999).

Durante o processo de mistura espera-se que os aglomerados sejam rompidos para que a mistura seja mais homogênea. No entanto, caso a intensidade da mistura não seja suficiente para romper os aglomerados, estes podem permanecer não hidratados por longo período de tempo causando danos a estrutura e comprometendo suas propriedades (YANG e JENNINGS, 1995; WILLIAMS *et al.*, 1999).

Várias pesquisas têm apontado a influência do tempo e da intensidade da mistura nas propriedades reológicas de pastas cimentícias (YANG e JENNINGS, 1995; WILLIAMS *et al.*, 1999; HAN 2015), argamassas (FRANÇA *et al.*, 2011;2012; CARDOSO *et al.*, 2014) e concretos (DILS *et al.*, 2012; VANDANJO *et al.*, 2003; FERRARIS, 2001) e apontam que em geral com o aumento da intensidade da mistura, a viscosidade e a tensão de escoamento decrescem, assim como a área de histerese.

Williams *et al.*, (1999) avaliaram diferentes tempos e velocidades de mistura em pastas cimentícias e, além disso, incluíram uma etapa de pré-cisalhamento da mistura no reômetro antes de iniciar os ensaios reológicos.

Segundo os autores esse etapa atua auxiliando a quebra dos aglomerados que o processo de mistura não foi suficiente para romper. Os autores também observaram que pastas com pré-cisalhamento apresentaram menores valores de área de histerese, ou seja, estavam mais homogêneas.

Apesar dos resultados observados em diferentes pesquisas serem semelhantes, os equipamentos e tempos de mistura adotados variam. Williams *et al.*, (1999) e França *et al.*, (2013) utilizaram um misturador planetário Hobart N50. O primeiro variou a velocidade do misturador em 140 rpm e 285 rpm e tempo de mistura de 5 minutos e 30 segundos, já no segundo a velocidade foi constante de 62 rpm durante 1 minuto de mistura.

Já Betioli (2007) utilizou um misturador IKA RW 20 DZM.n com velocidade constante de 300 rpm e tempo de mistura de 5 minutos. Mukhopadhyay e Jang (2009) utilizaram um liquidificador de alto cisalhamento variando a velocidade em 3000, 6000, 8000, 10000 e 13000 rpm e tempo de mistura de 1 minuto e 40 segundos. Han e Ferron (2015) utilizaram um misturador de alto cisalhamento Chandler 3060 e um misturador planetário Hobart e tempos de mistura de 1 minuto e 45 segundos e 4 minutos e 10 segundos.

Portanto, observa-se que não há um procedimento de mistura padronizado tanto referente ao tempo de mistura, quanto ao tipo de misturador utilizado. Dessa forma, é necessário a realização de testes para verificação de diferentes tempos e velocidades de mistura, além da aplicação de um pré-cisalhamento para obtenção de uma amostra mais homogênea possível para realização dos ensaios reológicos.

2.5 Estudos e aplicações do RBRO em matrizes cimentícias

Diante do exposto, é possível identificar diversos estudos já realizados visando o reaproveitamento do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) na construção.

Um dos primeiros estudos realizados no Brasil utilizando-se resíduos provenientes do processo de beneficiamento de rochas ornamentais foi desenvolvido por Calmon *et al.*, (1997a), no qual os autores utilizaram traços de referência 1:2:8 e 1:1:6 (cimento:cal:areia úmida), em volume, em argamassas de assentamento com proporcionamentos do resíduo do corte do granito em valores de 25%, 50%, 75% e 100% em substituição à massa de cal nos respectivos traços.

Segundo os autores, as argamassas no estado fresco apresentaram redução da retenção de água e uma maior exsudação de água. Nos ensaios realizados no estado endurecido ocorreram melhorias substanciais em todas as propriedades físicas e mecânicas analisadas. De acordo com Calmon *et al.*, (1997a) a substituição da cal por resíduo induz a pensar que o resíduo está trabalhando como um fíler, diminuindo a porosidade das misturas e resultando em um incremento de resistência. Os resultados obtidos em Calmon *et al.*, (1997b), para idades de 63 e 91 dias não apresentaram variações significativas em relação aos resultados encontrados em Calmon *et al.*, (1997a) para idade de 28 dias.

Cruz *et al.*, (2003) estudaram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade das argamassas com diferentes porcentagens do resíduo do corte de rochas substituindo a areia. O traço utilizado como referência foi 1:3 (cimento:areia), em massa.

As porcentagens de substituição de areia por resíduo foram de 5%, 10%, 15% e 20% (em volume), baseando-se nos estudos de Moura *et al.*, (2006). Quanto à resistência à compressão axial das argamassas, em geral, observou-se um aumento dessa propriedade nas idades de 7 e 28 dias, com a inserção do resíduo. Os melhores resultados de resistência à compressão axial foram obtidos em duas amostras com percentuais de substituição de resíduo de 15% e de 20%, respectivamente. Os módulos de elasticidade se elevaram até ao percentual de substituição do resíduo de 15% e para 20% houve diminuição desses valores.

Santos *et al.*, (2013) avaliaram o comportamento reológico de argamassas sob a influência da adição do resíduo de corte de mármore e granito. Os autores produziram argamassas com adição de 5%, 10% e 15% de resíduo em relação

a massa de cimento e avaliaram as propriedades reológicas através do índice de consistência e o *squeeze flow*. Com relação a consistência, concluiu-se que o aumento na adição de resíduo provocou um aumento na consistência e conseqüente diminuição na trabalhabilidade das argamassas e no ensaio *squeeze flow* concluiu-se que em adições até 10% é necessária uma carga menor de espalhamento do que a argamassa referência, ou seja, a adição melhorou a fluidez das argamassas. Para teores mais elevados houve queda na fluidez, explicado pela possível formação de aglomerados e elevação do atrito interno das partículas, devido a absorção de água pelas partículas de resíduo.

Vazzoler (2015) avaliou a influência do RBRO após tratamento térmico a 1200°C como adição em teores de 5% e 10% em pastas cimentícias, em idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias, através da análise mineralógica e microestrutural e caracterizou o resíduo após tratamento térmico mineralógica, química, microestrutural e fisicamente e realizou ensaios para verificar sua pozolanicidade.

A autora concluiu que o resíduo após tratamento térmico se comporta como uma pozolana em matrizes cimentícias e a adição de 5% foi a que apresentou matriz mais densa quando observada sua microestrutura. Além disso, concluiu que a idade é um fator importante na análise do comportamento do resíduo e que este contribui para um densificação da matriz, principalmente na adição de 5% e na idade de 91 dias.

Mármol *et al.*, (2010) estudaram o efeito do RBRO tratado termicamente em argamassas. O resíduo foi tratado termicamente a 900 °C com objetivo de produzir um pigmento avermelhado que pudesse ser utilizado na confecção de argamassas coloridas. Foi escolhido um resíduo com percentual elevado de Fe_2O_3 que, segundo os autores, é o responsável pela coloração avermelhada após o tratamento térmico.

Foram produzidas argamassas de referência (sem resíduo) e argamassas com adição do resíduo após tratamento térmico para verificação da resistência à compressão axial das mesmas. Com relação à produção do pigmento colorido, de fato após o tratamento térmico o resíduo apresentou-se com coloração avermelhada e as argamassas com resíduo apresentaram valores de resistência à compressão semelhantes aos da argamassa referência e

atenderam aos requisitos normativos para este tipo de produto. Além disso, os autores ressaltaram uma possível atividade pozolânica do resíduo. No entanto, esta hipótese não foi confirmada.

Corinaldesi *et al.*, (2010), utilizaram resíduo de mármore como substituição ao cimento e a areia em argamassas com teor de 10% em relação à massa de cimento. Também foi utilizado aditivo super plastificante em todas as misturas a fim de avaliar a trabalhabilidade.

Os autores também realizaram uma caracterização física e química do material em que constataram a baixa granulometria e elevada finura, que são as principais características quando se utiliza o resíduo como fíler. Com relação à resistência à compressão das argamassas, os ensaios mostraram uma queda de 10% nos valores quando o resíduo foi utilizado em substituição ao agregado miúdo e uma queda de 20% quando usado em substituição ao cimento. Com relação à trabalhabilidade, observou-se que houve uma melhora nessa propriedade com a adição do resíduo, principalmente com a diminuição na quantidade requerida de aditivo.

Colangelo *et al.*, (2010) também avaliaram argamassas com substituição parcial do cimento e areia por resíduo de mármore, porém em teores de 10%, 20% e 30% em relação ao agregado e 10%, 15% e 20% em relação ao cimento. Os autores avaliaram a resistência à compressão das misturas e concluíram que, para utilização do resíduo em substituição ao agregado, há uma melhora nessa propriedade em todos os teores de resíduo utilizados. Já para substituição do cimento os teores acima de 10% mostraram um decréscimo nos valores de resistência à compressão.

Vardhan *et al.*, (2015) estudaram o efeito da substituição parcial do cimento por resíduo de mármore em argamassas cimentícias em teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Foram avaliadas as propriedades de trabalhabilidade, resistência à compressão e a microestrutura das misturas. Os autores concluíram que é possível utilizar o resíduo de mármore em substituição ao cimento em até 10% sem prejuízo técnico e, ainda com melhora da trabalhabilidade da mistura. Para teores maiores que 10% há decréscimo na resistência à compressão, possivelmente explicada pela elevação na porosidade das argamassas com

substituição do cimento por resíduo de mármore, observada na avaliação da microestrutura.

Ramos *et al.*, (2013), analisaram o comportamento de argamassas com substituição do cimento por resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em teores de 5% e 10%. Os autores observaram que as argamassas contendo resíduo com elevada finura apresentaram menores valores de resistência à compressão para os dois teores analisados, mas a diferença não foi considerada significativa e a utilização do RBRO não alterou a trabalhabilidade das argamassas. Além disso, foram realizados testes para verificação da pozolanicidade do material, devido à sua composição química. Os resultados não comprovaram a atividade pozolânica do material, apesar da composição química atender aos requisitos mínimos normativos.

Al-akhras *et al.*, (2010) avaliaram o comportamento de argamassas com utilização de resíduo do corte de rochas ornamentais após tratamento térmico a 700°C. O resíduo foi usado com substituição parcial do cimento e da areia em teores de 0%, 5%, 10% e 15% e as propriedades avaliadas foram trabalhabilidade, resistência à compressão e a flexão e a microestrutura das misturas.

Os resultados mostram potencial no uso do resíduo em argamassas, uma vez que os valores de resistência à compressão e flexão mostraram crescimento com o aumento no teor de resíduo até 15% e para o teor de 10% de resíduo as argamassas apresentaram menor porosidade quando comparada com argamassa de controle. Com relação à trabalhabilidade, as argamassas com resíduo apresentaram um decréscimo nessa propriedade, justificado possivelmente devido a elevada área superficial específica do resíduo. Na análise microestrutural, as argamassas com resíduo se mostraram mais densas e homogêneas do que as argamassas sem resíduo.

Uliana (2014) estudou a aplicação de tratamento térmico ao RBRO (com e sem granalha) objetivando a produção de material pozolânico. O material foi caracterizado e utilizado como substituição ao material cimentício em argamassas em teores de 5%, 10%, 15% e 20% em volume de forma a avaliar seu comportamento mecânico e a atividade pozolânica. Como resultado

concluiu-se que em relação ao comportamento mecânico (resistência à compressão axial) os valores encontrados para as argamassas com substituição ficaram próximos ao da argamassa de referência e que após o tratamento térmico aplicado ao RBRO, o mesmo apresentou características de pozolanicidade.

Em relação à utilização do RBRO em matrizes cimentícias, no que tange à avaliação de parâmetros reológicos, ainda são poucos os estudos voltados para apresentação do comportamento de pastas cimentícias com incorporação desse tipo de resíduo.

Sato (2015) estudou a adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em teores de 0%, 5%, 10% e 15% em pastas cimentícias com diferentes relações água/cimento (0,45; 0,55; 0,65) através da determinação de parâmetros reológicos obtidos a partir de ensaio de fluxo e ensaio oscilatório realizados em reômetro rotacional.

A autora concluiu, através do ensaio de fluxo, que as amostras se comportam como um fluido não newtoniano, pseudoplástico e tixotrópico. Também observou que a amostra com 15% de adição foi a que apresentou maiores valores de tensão de cisalhamento e viscosidade, provavelmente devido à elevada finura do resíduo que preenche os poros e dificulta o escoamento inicial. Porém, com o aumento da relação a/c houve queda significativa da tensão de escoamento e com a/c igual a 0,65 a tensão de escoamento se manteve praticamente constante.

No ensaio oscilatório foi observado que independente da relação a/c as amostras com 0% e 5% de adição de RBRO apresentaram valores de deformação crítica bem próximos e maior capacidade de suportar deformações. Para os teores de 10% e 15% com o aumento da relação a/c houve queda na deformação crítica o que indica que a pasta é menos resistente à deformações.

Corinaldesi *et al.*, (2010) também avaliaram parâmetros reológicos de pastas cimentícias produzidas com teores de adição de RBRO de 10% e 20%, relação água/cimento de 0,4 e 0,5 e aditivo superplastificante. Os autores utilizaram um reômetro rotacional com base em cilindros rotativos coaxiais com uma taxa de

cisalhamento crescente de 1 a 100 s^{-1} . O ensaio foi realizado com uma aceleração da taxa de cisalhamento até 100 s^{-1} em 3 minutos, mantida constante por 1 minuto e depois desacelerada por mais 3 minutos. A curva de desaceleração foi utilizada para calcular a viscosidade plástica e o intercepto da curva com a taxa de cisalhamento igual a zero foi usada para calcular a tensão de escoamento.

Os autores concluíram que amostras contendo RBRO, com relação a/c de 0,4 e superplastificante apresentaram os maiores valores para tensão de escoamento e valores altos também foram observados para as amostras preparadas com a/c igual a 0,5 contendo apenas RBRO, já amostras com a/c 0,5 e superplastificantes obtiveram os menores valores para tensão de escoamento. Para análise da viscosidade plástica foi observado o mesmo comportamento da tensão de escoamento.

Além disso, na presença de superplastificante a adição de RBRO melhorou a resistência à segregação para relação a/c menor que 0,5. Outro parâmetro avaliado foi a tixotropia, medida como a área entre as curvas de aceleração e desaceleração, esse valor pode dar uma estimativa da energia necessária para mover argamassas e concretos. Concluiu-se que para as amostras avaliadas, principalmente com o aumento de tempo, a diferença nos valores é muito pequena e são geralmente baixos. Como consequência pode ser prevista uma excelente capacidade de fluidez para as amostras contendo RBRO. Esse bom comportamento reológico pode ser explicado pela elevada finura que o RBRO apresenta que é maior até que a do cimento e de outras adições minerais.

Capítulo 3

Programa experimental, materiais e métodos

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

De forma a atender aos objetivos desta pesquisa, neste capítulo são apresentados os ensaios experimentais, os materiais e os métodos utilizados para desenvolvimento do trabalho.

3.1 Planejamento dos experimentos

Foram consideradas, para este trabalho, variáveis dependentes, variáveis independentes e variáveis de controle.

3.1.1 Variáveis dependentes

- Tensão de cisalhamento;
- Tensão de escoamento;
- Viscosidade;
- Componente elástica do módulo complexo;
- Resistência à compressão axial;
- Módulo de elasticidade dinâmico;
- Índice de consistência das argamassas no estado fresco;
- Massa específica das argamassas no estado fresco.

3.1.2 Variáveis independentes

- Relação água/cimento (0,45; 0,55; 0,65);
- Percentual de adição do RBROTT em relação à massa de cimento (0%; 10%; 15% e 20%);
- Tempo de hidratação do cimento (20 minutos);
- Idade dos ensaios (28, 63 e 91 dias);
- Tipo de resíduo (após tratamento térmico);
- Taxa de cisalhamento;
- Amplitude de deformação (10^{-5} a 10^{-1})

3.1.3 Variáveis de controle

- Tipo do cimento (CP V ARI);
- Características do agregado miúdo constantes;
- Procedimento de moagem do resíduo e granulometria constantes;
- Procedimento de mistura das argamassas e pastas cimentícias;
- Tempo de mistura das argamassas e pastas cimentícias;

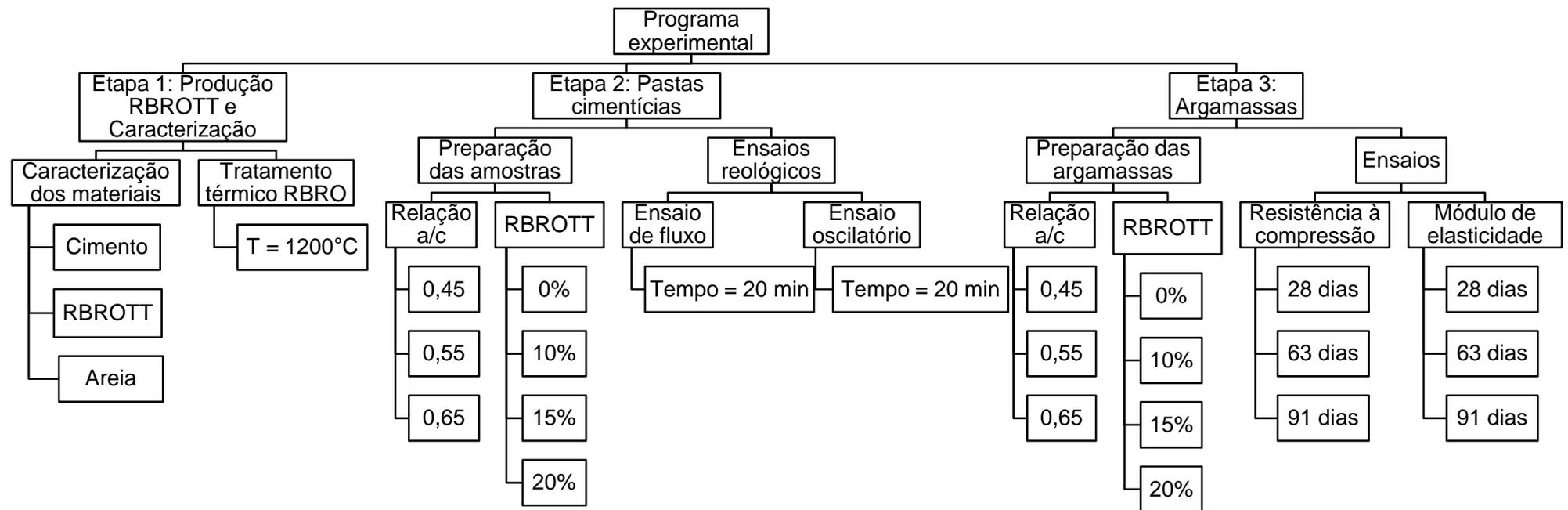
- Temperatura de ensaio;
- Procedimento de cura das argamassas;
- Temperatura de tratamento térmico do resíduo (1200°C).

3.2 Programa experimental

A delimitação do programa experimental tem como objetivo definir quais ensaios serão realizados em laboratório e também quais materiais serão utilizados na pesquisa. Através da elaboração do programa experimental é possível atender aos objetivos delineados de forma otimizada, prática e funcional.

Esta pesquisa é composta por três etapas, que respondem a diferentes aspectos da pesquisa e que visam avaliar diferentes parâmetros da utilização de RBRO após tratamento térmico em matrizes cimentícias. Um esquema geral da divisão das etapas é apresentado na Figura 12.

Figura 12: Fluxograma geral do programa experimental



Fonte: Acervo pessoal

A primeira etapa da pesquisa consiste na caracterização dos materiais utilizados e aplicação do tratamento térmico ao resíduo a fim de obter material com atividade pozolânica. A segunda etapa é destinada a preparação das pastas cimentícias e análise das propriedades reológicas das amostras com e sem resíduo. Já a terceira etapa destina-se à preparação das argamassas com e sem resíduo, moldagem dos corpos de prova e avaliação das propriedades de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico.

Foram estabelecidas três relações água/cimento (a/c) de forma a avaliar o comportamento do RBROTT em argamassas e pastas cimentícias com diferentes percentuais de água na mistura.

Além disso, para análise das argamassas no estado endurecido, foram estabelecidas três idades (28, 63 e 91 dias) para realização dos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico para averiguar se há influência do tempo no desempenho do RBROTT, na tentativa de avaliar possível atividade pozolânica.

Em vista de bons resultados encontrados em pesquisas anteriores (MITTRI, 2016; ULIANA, 2014; SOARES, 2014; SATO, 2015; MÁRMOL *et al.*, 2011; CORINALDESI *et al.*, 2010; COLANGELO *et al.*, 2010) que utilizaram o RBRO como adição ou substituição ao cimento em concretos e argamassas, optou-se por utilizar três porcentagens distintas de adição do RBROTT em relação a massa de cimento, que são 10%, 15% e 20%, além de serem produzidas argamassas e pastas cimentícias sem adição de RBROTT, sendo chamadas neste de trabalho de referência e consideradas com 0% de adição.

A Tabela 3 apresenta todos os traços analisados que contemplam as diversas combinações entre relação a/c , idade e porcentagem de adição do RBROTT.

Para os traços com 0% de adição utilizou-se a nomenclatura TR (traço referência) seguido da relação a/c utilizada, representada pelos números 45, 55 ou 65. Já para os traços com adição, a relação a/c é referenciada primeiro, seguida pela porcentagem de RBROTT utilizada, representada pelos números 10, 15 e 20. O total de combinações resultou em 12 traços que foram analisados nesta pesquisa.

Tabela 3: Traços utilizados na pesquisa

Traço	Relação a/c	Teor de adição (%)
TR45	0,45	0
TR55	0,55	
TR65	0,65	
T45,10	0,45	10
T55,10	0,55	
T65,10	0,65	
T45,15	0,45	15
T55,15	0,55	
T65,15	0,65	
T45,20	0,45	20
T55,20	0,55	
T65,20	0,65	
Total de traços		12

Fonte: Acervo pessoal

3.2.1 Pastas cimentícias

Esta etapa da pesquisa visa avaliar a influência da adição de RBROTT no comportamento reológico e nas propriedades de viscosidade e tensão de escoamento de pastas cimentícias.

Para obtenção desses resultados foram realizados dois tipos de ensaios reológicos, o ensaio de fluxo (*flow*) e o ensaio oscilatório de varredura de deformação (*strain sweep*). Ambos ensaios foram realizados em regime permanente, que significa que as propriedades em dada seção do escoamento não se alteram com o decorrer do tempo.

No entanto, como o cimento é um material que está em constante hidratação, foi escolhido um período em que observa-se uma baixa taxa de liberação de calor, denominado de período de indução, com duração aproximada de 30 minutos a 3 horas (BETIOLI, 2007).

Pode-se constatar esse período de indução após os primeiros minutos de hidratação do cimento e por este motivo o tempo de hidratação escolhido para realização dos ensaios será de 20 minutos contados a partir do contato do cimento com a água.

Portanto, para esta etapa do programa experimental foram produzidas pastas cimentícias sem adição de RBROTT (0%) e com 10%, 15% e 20% de adição para as três relações a/c estabelecidas.

Para cada combinação foram feitas três amostras, de forma a conferir a repetibilidade do ensaio, sendo o valor médio utilizado para análise. Assim, foram feitas no total 36 amostras para cada ensaio realizado, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4: Quantidade de amostras para caracterização reológica das pastas cimentícias

Traço	Relação a/c	Teor de adição (%)	Nº de amostras/ensaio
TR45	0,45	0	3
TR55	0,55		3
TR65	0,65		3
T45,10	0,45	10	3
T55,10	0,55		3
T65,10	0,65		3
T45,15	0,45	15	3
T55,15	0,55		3
T65,15	0,65		3
T45,20	0,45	20	3
T55,20	0,55		3
T65,20	0,65		3
Total			36

Fonte: Acervo pessoal

Para realização dos ensaios e determinação das características reológicas das pastas foi utilizado um reômetro rotacional modelo AR 2000ex (Figura 13) e suas características são descritas na Tabela 5. O equipamento possui um programa computacional próprio onde são gerados os dados e gráficos que são apresentados em um computador acoplado.

Figura 13: Reômetro rotacional AR 2000ex e computador acoplado



Fonte: Acervo pessoal

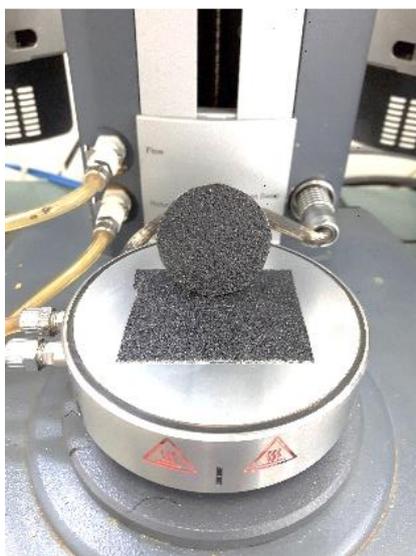
Tabela 5: Características do reômetro rotacional AR 2000ex

Torque	0,03 μNm - 200mNm
Frequência	7,5 E-7 - 628 rad/s
Velocidade angular	0 - 300 rad/s
Força normal	0,005 - 50 N

Fonte: TA Instruments (2011)

Dentre as diversas geometrias disponíveis para realização dos ensaios reológicos foi escolhida para esta pesquisa a de placas paralelas, que possui diâmetro de 40 mm (Figura 14).

Figura 14: Detalhe do adesivo texturizado na geometria de placas paralelas e da placa peltier



Fonte: Acervo pessoal

De forma a evitar a evaporação de água e manter a temperatura da amostra em 25°C durante o ensaio, foi utilizado um dispositivo protetor (*peltier*) próprio do reômetro para a geometria escolhida. Na figura 14 estão representadas a geometria utilizada e o dispositivo *peltier*.

Além disso, de forma a evitar o deslizamento da amostra entre as placas paralelas durante a execução do ensaio, foi fixado um adesivo texturizado na superfície de cada placa, como mostra a Figura 14.

Outro fator importante a ser considerado em ensaios reológicos que utilizam a geometria de placas paralelas é o espaçamento (*gap*) entre as placas. A placa inferior é fixa e a placa superior se movimenta de forma a aumentar ou diminuir o espaçamento entre as placas. Dessa forma, o *gap* é o espaço em que a amostra é confinada para realização dos ensaios.

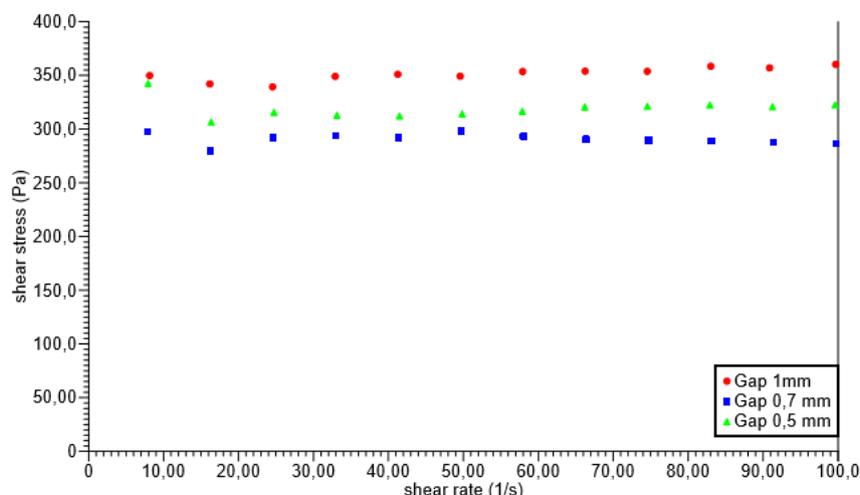
Com base na revisão bibliográfica foram estabelecidos para esta pesquisa inicialmente três valores de *gaps* distintos: 0,5 mm, 0,7 mm e 1 mm. Foi realizado um teste com o mesmo traço para verificar a influência do *gap* no comportamento da amostra.

O teste consistia em aumentar a taxa de cisalhamento de 0 s⁻¹ a 100 s⁻¹ em 2 minutos e verificar o comportamento da tensão de cisalhamento obtida com os três *gaps*, como mostra a Figura 15.

É possível observar comportamento e valores semelhantes para as curvas de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento para os diferentes valores de *gap*.

Assim, com base nos resultados encontrados e na revisão bibliográfica optou-se por utilizar nesta pesquisa o *gap* com valor de 1 mm pra realização dos ensaios reológicos, como também foi utilizado por Sato (2015), Betiulli (2007), Couto (2016), Barbosa (2010), Sant *et al.*, (2008), Vikan *et al.*, (2007) e Conte (2016).

Figura 15: Resultados do teste realizado com gap de 1 mm, 0,7 mm e 0,5 mm



Fonte: Acervo pessoal

3.2.2 Argamassas

De forma a verificar o potencial pozolânico do RBROTT nas propriedades mecânicas de matrizes cimentícias, o resíduo foi utilizado como adição em relação ao cimento em argamassas, nas mesmas porcentagens utilizadas para análise das propriedades reológicas das pastas cimentícias, 0%, 10%, 15% e 20%.

Foi estipulado o uso de argamassas simples contendo apenas cimento, areia e água, pois o intuito desta pesquisa não é verificar o comportamento de um tipo ou traço específico de argamassa, mas sim analisar o comportamento de matrizes cimentícias na presença do RBROTT em sua composição.

Dessa forma, foi estabelecido o traço padrão 1:3 (cimento:areia), também utilizado para verificação da resistência à compressão de cimentos, como base para elaboração dos demais traços utilizados nesta pesquisa.

A partir do traço padrão foram produzidos todos os 12 traços (Tabela 3) utilizados nesta pesquisa, variando-se a relação a/c e a porcentagem de adição do RBROTT em relação a massa de cimento.

A análise das argamassas foi realizada tanto no estado fresco, através da massa específica e do índice de consistência, quanto no estado endurecido avaliando-se a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade dinâmico.

Logo após a produção das argamassas foram realizados os ensaios para verificação no estado fresco e com a mesma argamassa foram moldados os corpos de prova para verificação das propriedades no estado endurecido.

A análise da resistência à compressão axial foi feita em três diferentes idades, 28, 63 e 91 dias, pois como o resíduo após tratamento térmico apresentou características de um material pozolânico nos estudos de Uliana (2014) e Mittri (2016), espera-se que sua maior contribuição se dê em idades mais avançadas.

Para cada idade foram moldados seis corpos de prova para cada relação a/c e cada porcentagem de adição. De modo que, foram produzidos no total 216 corpos de prova, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6: Quantidade de corpos de prova para realização da etapa 2 da pesquisa

Teor de adição (%)	Ensaio	Idade (dias)								
		28			63			91		
		a/c								
		0,45	0,55	0,65	0,45	0,55	0,65	0,45	0,55	0,65
0	Resistência à Compressão	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Módulo de Elasticidade Dinâmico	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	Resistência à Compressão	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Módulo de Elasticidade Dinâmico	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	Resistência à Compressão	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Módulo de Elasticidade Dinâmico	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	Resistência à Compressão	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Módulo de Elasticidade Dinâmico	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total de corpos de prova por idade		72			72			72		
Total de corpos de prova		216								

Fonte: Acervo pessoal

Também foi realizado o ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico através do método de velocidade de propagação de onda ultrassônica. O módulo de elasticidade é uma propriedade que está relacionada à rigidez e a capacidade de resistir deformações elásticas que o material apresenta (CALLISTER, 2000).

É uma propriedade importante em argamassas e concretos, pois demonstra o comportamento do material sob carregamento e a sua capacidade de deformação (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Por ser um ensaio não-destrutivo os mesmos corpos de prova utilizados para este ensaio podem ser utilizados posteriormente para verificação da resistência à compressão axial e por isso não será necessário moldar mais corpos de prova além dos descritos anteriormente.

3.3 Materiais

3.3.1 Resíduo do corte de rochas ornamentais

O resíduo do corte de rochas ornamentais utilizado nesta pesquisa é proveniente de uma serraria localizada no município de Serra – ES e pertence ao mesmo lote do RBRO utilizado por Uliana (2014) e Mittri (2016), portanto o resíduo já encontrava-se disponível para uso no LEMAC.

Dentre os dois tipos de RBRO, com e sem granalha, optou-se por utilizar apenas o RBRO sem granalha, uma vez que em seu trabalho Uliana (2014) testou diferentes tipos de tratamento térmico nos dois tipos de RBRO e encontrou melhores resultados de pozolanicidade para o resíduo sem a granalha em sua composição. A caracterização do RBRO sem granalha antes do tratamento térmico foi realizada por Uliana (2014) e os resultados encontram-se na Tabela 7.

Para uso nesta pesquisa o RBRO foi tratado termicamente afim de transformá-lo em um material com características pozolânicas. Em seguida ao tratamento térmico o RBROTT foi moído em moinho de bolas para alcançar a granulometria adequada. Dessa forma, após o tratamento térmico e moagem o resíduo foi caracterizado novamente afim de verificar se há índices de atividade pozolânica.

Tabela 7: Caracterização do RBRO sem tratamento térmico

Propriedades		RBRO
Massa específica (g/cm ³)		2,53
Massa unitária (g/cm ³)		766,28
Finura	Área específica - Blaine m ² /kg	6179,3
	Material retido na peneira 200 (%)	3,08
	Material retido na peneira 325 (%)	7
Índice de atividade pozolânica	Com a cal (MPa)	3,17
	Com o cimento (%)	63,9
Perda ao fogo - PF (%)		3,5
Composição química	SiO ₂ (%)	66,8
	Al ₂ O ₃ (%)	13,5
	Fe ₂ O ₃ (%)	3,79
	CaO (%)	3,44
	MgO (%)	0,93
	K ₂ O (%)	3,83
	Na ₂ O (%)	3,5
	C (%)	1,11
	TiO ₂ (%)	0,16
	SO ₃ (%)	0,06
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)		85,08

Fonte: Adaptado de Uliana (2014)

3.3.2 Cimento

Para escolha do tipo de cimento que seria utilizado na pesquisa foi necessário considerar sua composição, de forma a escolher um material que causasse a menor interferência possível nos resultados.

Assim, o cimento escolhido para produção da pastas e argamassas foi o CP V ARI, ou cimento Portland de alta resistência inicial, por ser um cimento que possui baixa porcentagem de adições em sua composição e, portanto possui baixo potencial de reação com o RBROTT, permitindo uma melhor análise dos efeitos do resíduo nas propriedades avaliadas.

As caracterizações física e química do cimento foram concedidas pela empresa fabricante e os resultados encontram-se na Tabela 8. Apenas o ensaio para verificação da massa específica foi realizado no LEMAC seguindo as recomendações da NBR NM 23 (ABNT, 2001) – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica

Tabela 8: Caracterização do CP V ARI

Propriedades		Resultados	Método de ensaio	Limites ¹
Massa específica (g/cm ³)		3,0	NBR NM 23	N.E. ²
Finura	Material retido na #400 (%)	2,2	IT Holcim ³	N.E.
	Área específica Blaine (cm ² /g)	4751	NBR NM 76	≥ 3000
Tempos de pega	Início de pega (min)	135	NBR NM 65	≥ 60
	Final de pega (min)	190	NBR NM 65	≤ 600
Resistência à compressão	1 dia (MPa)	28,4	NBR 7215	≥ 14
	3 dias (MPa)	41,2	NBR 7216	≥ 24
	7 dias (MPa)	46,4	NBR 7217	≥ 34
Perda ao fogo - PF (%)		3,39	NBR NM 18	≤ 4,5
Composição química	SiO ₂ (%)	19,42	NBR 14656	N.E.
	CaO (%)	63,69	NBR 14656	N.E.
	MgO (%)	0,86	NBR 14656	N.E.
	Al ₂ O ₃ (%)	4,87	NBR 14656	N.E.
	Fe ₂ O ₃ (%)	2,93	NBR 14656	N.E.
	K ₂ O (%)	0,8	NBR 14656	N.E.
	SO ₃ (%)	3,02	NBR 14656	≤ 4,5
	C3A teórico (%)	7,74	Equação Bogue	N.E.
	Resíduo Insolúvel - RI (%)	0,92	NBR NM 15	≤ 1

Notas: (1) Limites estabelecidos com base na NBR 5733 (ABNT, 1991)

(2) N.E. - Não especificado

(3) Instrução de Trabalho da empresa Holcim

Fonte: Acervo pessoal e fabricante do cimento

3.3.3 Água

A água utilizada será fornecida de forma natural pela concessionária local (CESAN).

3.3.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para confecção das argamassas foi areia natural de rio, extraída de jazida. Os ensaios para caracterização da areia foram realizados no LEMAC e os resultados encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9: Caracterização agregado miúdo

Propriedades	Métodos de ensaio	Resultados
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,62
Massa unitária (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	1,67
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,84
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,36

Fonte: Acervo pessoal

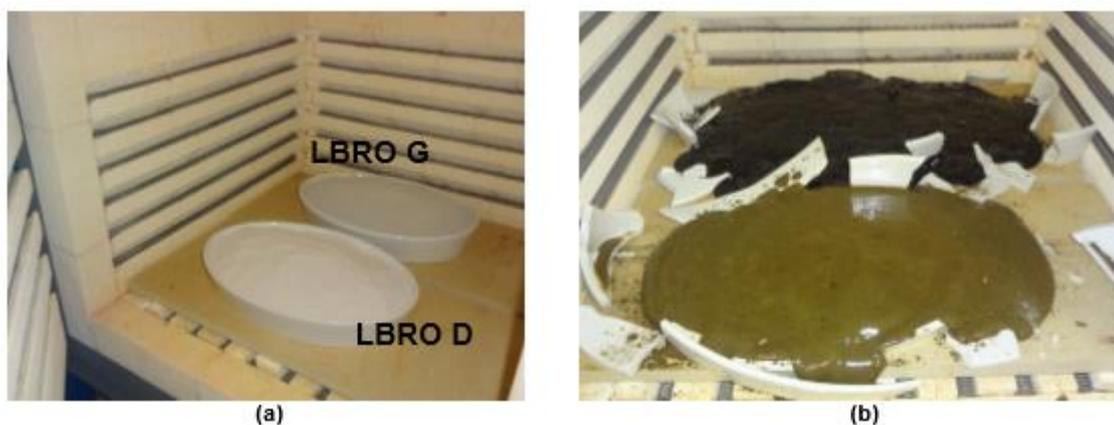
3.4 Métodos

3.4.1 Produção do RBROTT

Para utilização nesta pesquisa o RBRO foi tratado termicamente afim de se produzir material com atividade pozolânica, sendo o resíduo então denominado RBROTT. O processo ocorreu no LEMAC e foi adaptado dos métodos utilizados por Uliana (2014) e Mittri (2016).

Uliana (2014) testou diferentes tipos de tratamento térmico variando o tipo de forno, a temperatura e o recipiente no qual o RBRO era acondicionado e concluiu que o melhor tratamento térmico consistia em utilizar um forno do tipo Mufla e elevar a temperatura gradativamente até 1200°C, mantendo este valor por 2 horas e então promover o resfriamento do forno lentamente conforme sua própria inércia até chegar a 100°C. A Figura 16 mostra o RBRO com e sem granalha antes do tratamento térmico acondicionado em recipiente cerâmico e o RBROTT após tratamento térmico.

Figura 16: RBRO antes e após tratamento térmico



Fonte: Uliana (2014)

Após o tratamento térmico o RBROTT foi moído em moinho de argolas (Figura 17) em frações de 50 g por 40 segundos cada fração e então eram peneirados na peneira 75 μ m. O material que ficava retido na peneira passava novamente pelo processo de moagem e peneiramento.

Figura 17: Moinho de argolas



Fonte: (Uliana, 2014)

Já Mittri (2016) baseou seu método no processo utilizado por Uliana (2014), porém ao invés de utilizar recipiente de porcelana refratária optou por usar um recipiente de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que é capaz de suportar a temperatura de 1200°C , como mostra a Figura 18.

Após o tratamento térmico, Mittri (2016) submeteu o resíduo primeiramente a um triturador de mandíbula para quebrar o bloco vítreo originado da fusão do RBROTT em pedaços menores. Em seguida o resíduo foi moído em um moinho de argolas por 2 minutos e 40 segundos em frações de 50 g.

Figura 18: Recipiente de gesso antes e após tratamento térmico



Fonte: Mittri (2016)

Dessa forma, baseado nos resultados obtidos nas pesquisas apresentadas anteriormente, o RBRO utilizado para esta pesquisa foi tratado termicamente em um forno do tipo Mufla (Figura 19) elevando a sua temperatura gradativamente até 1200 °C e mantendo-a por 2 horas e então o forno foi resfriado lentamente através da sua própria inércia até aproximadamente 100 °C para que o resíduo pudesse ser retirado do forno.

Figura 19: Forno do tipo Mufla e RBRO preparado para dar início ao tratamento térmico



Fonte: Acervo pessoal

O recipiente utilizado para queima do RBRO foi produzido com gesso, como em Mittri (2016). Na Figura 20 está representado o preparo do recipiente de gesso, em que primeiramente foi preparado um molde de madeira (envolvido em um plástico azul), responsável por formar a abertura do recipiente. Este molde foi inserido dentro de uma forma para moldagem do recipiente.

A forma do recipiente foi então preenchida com uma mistura de gesso e água em uma proporção de 1:1 e esperou-se o tempo necessário para endurecimento do gesso. Após esse tempo o recipiente de gesso foi retirado da forma e então o molde interior (responsável pela abertura) foi extraído, dessa forma o recipiente estava pronto para ser utilizado e comportava aproximadamente 5 kg de resíduo em pó.

Figura 20: Procedimento de preparo do recipiente de gesso



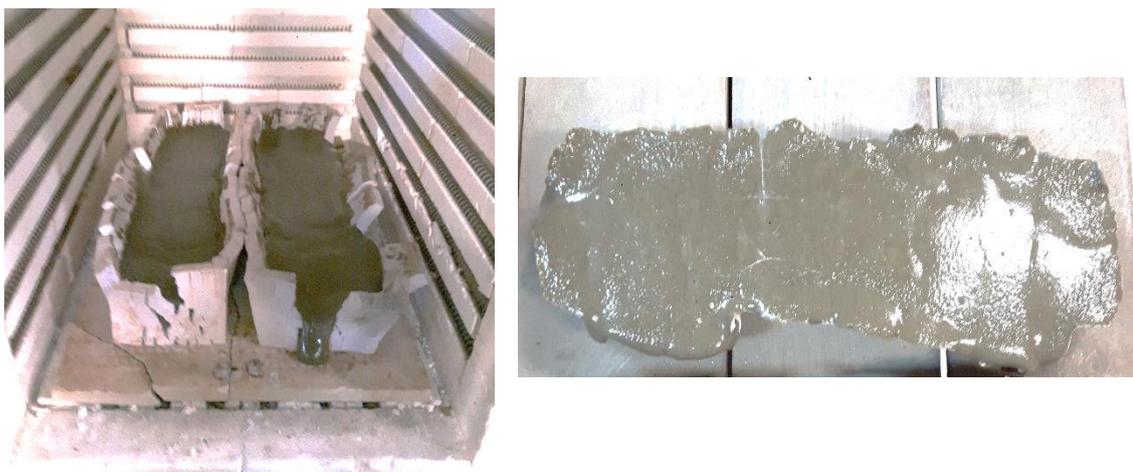
Fonte: Acervo pessoal

Após a queima o resíduo apresentava-se como um bloco vítreo e, como visto em Mittri (2016), o recipiente de gesso foi capaz de resistir a temperatura de 1200°C sem fundir, apenas trincando nas laterais possivelmente devido a expansão do RBRO durante a o tratamento térmico.

O gesso aderido a superfície do RBROTT conseguiu ser removido através de jatos de pressão de água e espátulas. A Figura 21 mostra o resíduo logo após tratamento térmico ainda dentro da mufla e o resíduo após limpeza.

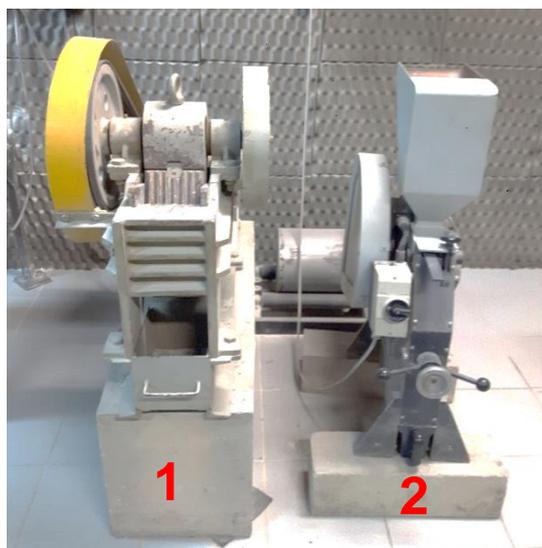
Após o tratamento térmico deu-se início ao processo de moagem do RBROTT, que inicialmente consistiu em utilizar um primeiro triturador de mandíbulas (1) para reduzir as dimensões do bloco de RBROTT. Feito isso, foi empregado um segundo triturador de mandíbulas (2) para reduzir ainda mais as dimensões do resíduo e facilitar a moagem final. Na Figura 22 estão representados os dois trituradores de mandíbula utilizados

Figura 21: RBROTT logo após o tratamento térmico e após limpeza da superfície



Fonte: Acervo pessoal

Figura 22: Trituradores de mandíbula utilizados (1 e 2)



Fonte: Acervo pessoal

Após a finalização da primeira parte do processo de moagem, o RBROTT foi transferido para um moinho de bolas por 3 horas e 30 minutos afim de reduzir sua granulometria.

A opção pelo moinho de bolas, e não o moinho de argolas, se deu pela maior quantidade de resíduo que poderia ser processada em uma única vez, devido a capacidade do moinho de bolas ser maior que a do moinho de argolas. Foram moídos por vez aproximadamente 5 kg. A Figura 23 mostra o moinho de bolas utilizado.

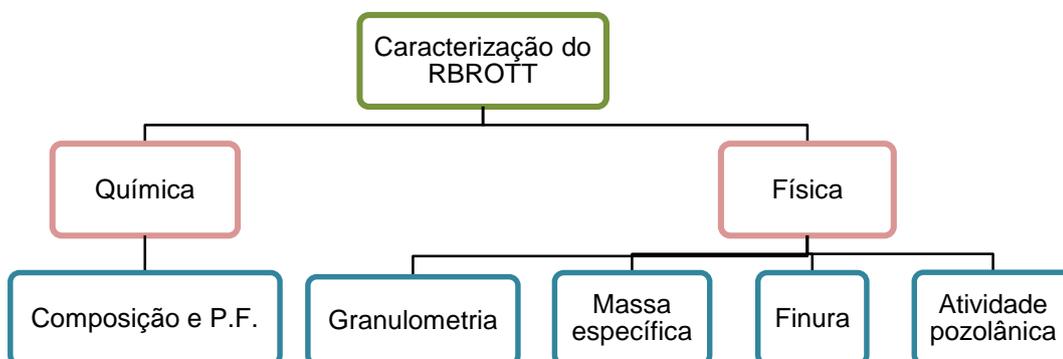
Figura 23: Moinho de bolas



Fonte: Acervo pessoal

Após a finalização do processo de produção do RBROTT (tratamento térmico e moagem) foram realizados ensaios para caracterização do material, afim de verificar suas características após o processo e avaliar o grau da atividade pozolânica que o resíduo apresenta. A Figura 24 mostra quais ensaios foram realizados.

Figura 24: Ensaios de caracterização do RBROTT



Fonte: Acervo pessoal

3.4.2 Caracterização do RBROTT

3.4.2.1 Caracterização Física

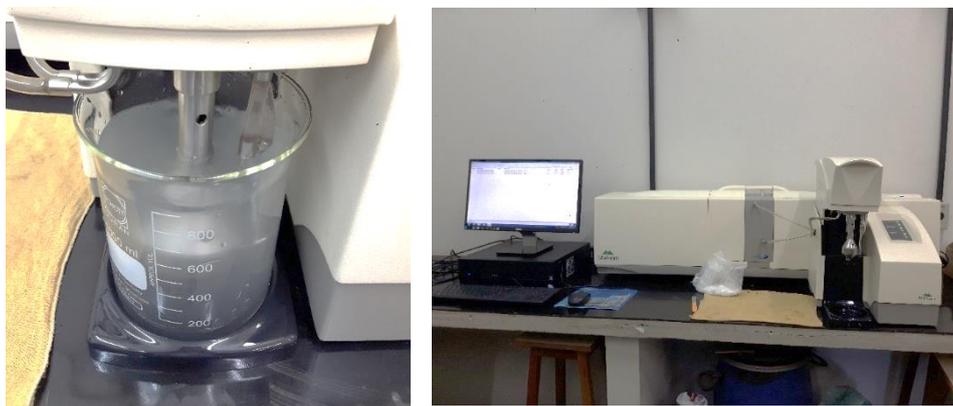
Para caracterização física do RBROTT foram realizados ensaios para determinação da composição granulométrica, da massa específica, da finura e da atividade pozolânica.

Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado em parceria com o Laboratório de Materiais Cerâmicos do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES do Campus Vitória.

A composição granulométrica do RBROTT foi determinada através de um granulômetro a laser da marca Malvern modelo Mastersize Hydro 2000MU, que possui em um computador acoplado ao equipamento um programa computacional próprio que faz as análises. A Figura 25 mostra uma visão geral do equipamento e o resíduo dissolvido em água destilada para realização do ensaio.

Figura 25: Resíduo pronto para ensaio e visão geral do granulômetro à laser



Fonte: Acervo pessoal

Finura

A finura é um indicativo da área superficial e influencia significativamente na reatividade do material. A análise desse parâmetro foi realizada através do percentual retido na peneira nº 200 e na peneira nº 325 e também pelo método da permeabilidade de Blaine.

A análise da finura através do método do material retido na peneira nº 325 foi realizado seguindo as diretrizes da NBR 15894-3 (ABNT, 2010) – Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Determinação da finura por meio da peneira 45 μm .

Já a análise através do material retido na peneira nº 200 foi realizada a partir da NBR 11579 (ABNT, 2013) – Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200).

Porém, ao contrário do que a norma recomenda, que o peneiramento seja feito através de via seca, foi necessário realizar o peneiramento por via úmida, uma vez que ao realizar o ensaio observou-se a formação de grumos que dificultavam a passagem de material. Dessa forma, após a realização do ensaio o material retido foi seco em estufa a $105 \pm 0,5$ °C para então ser determinada a finura.

Já o ensaio para determinação da finura pelo método de Blaine foi realizada na empresa Lafarge/Holcim pelos técnicos responsáveis pelo setor de controle de qualidade da empresa. O procedimento seguiu as recomendações da NBR 16372 (ABNT, 2015) e para isso foi utilizado o aparato experimental mostrado na Figura 26.

Figura 26: Aparato experimental realização do ensaio de Blaine



Fonte: Mittri (2016)

Massa específica

A determinação da massa específica do RBROTT foi realizada seguindo os procedimentos descritos na NBR NM 23 (ABNT, 2001) – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.

Foi utilizado um frasco de Le Chatelier (Figura 27), preenchido com xileno até a marca do zero na escala e então foi colocada uma massa conhecida de RBROTT e foi verificado o deslocamento do líquido, que corresponde ao volume equivalentemente a massa de RBROTT. Assim, conhecendo-se a massa e o volume do material é possível calcular sua massa específica.

Figura 27: Frasco de Le Chatelier



Fonte: Acervo pessoal

Atividade Pozolânica

Após passar pelo tratamento térmico e moagem, o RBRO torna-se um material vítreo com possível potencial pozolânico. Para verificar a pozolanicidade do RBROTT, foram realizados ensaios de índice de atividade pozolânica de acordo com as normas NBR 5751 (ABNT, 2015) Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com a cal aos sete dias e NBR 5752 (ABNT, 2014) Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias.

O ensaio de atividade pozolânica com a cal consiste em produzir argamassas compostas por hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), areia normal brasileira (em 4 granulometrias diferentes) e material pozolânico em quantidades preestabelecidas. A quantidade de água utilizada deve ser tal que a argamassa obtenha um índice de consistência de 225 ± 5 mm.

Com a argamassa produzida foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm que foram rompidos aos 7 dias de idade. Após 24h da moldagem os corpos de prova foram colocados em estufa a 55 ± 2 °C até o dia do rompimento.

Ao serem retirados da estufa os corpos de prova permaneceram por 2h em temperatura ambiente e então foram desmoldados e retificados para que fosse realizado o ensaio de resistência à compressão axial.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015) – Materiais pozolânicos – Requisitos para que o material seja considerado pozolânico, a resistência à compressão axial média, parâmetro avaliado para verificar a atividade pozolânica com a cal, deve ser superior a 6 MPa.

Já a verificação da pozolanicidade do RBROTT com o cimento consiste em avaliar duas argamassas diferentes, uma delas chamada de argamassa A é uma argamassa de referência composta por cimento CP II F 32, areia normal (em 4 granulometrias diferentes) e água. Já a argamassa B é composta pelos mesmos materiais da argamassa A e também pelo material o qual deseja-se avaliar a atividade pozolânica.

Portanto, foram produzidas as argamassas A e B e moldados 6 corpos de prova de 5 x 10 cm para cada argamassa e após 28 dias da moldagem foi verificada a resistência à compressão axial.

A análise da atividade pozolânica é feita através de um índice de desempenho calculado através da Equação 14 que deve ser superior a 90% para que o material seja considerado pozolânico.

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \quad (14)$$

Em que,

Icimento = índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, expresso em porcentagem; f_{cB} = resistência à compressão axial média dos corpos de prova da argamassa B e f_{cA} = resistência à compressão axial média dos corpos de prova da argamassa A.

3.4.2.2 Caracterização química

Esta etapa da caracterização do RBROTT foi realizada pelo Laboratório do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis – LTG-ER, localizado na cidade de Natal – RN.

De acordo com o laboratório a análise química foi realizada pela técnica de fluorescência de raios-X (FRX) utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu. Já para análise do material pelo método de perda ao fogo o RBROTT foi primeiramente seco em estufa por 24h a temperatura de 100°C e então a amostra foi aquecida até 1000°C por 60 min.

3.4.3 Pastas cimentícias

3.4.3.1 Procedimento de mistura das pastas cimentícias

Um dos fatores mais importantes no estudo de pastas é a homogeneidade das amostras analisadas. Para garantir que as mesmas estejam homogêneas antes da execução do ensaio é necessário que seja estabelecido um procedimento de mistura padrão adequado.

França *et al.*, (2011), Williams *et al.*, (1999) e Han e Ferron (2015) apontam o tempo de mistura como um fator que influencia significativamente o comportamento reológico de pastas cimentícias. Segundo os autores, quanto maior o tempo e a intensidade de mistura, mais dispersa, homogênea, estável e fluida será a mistura.

Pesquisas citadas anteriormente sugerem que misturadores de alto cisalhamento promovem melhores resultados com relação a homogeneidade das amostras. Assim, para promover a mistura das pastas foi utilizado nesta pesquisa como misturador de alto cisalhamento um liquidificador da marca Oster, modelo 6855 de 14 velocidades e 450 watts (Figura 28), o mesmo utilizado por Sato (2015).

O liquidificador possui copo de vidro seguro contra choque térmico e é testado para resistir a mudanças extremas de temperatura. A lâmina utilizada para realizar a mistura é da mesma marca, feita de aço inoxidável e possui 6 pás. O liquidificador e a lâmina utilizados são mostrados na Figura 28.

Figura 28: Hélice e liquidificador utilizados para mistura das pastas cimentícias



Fonte: Acervo pessoal

O procedimento de mistura das pastas cimentícias utilizadas nesta pesquisa foi uma adaptação do método proposto por Sato (2015), que utilizou um procedimento adaptado de Mukhopadhyay e Jang (2008).

Sato (2015) testou 2 diferentes tempos de mistura efetivos no misturador, 100 segundos e 300 segundos, utilizando apenas as 2 primeiras velocidades do liquidificador. Os procedimentos de mistura adotados para cada tempo é apresentado na Figura 29.

Figura 29: Tempos de mistura testados por Sato (2015)

30s	60s	30s	60s	40s
Mistura Velocidade Baixa (V1)	Parar e limpar	Mistura Velocidade Alta (V2)	Parar e limpar	Mistura Velocidade Alta (V2)
Tempo total: 3 minutos e 40 segundos				

90s	60s	90s	60s	120s
Mistura Velocidade Baixa (V1)	Parar e limpar	Mistura Velocidade Alta (V2)	Parar e limpar	Mistura Velocidade Alta (V2)
Tempo total: 7 minutos				

Fonte: Sato (2015)

Observa-se que a única diferença entre os procedimentos era apenas o tempo em que o liquidificador ficava ligado em cada etapa.

Outro parâmetro estabelecido por Sato (2015) foi a utilização de um pré-cisalhamento no reômetro, aplicado às amostras imediatamente antes de iniciar os ensaios. Os valores de pré-cisalhamento avaliados por Sato (2015) estão na Tabela 10.

Tabela 10: Pré-cisalhamentos testados por Sato (2015)

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

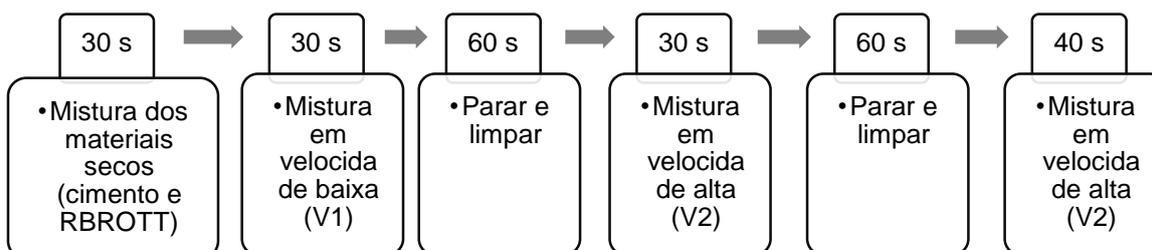
Fonte: Sato (2015)

Após diversos testes realizados, Sato (2015) concluiu que o procedimento de mistura mais adequado era o de 100 s de mistura efetiva no liquidificador com pré-cisalhamento no reômetro de $100 s^{-1}$ por 2 minutos.

Nesta pesquisa optou-se por utilizar o tempo de mistura efetivo de 100 s no liquidificador, porém com a inclusão de um tempo de 30 s de mistura dos materiais secos, feita manualmente, antes do início da mistura no liquidificador.

O esquema do procedimento de mistura adotado é mostrado na Figura 30. Com relação ao pré-cisalhamento aplicado no reômetro, inicialmente adotou-se o utilizado por Sato (2015) de $100 s^{-1}$ por 2 minutos.

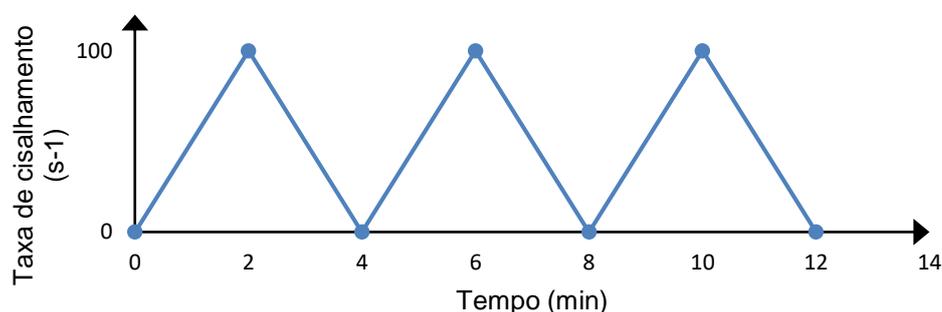
Figura 30: Procedimento de mistura adotado nesta pesquisa



Fonte: Acervo pessoal

Para verificação da homogeneidade da amostra foi realizado um teste, proposto por Sato (2015) que consistia em preparar a mistura, aplicar o pré-cisalhamento no reômetro e então imediatamente executar um ensaio de fluxo de 3 ciclos de aceleração e desaceleração da taxa de cisalhamento de 0 s^{-1} a 100 s^{-1} . Cada rampa (aceleração ou desaceleração) do ensaio teve duração de 2 minutos. Um esquema geral do ensaio é mostrado da Figura 31.

Figura 31: Procedimento de teste para verificação do pré-cisalhamento



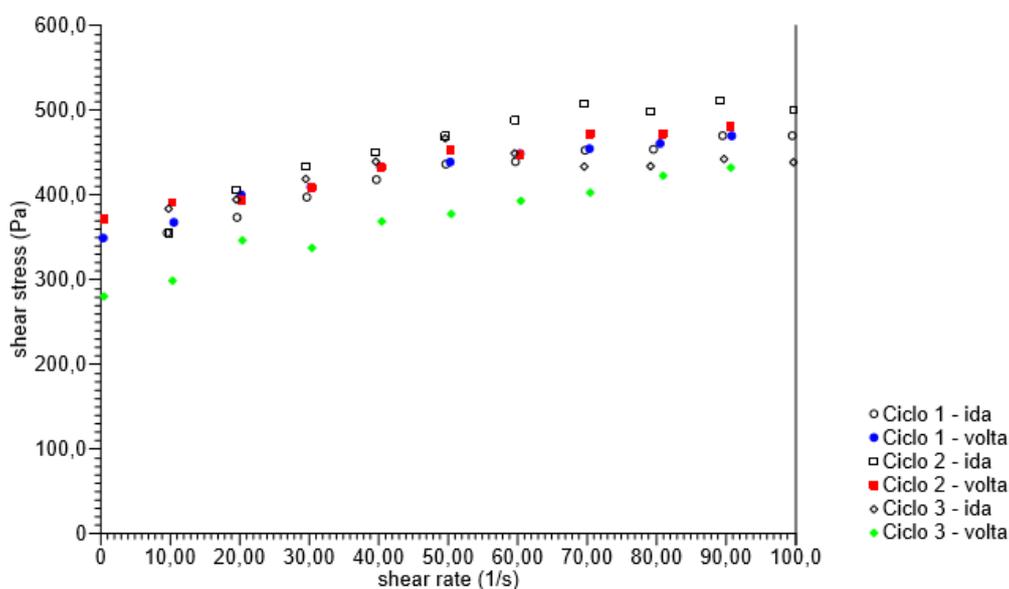
Fonte: Acervo pessoal

Para execução deste ensaio foi preparada a pasta com menor relação a/c (0,45) e maior quantidade de RBROTT (20%), pois era a pasta que possivelmente apresentaria a maior viscosidade e, portanto maior dificuldade de mistura.

Após a realização dos 3 ciclos do ensaio de fluxo, espera-se que cada ciclo apresente a menor área de histerese (região entre a curva de aceleração e desaceleração) possível e que essa área seja semelhante para os 3 ciclos.

Esse comportamento demonstra a eficiência do procedimento de mistura adotado, uma vez que quanto menor a área de histerese, mais homogêneas e dispersas estão as partículas da mistura e a semelhança entre os ciclos indica que a dispersão ocorreu antes da realização do ensaio e não durante o mesmo, situação que não é adequada.

O gráfico de tensão x taxa de cisalhamento gerado após a realização do teste (Figura 32) mostra o comportamento da pasta T45,20 e os valores para área de histerese de cada ciclo estão apresentadas na Tabela 11.

Figura 32: Ciclos de cisalhamento com pré-cisalhamento de 100 s^{-1} 

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 11: Valores de área de histerese para os pré-cisalhamentos analisados

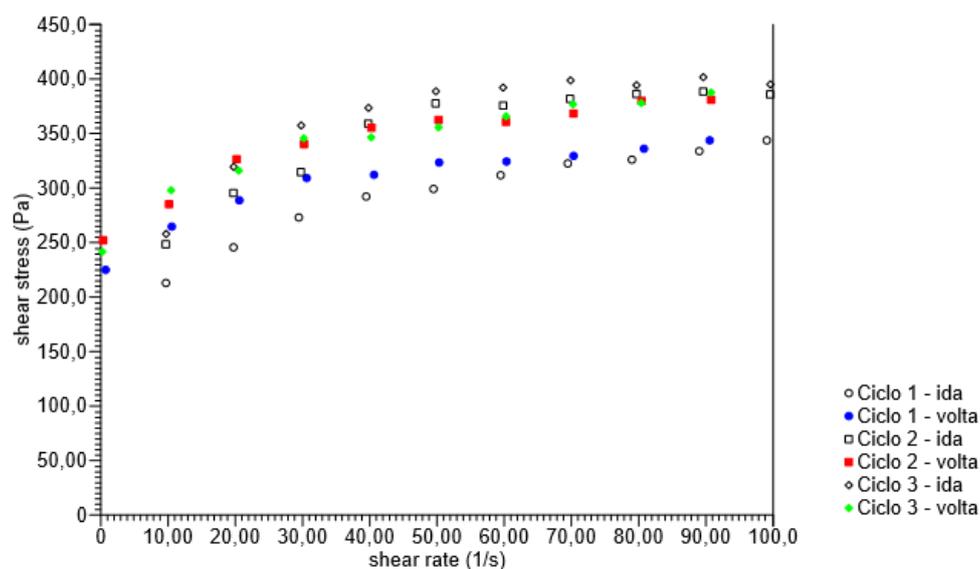
Pré-cisalhamento (s^{-1})	Área de histerese	
	Ciclo	Área de histerese
50	Ciclo 1	116,03
	Ciclo 2	85,04
	Ciclo 3	257,03
100	Ciclo 1	4,61
	Ciclo 2	315,86
	Ciclo 3	638,14
150	Ciclo 1	450,53
	Ciclo 2	296,4
	Ciclo 3	73,45

Fonte: Acervo pessoal

Percebe-se pelos valores da Tabela 11 que os ciclos apresentaram valores diversos entre si, apesar de aparentemente serem semelhantes na análise gráfica.

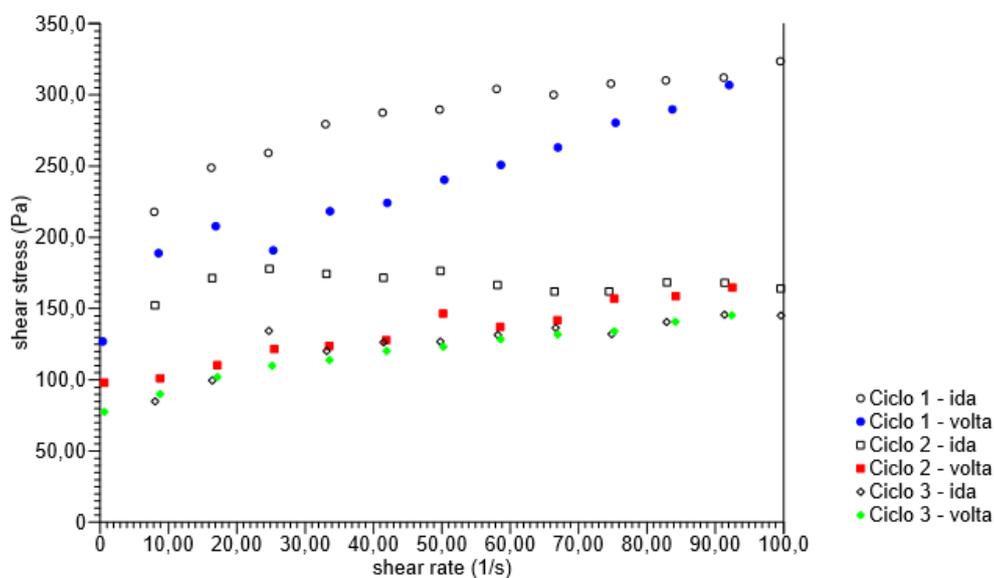
Portanto, decidiu-se testar outros 2 valores de pré-cisalhamento, mantendo o mesmo tempo (2 minutos), que foram 50 s^{-1} e 150 s^{-1} , afim de avaliar se com essas taxas haveria uma melhor dispersão das partículas antes de serem realizados os ensaios propriamente ditos. Os resultados para as taxas de 50 s^{-1} e 150 s^{-1} estão na Figura 33 e Figura 34, respectivamente e na Tabela 11.

Figura 33: Ciclos de cisalhamento com pré-cisalhamento de 50 s-1



Fonte: Acervo pessoal

Figura 34: Ciclos de cisalhamento com pré-cisalhamento de 150 s-1



Fonte: Acervo pessoal

Observa-se nas Figuras 33 e Figura 34 e pelos valores de área de histerese para cada ciclo que o procedimento de mistura que obteve valores menores e mais consistentes entre si foi o com pré-cisalhamento de 50 s^{-1} aplicado durante 2 minutos.

Dessa forma, foi estabelecido que para esta pesquisa o procedimento de mistura padrão mais adequado para preparação das pastas cimentícias consistiu em utilizar um tempo de mistura efetivo de 100 s no liquidificador e que antes da execução dos ensaios seria aplicado um pré-cisalhamento de 50 s^{-1} durante 2 minutos em todas as amostras.

3.4.3.2 Métodos de ensaios reológicos

Como já dito anteriormente, para esta etapa da pesquisa foram preparadas pastas cimentícias com 3 relações a/c diferentes (0,45; 0,55; 0,65) e 4 porcentagens distintas de adição de RBROTT (0%, 10%, 15% e 20%), gerando 12 combinações. Para cada combinação foram ensaiadas 3 amostras, totalizando 36 amostras para cada ensaio realizado.

Um fator essencial a ser determinado em análises reológicas de pastas cimentícias é o tempo de hidratação do cimento em que os ensaios serão realizados. É importante ressaltar que os ensaios são efetuados em regime permanente, que significa que as propriedades de uma dada seção do escoamento, quando neste estado, não se alteram com o tempo.

No entanto, o cimento é um material que após o contato com a água está em constante processo de hidratação e liberação de calor, uma vez que essa reação é exotérmica. Contudo, existe um estágio da hidratação do cimento em que observa-se uma baixa de liberação de calor, de modo que as reações acontecem de forma muito lenta.

Esse estágio é denominado de período de indução e tem duração aproximada de 30 minutos a 3 horas e inicia-se após alguns minutos do começo do processo de hidratação.

Por este motivo, foi adotado o tempo de hidratação de 20 minutos contados a partir do contato do cimento com a água para realização dos ensaios reológicos nesta pesquisa: ensaio de fluxo e ensaio oscilatório de varredura de deformação.

Importante ressaltar que, assim como para outros aspectos relacionados a análise reológicas de pastas cimentícias, não há um consenso sobre o tempo de hidratação ideal para realização dos ensaios.

São adotados diferentes tempos de hidratação por diferentes autores, Sato (2015) e Vikan *et al.*, (2007) adotaram o tempo de 20 minutos, Betiolli (2007) e Phan *et al.*, (2006) especificaram um tempo de 15 minutos, Sant *et al.*, (2008) realizou os ensaios com 5 minutos de hidratação, Kaleta *et al.*, (2015), Nachbaur *et al.*, (2001) e Ma *et al.*, (2016) realizaram os ensaios imediatamente após a mistura e alguns autores não especificam o tempo adotado, como Han e Ferron (2015), Ferraris (2000), Park *et al.*, (2005), Conte (2016) e Janotka *et al.*, (2010).

Ensaio de Fluxo

O ensaio de fluxo consiste em aplicar uma taxa ou tensão de cisalhamento e, a partir do esforço aplicado, medir a resistência que o material apresenta. A representação do comportamento reológico pode ser dada através das curvas de tensão x taxa de cisalhamento ou viscosidade x taxa de cisalhamento e a partir das curvas traçadas pode-se calcular os parâmetros reológicos de tensão de escoamento e viscosidade aparente a partir de equações de modelos reológicos.

Portanto, neste ensaio as amostras foram submetidas a variações na taxa de cisalhamento que correspondem primeiro a uma aceleração, ou seja, aumento de 0 a 150 s^{-1} (curva de aceleração) durante 2 minutos e imediatamente foram submetidas a uma desaceleração até 0 s^{-1} em mais 2 minutos (curva de desaceleração). Como dito anteriormente, todas as amostras foram ensaiadas com 20 minutos de hidratação do cimento, portanto para cada amostra uma nova pasta era preparada.

Dessa forma, foi possível traçar as curvas dos gráficos tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento e viscosidade x taxa de cisalhamento e assim determinar as propriedades reológicas de viscosidade aparente e tensão de escoamento das diferentes misturas estudadas nesta pesquisa e verificar a influência da relação a/c e do RBROTT nas propriedades avaliadas.

Ensaio Oscilatório de Varredura de Deformação

Este ensaio é realizado aplicando-se uma deformação senoidal controlada, mantendo a frequência de aplicação constante, obtendo-se como resposta a tensão para determinada deformação. Com a razão entre a tensão e a

deformação obtém-se o módulo complexo (G^*), que pode ser dividido nas componentes elástica (G') e viscosa (G'').

Uma das respostas do ensaio de varredura de deformação é a deformação crítica que pode ser aplicada ao material sem que sua estrutura seja alterada, ou seja, determina a região viscoelástica do material na qual o módulo elástico independe da deformação e permanece constante. Essa deformação pode ser determinada através do gráfico G' x deformação, em escala logarítmica, no ponto onde a curva de G' começa a diminuir (BETIOLLI, 2007; NACHBAUR *et al.*, 2001).

Dessa forma, no ensaio de varredura de deformação as amostras foram submetidas a uma deformação senoidal, oscilando a amplitude de deformação entre 10^{-5} e 10^{-1} com frequência constante de 1 Hz.

A partir dos resultados foram traçadas as curvas de G' x deformação e então foram determinadas as deformações críticas e o módulo elástico correspondente à deformação crítica. Esses valores foram estabelecidos no ponto anterior ao ponto em que o valor de G' apresentou uma redução de 10%, onde possivelmente ocorreu a fragmentação da estrutura.

3.4.4 Produção e ensaios nas argamassas

De forma a verificar a contribuição da adição de RBROTT em matrizes cimentícias, foram analisados 12 traços de argamassa variando a relação a/c (0,45, 0,55, e 0,65), a porcentagem de adição de RBROTT (0%, 10%, 15% e 20%) e a idade dos ensaios.

As argamassas foram produzidas em um misturador planetário (Figura 35) com capacidade para 5 L que se encontra no LEMAC. O procedimento de mistura adotado foi o a NBR 7215 (ABNT, 1997).

Logo após a produção, as argamassas foram analisadas no estado fresco através dos ensaios de índice de consistência e massa específica. Nesta pesquisa não foi especificado um valor a ser atingido no ensaio de índice de consistência, uma vez que o objetivo foi avaliar o comportamento das argamassas com a variação da relação a/c e da porcentagem de adição de RBROTT.

Figura 35: Misturador planetário



Fonte: Acervo pessoal

Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios foram os regulamentados nas NBR 13276 (ABNT, 2005) e NBR 13278 (ABNT, 2005) para índice de consistência (Figura 36) e massa específica, respectivamente.

Figura 36: Mesa para determinação do índice de consistência



Fonte: Acervo pessoal

Feita a análise das argamassas no estado fresco, as mesmas argamassas foram utilizadas para moldar os corpos de prova para análise no estado endurecido. Foram moldados no total 216 corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm de acordo com os procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 1997).

Na sequência, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida por 24 horas e então foram desmoldados e identificados. Após esse procedimento os corpos de prova foram submetidos a cura submersa em água saturada com cal até a data estipulada para realização dos ensaios, em que eram retirados da cura e retificados.

No estado endurecido primeiramente foi realizado o ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico conforme diretrizes estipuladas na NBR 15630 (ABNT, 2008), uma vez que o mesmo é um ensaio não destrutivo. Na sequência os mesmos corpos de prova foram então rompidos para verificação da resistência à compressão axial de acordo com o método proposto na NBR 5739 (ABNT, 2007).

O módulo de elasticidade dinâmico foi mensurado através de um medidor de velocidade de pulso ultrassônico, mostrado na Figura 37, da marca Proceq, modelo Pundit Lab. O ensaio baseia-se na velocidade de propagação da onda ultra sônica (v) ao longo do corpo de prova, ou seja, sua altura e então o módulo de elasticidade dinâmico é calculado através da Equação (15).

$$Ed = v^2 \times \rho \frac{(1 + \mu) \times (1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (15)$$

Em que Ed = módulo de elasticidade dinâmico, ρ = densidade de massa aparente do corpos de prova (massa sobre volume do corpo de prova) e μ = coeficiente de Poison (valor adotado de 0,2 de acordo com NBR 15630 (ABNT, 2008)).

Figura 37: Equipamento para determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica



Fonte: Acervo pessoal

Para o rompimento dos corpos de prova, afim de verificar a resistência à compressão axial, foi utilizada uma prensa univesal da Amsler, com mostrador analógico e limite de escala de 25 tf (Figura 38).

Antes da realização do ensaio foi determinado o diâmetro da seção transversal de cada corpo de prova e através da carga de ruptura obtida no ensaio foi calculada e resistência à compressão axial através da razão entre a carga de ruptura e a área da seção transversal do corpo de prova.

Figura 38: Detalhe do corpo de prova e prensa para rompimento dos corpos de prova



Fonte: Acervo pessoal

3.4.5 Análise estatística dos dados

Ao final de cada etapa foi aplicado um tratamento estatístico aos dados através do Software Statistica®, versão 7.0 em que foi realizada uma análise de variância (ANOVA) visando uma melhor análise da influência e da interação dos parâmetros avaliados.

A ANOVA avalia a significância de diversos fatores e suas interações e o nível de significância adotado para a análise foi de 5%, ou seja, o intervalo de confiança na decisão é de 95%.

Como resultado da análise, o software Statistica® gera um parâmetro p que se for menor que o valor adotado (0,05) o fator em estudo influencia significativamente no resultado analisado, caso contrário o fator não exerce influência significativa.

A Tabela 12 mostra os níveis adotados para cada variável independente (ou fatores controláveis) desta pesquisa de forma a auxiliar na análise estatística dos dados.

Tabela 12: Níveis adotados para as variáveis independentes

Fatores controláveis	Nº de níveis	Níveis adotados
Tipo de resíduo	1	RBRO após tratamento térmico
Relação água/cimento	3	0,45; 0,55; 0,65
Idade dos ensaios	3	28; 63 e 91 dias
Percentual de adição	4	0%; 10%; 15%; 20%

Fonte: Acervo pessoal

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados e discutidos neste capítulo os resultados obtidos nos ensaios apresentados no capítulo anterior. Primeiramente são analisados os resultados dos ensaios de caracterização realizados no RBROTT, de forma a verificar a pozolanicidade do resíduo.

Em seguida são analisados os resultados obtidos nos ensaios reológicos, ensaio de fluxo e de varredura de deformação, de forma a avaliar a influência dos parâmetros relação a/c e porcentagem de adição de RBROTT nas propriedades de viscosidade e tensão de escoamento e determinar a deformação crítica e o módulo elástico nesta deformação das pastas cimentícias.

Após a apresentação dos resultados dos ensaios reológicos, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados nas argamassas, massa específica e índice de consistência no estado fresco e módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão axial no estado endurecido. Nas argamassas também será avaliada a influência dos parâmetros relação a/c e porcentagem de adição de RBROTT, além da influência da idade nas propriedades analisadas

Apresentados e discutidos separadamente os resultados obtidos na duas etapas da pesquisa, será feita uma discussão com ambos resultados a fim de obter associações entre os mesmos.

4.1 Caracterização do RBROTT

Após tratamento térmico, o RBROTT foi caracterizado com relação aos aspectos químicos, físicos e mineralógicos. Um dos aspectos mais importantes avaliados foi o índice de atividade pozolânica, pois espera-se que após tratamento térmico o resíduo possua características de material pozolânico.

4.1.1 Caracterização química

A caracterização química foi realizada através de dois ensaios, perda ao fogo a 1000 °C (PF) e espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX). Os resultados encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13: Composição química do RBROTT

Propriedades	RBROTT	
Composição Química (%)	SiO ₂	67,11
	Al ₂ O ₃	23,42
	K ₂ O	3,36
	CaO	2,62
	Fe ₂ O ₃	1,53
	MgO	1,5
	TiO ₂	0,18
	SO ₃	0,05
	P ₂ O ₅	0,05
	MnO	0,03
	Cr ₂ O ₃	0,01
	Rb ₂ O	0,01
	ZrO ₂	0,01
	CuO	0,01
	SrO	0,01
P.F. (%)	0,1	

Fonte: LGT – ER, 2016

Através dos resultados do ensaio de FRX pode-se observar que o RBROTT apresenta-se como um material sílico-aluminoso, que possui em sua composição predominantemente SiO₂ (67,11%) e Al₂O₃ (23,42%), que são compostos a base de sílica e alumina, respectivamente.

Afim de classificar o RBROTT dentro do grupos das pozolanas, foi feita uma análise comparativa dos valores obtidos no ensaio com os valores prescritos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para cada classificação: Classe E, Classe N e Classe C.

Com relação à sua origem, o RBROTT se enquadra na Classe E, uma vez que não pertence ao grupos dos materiais vulcânicos, argilas calcinadas, cherts silicosos e terras diatomáceas (Classe N) e nem ao grupo das cinzas volantes (Classe C).

Já no que tange aos critérios químicos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014), pode-se observar que o RBROTT atende aos valores mínimos estabelecidos para a Classe E de pozolanas, conforme mostra a Tabela 14. Dessa forma, pode-se dizer que por este aspecto o RBROTT possui características de material pozolânico.

Tabela 14: Comparação do RBROTT com os limites da NBR 12653 (ABNT, 2015)

Propriedades	Limites ¹ por classe (%)			RBROTT (%)
	N	C	E	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50	92,06
SO ₃	≤ 4	≤ 5	≤ 5	0,05
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	0,00
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	0,10
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	Não identificado

Notas: (1) Limites estabelecidos com base na NBR 12653 (ABNT, 2014)

Fonte: Acervo pessoal

4.1.2 Caracterização física

Afim de caracterizar o RBROTT quanto às suas características físicas foram realizados os ensaios para determinação da massa específica, finura (material retido nas peneiras nº 325 e nº 200 e finura Blaine) e composição granulométrica. Na Tabela 15 encontram-se os resultados de massa específica e finura.

Tabela 15: Caracterização física do RBROTT

Propriedades		Resultados
Massa específica (g/cm ³)		2,48
Finura	Material retido na peneira nº 325 (%)	8,88
	Material retido na peneira nº 200 (%)	1,60
	Área específica - Blaine (cm ² /g)	6464

Fonte: Acervo pessoal

Com relação à área específica, o RBROTT (6464 cm²/g) apresentou valor mais alto que o do cimento CP V ARI (4751 cm²/g), mostrando que o resíduo após tratamento térmico possui partículas mais finas que a do cimento. Este fato é comum em materiais que são considerados pozolânicos, podendo-se citar cinzas volantes, metacaulim, cinza da casca de arroz, sílica ativa, entre outros.

Esse resultado sugere que o RBROTT possui elevada capacidade de reatividade, pois quanto mais finas as partículas maior a probabilidade de reação com o hidróxido de cálcio oriundo das reações de hidratação do cimento.

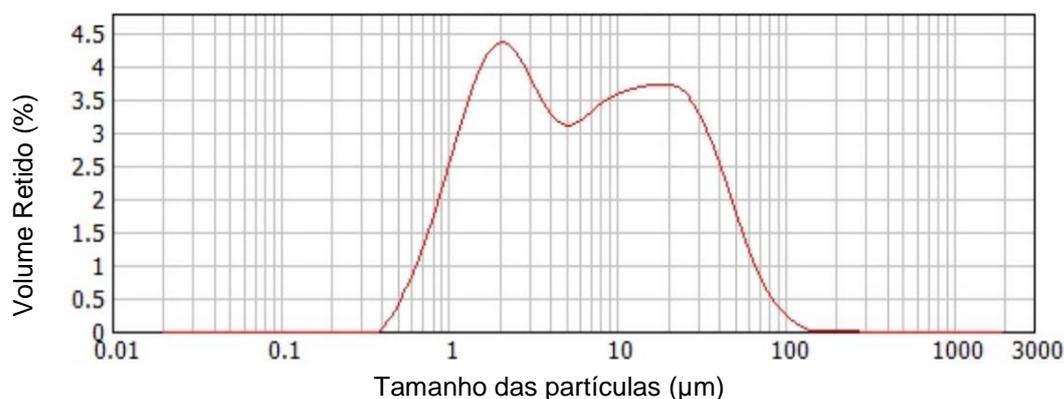
Quando comparado com outras pozolanas amplamente utilizadas, o RBROTT se mostrou mais fino do que a cinza volante, que apresenta valores na ordem de 3000 cm²/g (SIRIRUANG *et al.*, 2016) porém com relação a sílica ativa o valor

encontrado é menor, pois a finura deste material é normalmente elevada, em torno de 20.000 cm²/g, como encontrado por alguns autores como Jalal *et al.*, (2015).

A NBR 12653 (ABNT, 2014) determina que, para que o material seja considerado uma pozolana, o valor do material retido na peneira nº 325 (45 µm) seja menor que 20%. Como observa-se na Tabela 15 o RBROTT atende a este critério.

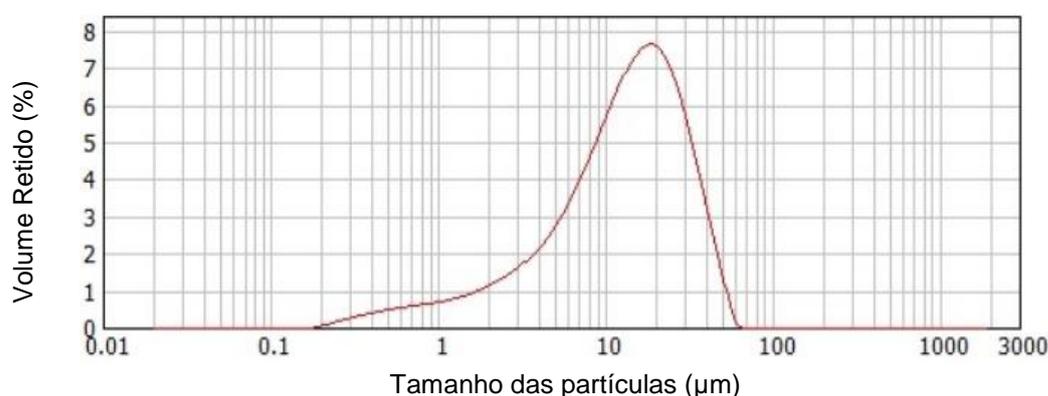
Com relação à distribuição granulométrica, realizada através de granulometria à laser, o resultado da distribuição do tamanho dos grãos está representado na Figura 39 e para efeito de comparação o resultado da distribuição granulométrica do CP V ARI utilizado neste trabalho é apresentado na Figura 40.

Figura 39: Distribuição granulométrica do RBROTT



Fonte: Laboratório de Materiais Cerâmicos – IFES, 2016

Figura 40: Distribuição granulométrica do CP V ARI

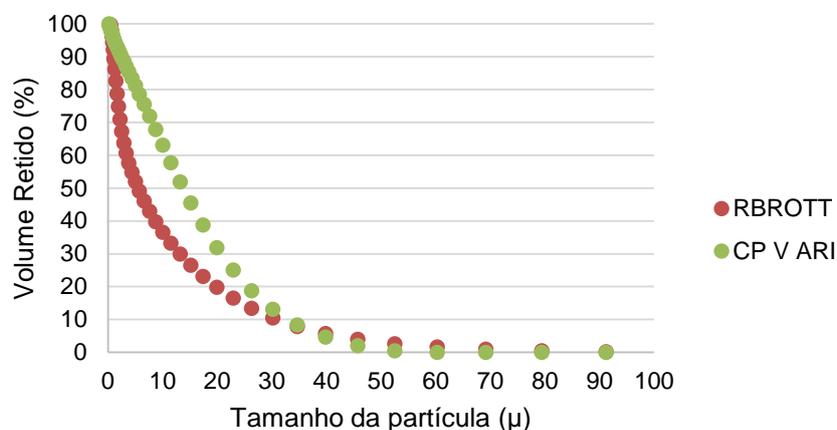


Fonte: Laboratório de Materiais Cerâmicos – IFES, 2016

Para melhor entendimento dos resultados apresentados nas Figuras 39 e 40 foi elaborado o gráfico da Figura 41, que apresenta o volume retido acumulado x tamanho das partículas para o RBROTT e para o CP V ARI.

Observa-se que de fato o RBROTT apresenta partículas menores que o CP V ARI, como verificado no ensaio de Blaine. Evidenciando a potencialidade da reatividade do RBROTT como adição mineral pozolânica.

Figura 41: Comparação do volume retido (%) entre o RBROTT e o CP V ARI



Fonte: Acervo pessoal

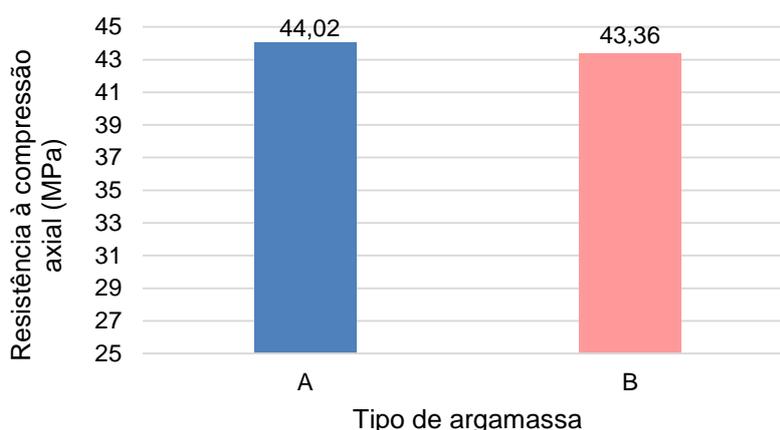
4.1.3 Atividade pozolânica

Para verificar se o resíduo após tratamento térmico possui atividade pozolânica foram realizados ensaios para determinação do índice de desempenho com o cimento e do índice de atividade pozolânica com a cal, que são requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014) para materiais pozolânicos.

O ensaio do índice de desempenho com o cimento foi realizado seguindo as recomendações da NBR 5752 (ABNT, 2014) em que foram preparadas duas argamassas (A e B) que foram rompidas a idade de 28 dias. O resultado de resistência à compressão axial para as duas argamassas está representado na Figura 42.

O índice de desempenho com o cimento é dado através da porcentagem que o valor de resistência à compressão axial da argamassa B representa da argamassa A. A NBR 12653 (ABNT, 2014) determina que para ser considerado pozolânico, o índice de desempenho com o cimento que o material apresenta deve ser superior a 90%. Para o RBROTT o índice de desempenho com o cimento obtido foi de 98,5% e, portanto atende ao critério da norma.

Figura 42: Verificação do índice de desempenho com o cimento

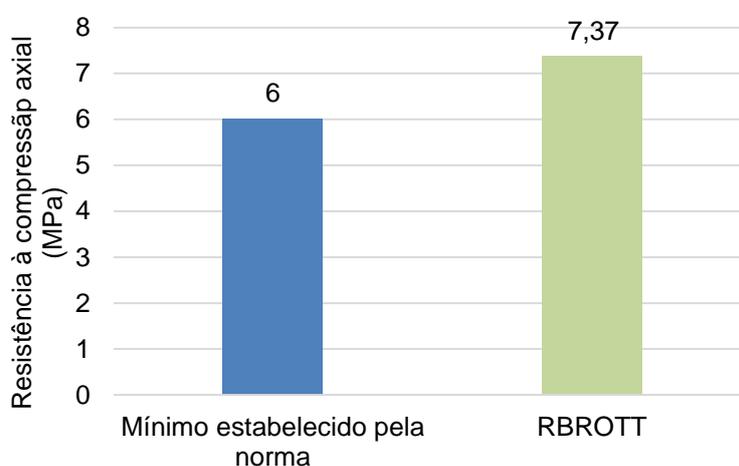


Fonte: Acervo pessoal

Outra análise realizada para verificação da atividade pozolânica foi o ensaio de índice de atividade pozolânica com a cal, seguindo as recomendações da NBR 5751 (ABNT, 2014). Nesse ensaio foram preparadas argamassas com hidróxido de cálcio e RBROTT. Os corpos de prova foram ensaiados a resistência à compressão axial e o resultado é apresentado na Figura 43.

Para esta verificação, a NBR 12653 (ABNT, 2015) recomenda que o valor mínimo de resistência à compressão axial a ser atingido é de 6 MPa. É possível observar na Figura 43 que este critério foi atingido, uma vez que o valor obtido para argamassa com RBROTT foi de 7,37 MPa, ou seja, 22,83% maior que o critério estabelecido pela norma.

Figura 43: Verificação do índice de atividade pozolânica com a cal



Fonte: Acervo pessoal

4.2 Ensaio reológicos

4.2.1 Ensaio de fluxo

Neste ensaio as amostras foram submetidas a variações da taxa de cisalhamento em que, inicialmente, houve uma aceleração de 0 s^{-1} a 150 s^{-1} e, logo em seguida, houve uma desaceleração até 0 s^{-1} .

Através desse ensaio foi possível traçar curvas de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento e de viscosidade plástica x taxa de cisalhamento, e então avaliar o comportamento reológico das pastas cimentícias. As Figuras 44, 45 e 46 trazem os gráficos citados acima para as relações a/c 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente.

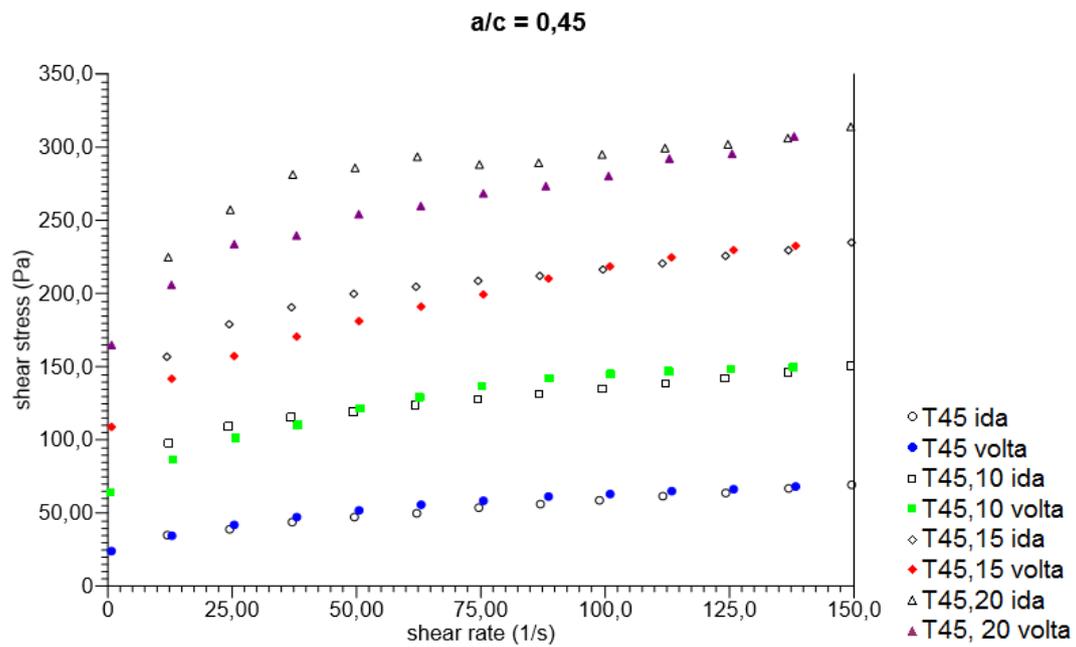
Em uma análise inicial, observa-se que as pastas apresentam um comportamento de fluido não-newtoniano, uma vez que a tensão de cisalhamento não varia linearmente com a taxa de cisalhamento.

Além disso, nota-se um comportamento de fluido pseudoplástico com tensão de escoamento, visto que a viscosidade plástica diminui com o aumento da taxa de cisalhamento e a curva de fluxo não inicia-se no zero, sugerindo que o material apresenta resistência ao escoamento inicial.

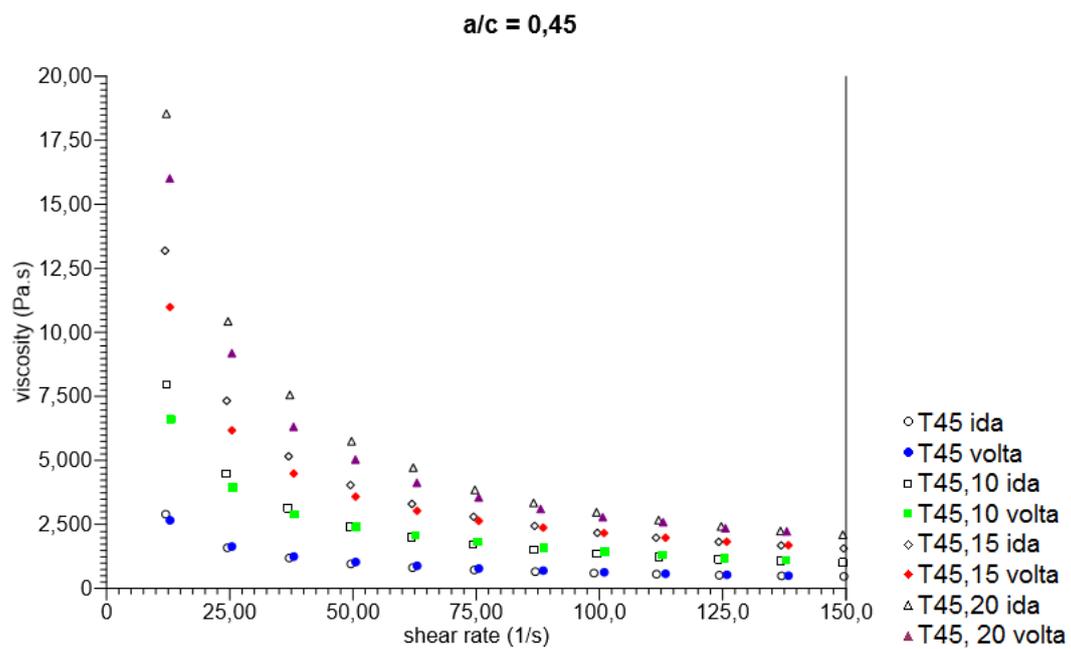
Tal comportamento para pastas cimentícias também foi verificado nos trabalhos de Betiulli (2007), Han (2014), Corinaldesi *et al.*, (2010), Sato (2015), Shang *et al.*, (2015), Couto (2016) e Barbosa (2010).

Ainda em uma análise apenas gráfica, é possível notar que para uma mesma porcentagem de adição de RBROTT, com o aumento da relação a/c há uma diminuição dos valores de tensão de cisalhamento e também um decréscimo da viscosidade.

Figura 44: Curvas de fluxo (a) e curvas de viscosidade (b) para relação a/c 0,45



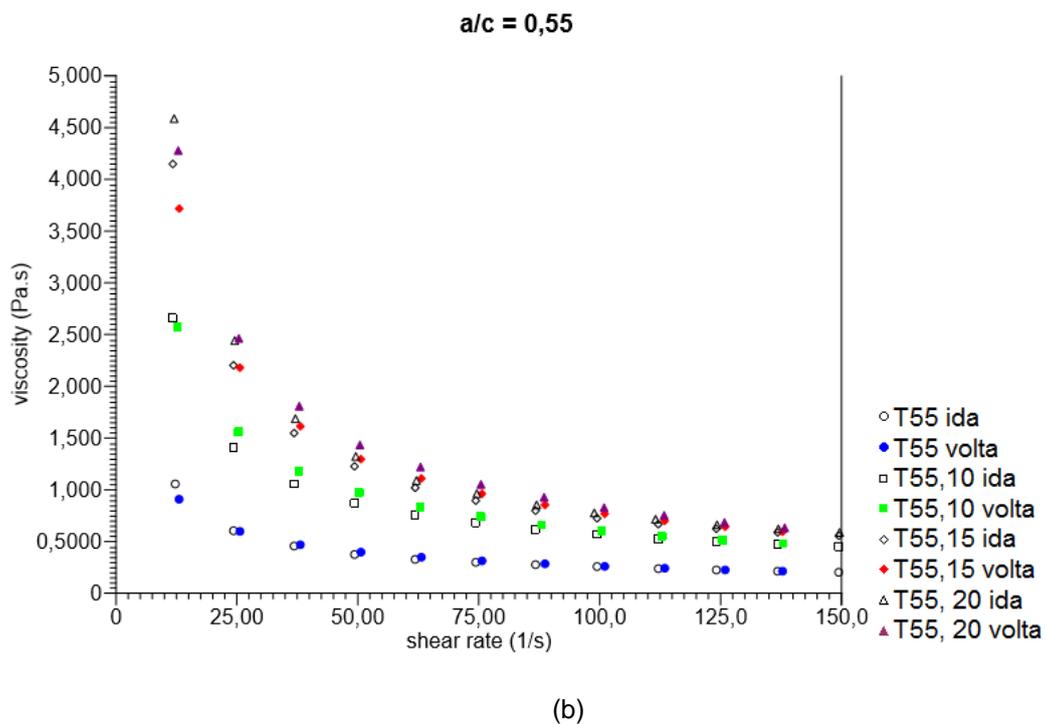
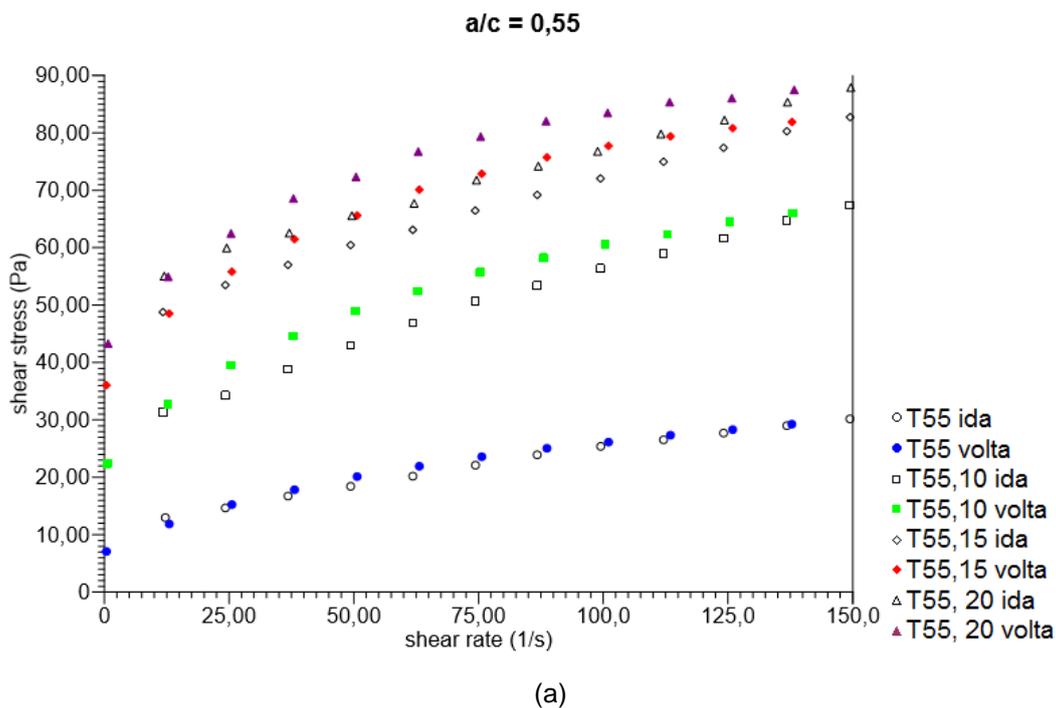
(a)



(b)

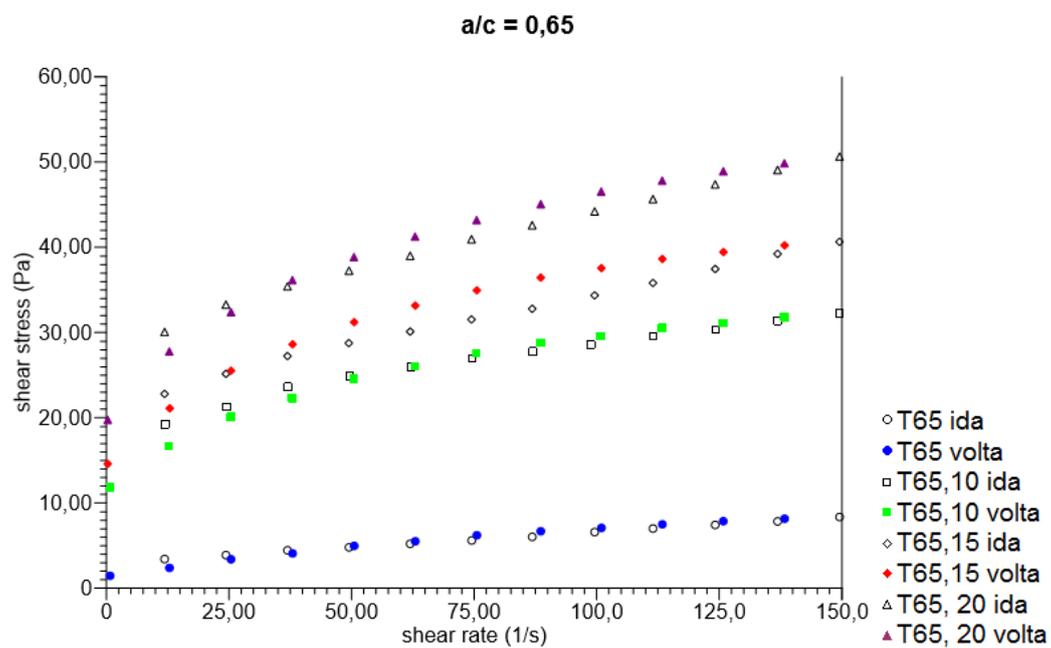
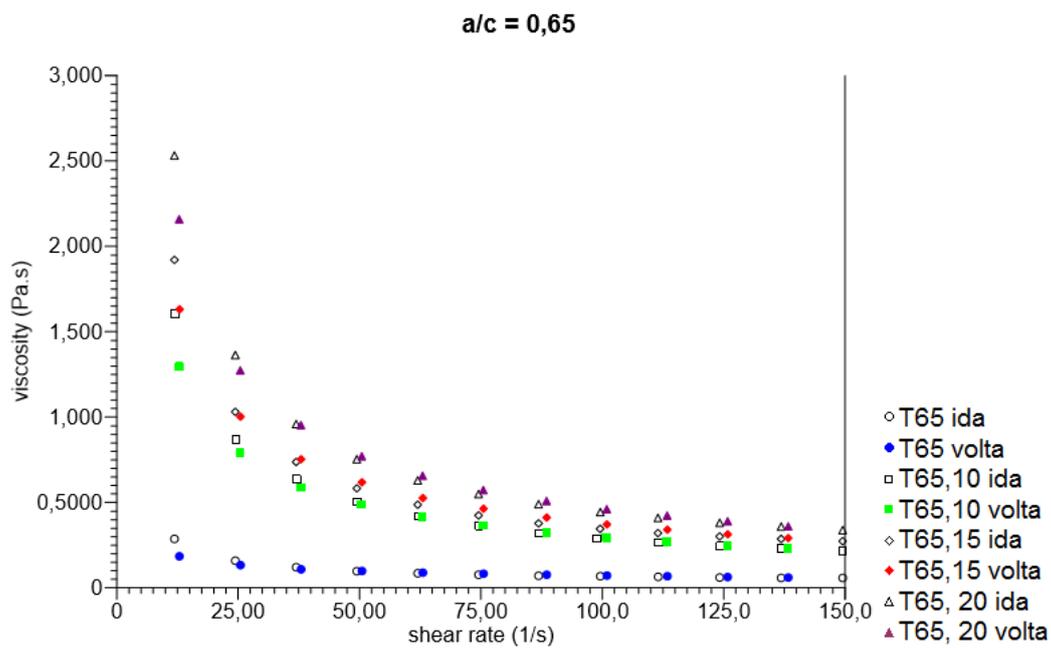
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 45: Curvas de fluxo (a) e curvas de viscosidade (b) para relação a/c 0,55



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 46: Curvas de fluxo (a) e curvas de viscosidade (b) para relação a/c 0,65



Fonte: Acervo Pessoal

Esse comportamento era esperado, visto que pastas com maiores quantidade de água em sua composição, mantendo a mesma quantidade dos demais materiais, tendem a ser mais fluidas (menor viscosidade) e, portanto resistem menos aos esforços aplicados (menor tensão de cisalhamento).

Em pastas com menor relação a/c há maior concentração de partículas de cimento que promovem uma maior aglomeração devido às forças de atração entre as partículas (forças de Van der Waals e eletrostáticas), causando maior resistência ao fluxo. Além disso, as partículas de cimento aglomeradas aprisionam parte da água dentro destes flocos (SCHULTZ, 1991 *apud* BETIOLI, 2007). De acordo com Banfill (1993;1994) essas forças de atração são responsáveis pelo aparecimento da tensão de escoamento.

De acordo com Schultz (1991 *apud* Betioli, 2007), a partir da aplicação de uma taxa de cisalhamento superior a tensão de escoamento os aglomerados se rompem e a água presente na mistura reage rapidamente com as partículas anidras, diminuindo a força de atração entre elas e, conseqüentemente, diminui a viscosidade, como observado nos resultados desta pesquisa.

Comparando pastas cimentícias com a mesma relação a/c, porém com porcentagens diferentes de adição de RBROTT, observa-se que os valores de tensão de cisalhamento e viscosidade plástica aumentam à medida que a quantidade de adição de RBROTT aumenta.

Para todas as relações a/c analisadas, a pasta que apresentou maiores valores de tensão de cisalhamento e viscosidade plástica foi a com 20% de adição de RBROTT. Comportamento semelhante foi observado por Sato (2015) que avaliou a adição de RBRO sem tratamento térmico em pastas cimentícias.

Esse comportamento deve-se possivelmente a elevada finura do RBROTT, que quando adicionado às misturas provoca uma maior aglomeração das partículas, pois diminui o espaço intergranular. Dessa forma, quanto maior for a porcentagem de adição de RBROTT, maiores serão os valores de tensão de cisalhamento e viscosidade plástica, pois há uma maior resistência aos esforços aplicados devido a aglomeração das partículas.

4.2.1.1 Análise dos parâmetros reológicos

Inicialmente, pretendia-se utilizar o modelo de Bingham para calcular os parâmetros tensão de escoamento e viscosidade aparente, afim de comprovar o comportamento analisado anteriormente. Porém, observando os gráficos das Figuras 44, 45 e 46 notou-se que as curvas de desaceleração para a maioria das pastas não apresentam comportamento linear.

Portanto, o modelo de Bingham não seria o mais adequado para determinação dos parâmetros reológicos de viscosidade aparente e tensão de escoamento por ser um modelo linear, apesar de ser o modelo mais usualmente aceito e utilizado para análise reológica de pastas cimentícias (BANFILL, 1994; FERRARIS, 2000)

Dessa forma, através de uma ferramenta chamada *“Melhor ajuste utilizando tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento”* disponível no software Data Analysis, disponibilizado pela TA Instruments, e utilizado neste trabalho para análise e cálculo dos parâmetros reológicos, foi verificado qual o modelo que mais se adequaria às curvas de desaceleração.

Constatou-se que, em sua maioria, as curvas de desaceleração se adequaram melhor ao modelo de Herschel-Bulkley (HB). Entretanto, para fins de comparação, optou-se neste trabalho por determinar os parâmetros reológicos através dos dois modelos, que estão apresentados na Tabela 16. Os valores calculados foram fornecidos diretamente pelo software.

Em uma análise inicial observa-se que os modelos de Bingham e de HB fornecem valores para tensão de escoamento diferentes. Bingham fornece valores absolutos maiores para tensão de escoamento do que HB, porém o comportamento frente à relação a/c e a porcentagem de adição de RBROTT é o mesmo para ambos modelos.

A mesma correlação pode ser feita para a viscosidade aparente do modelo de Bingham e o índice de consistência (k) obtido pelo modelo de HB. Esses parâmetros serão melhor avaliados mais adiante neste trabalho.

Tabela 16: Parâmetros reológicos definidos pelo modelo de Bingham e por Herschel-Bulkley

Traço	Bingham		Herschel-Bulkley		
	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade aparente (Pa.s)	Tensão de escoamento (Pa)	k	n
TR45	43,03	0,41	27,47	5,75	0,496767
TR55	11,77	0,15	5,99	2,11	0,506533
TR65	3,20	0,06	1,27	0,66	0,426133
T45,10	100,71	0,71	81,44	7,37	0,6036
T55,10	33,63	0,29	20,21	4,86	0,5023
T65,10	14,46	0,13	8,45	2,39	0,450333
T45,15	144,70	0,83	105,28	15,97	0,447367
T55,15	42,49	0,29	28,21	5,95	0,4327
T65,15	18,73	0,16	10,96	3,18	0,438967
T45,20	220,67	0,92	190,63	14,58	0,571533
T55,20	52,68	0,32	32,69	9,04	0,3857
T65,20	25,09	0,19	15,59	3,88	0,4387

Fonte: Acervo pessoal

Observando o índice de comportamento (n), é possível concluir que todas as pastas possuem comportamento pseudoplástico ($n < 1$) com tensão de escoamento, como observado anteriormente nos gráficos das Figuras 44, 45 e 46.

Para avaliar os resultados com maior rigor científico foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para verificar a influência dos fatores relação a/c e porcentagem de adição de RBROTT na tensão de escoamento (medida por Bingham e por HB), viscosidade aparente e índice de consistência das pastas cimentícias.

Para realização da ANOVA foi adotado um nível de confiança de 95% e, portanto um nível de significância de 5%, ou seja, para que o fator seja significativo na análise ele deve apresentar um p-valor menor que 0,05. Os resultados para o modelo de Bingham e Herschel-Bulkley encontram-se nas Tabelas 17 e 18, respectivamente.

Tabela 17: Resultados da ANOVA para o modelo de Bingham

Fatores	Tensão de escoamento		Viscosidade	
	p-valor	significância	p-valor	significância
% adição	0,055253	Não significativo	0,246658	Não significativo
a/c	0,00001	significativo	0,00000	significativo
% adição*a/c	0,00001	significativo	0,023810	significativo

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 18: Resultados da ANOVA para o modelo de Herschel-Bulkley

Fatores	Tensão de escoamento		Índice de consistência	
	p-valor	significância	p-valor	significância
% adição	0,159899	Não significativo	0,029564	significativo
a/c	0,000006	significativo	0,000072	significativo
% adição*a/c	0,000017	significativo	0,003955	significativo

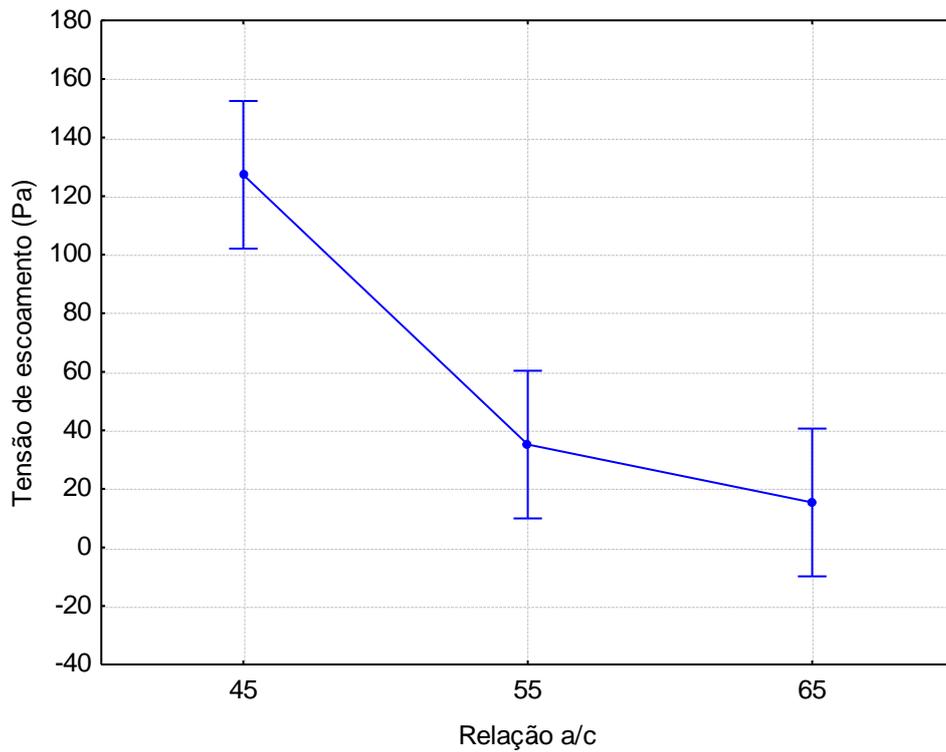
Fonte: Acervo pessoal

Observa-se que para o modelo de HB todos os parâmetros e a interação entre eles foram significativos para a variável índice de consistência, enquanto apenas a relação a/c e a interação entre %adição*a/c foram significativos para a tensão de escoamento.

Já para o modelo de Bingham o fator %adição não foi significativo tanto para tensão de escoamento quanto viscosidade, assim como os parâmetros a/c e %adição*a/c foram significativos para os dois parâmetros.

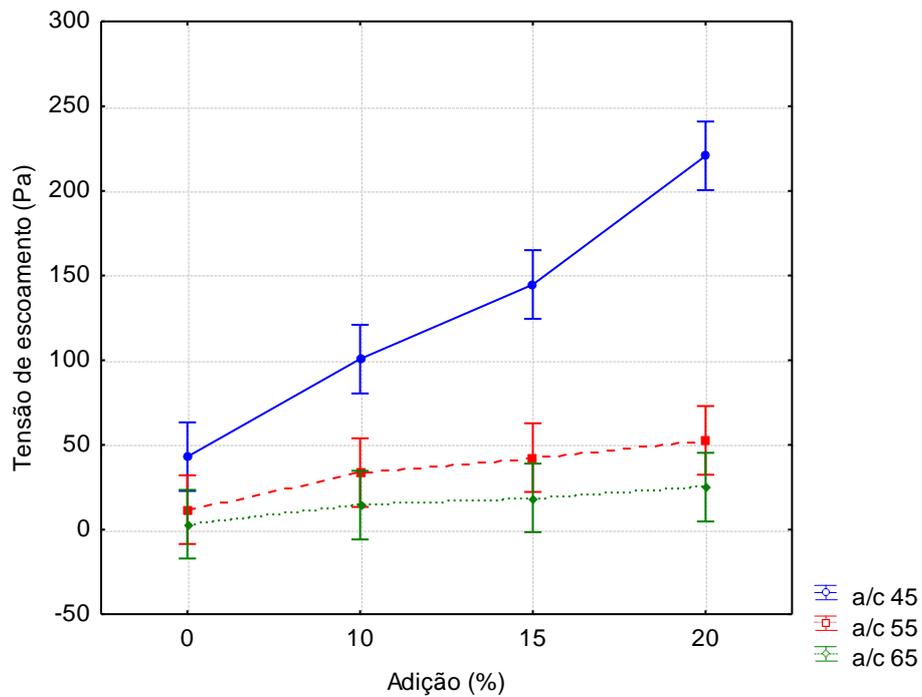
Os gráficos do efeito isolado da relação a/c e da interação a/c*%adição para a tensão de escoamento calculada pelo de modelo de Bingham são apresentados nas Figuras 47 e 48. Já os gráficos do efeito isolado da relação a/c e da interação a/c*%adição para o modelo de HB estão representados nas Figuras 49 e 50.

Figura 47: Efeito isolado da variável relação a/c sobre a tensão de escoamento determinada pelo modelo de Bingham



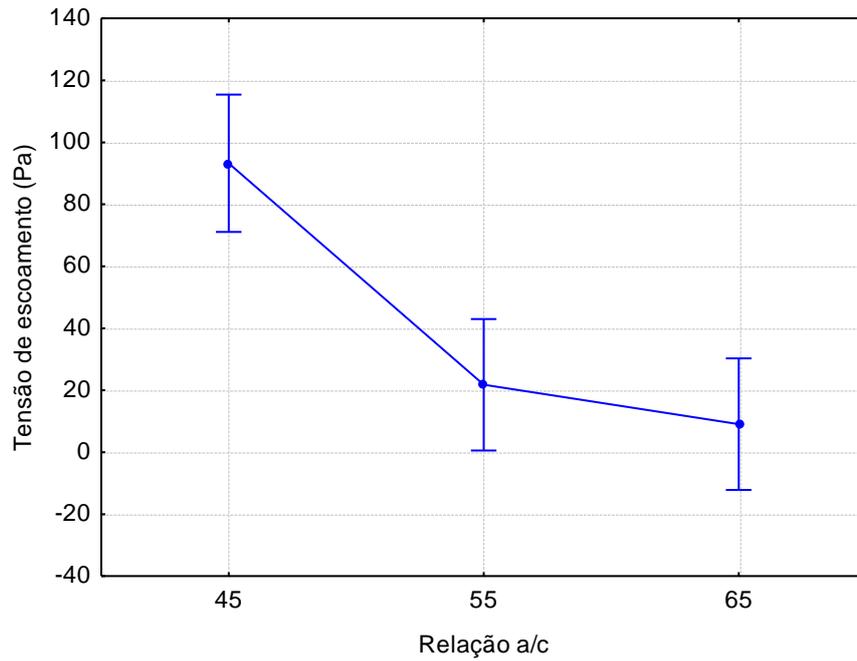
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 48: Efeito da interação entre a porcentagem de adição e a relação a/c na tensão de escoamento obtida pelo modelo de Bingham



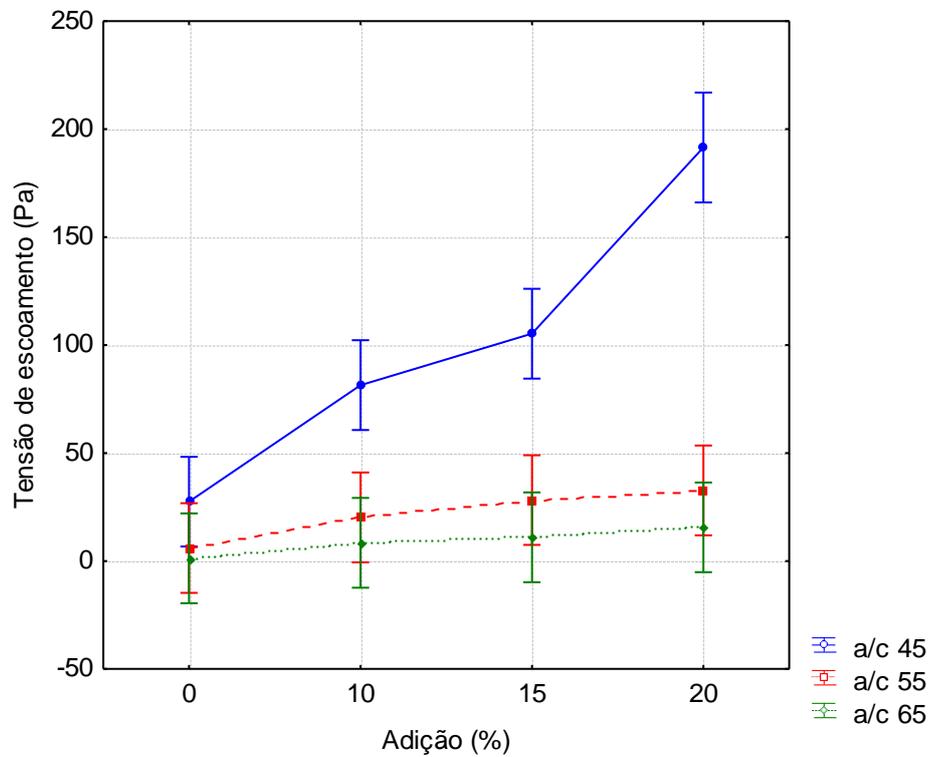
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 49: Efeito isolado da variável relação a/c sobre a tensão de escoamento determinada pelo modelo de Herschel-Bulkley



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 50: Efeito da interação entre a porcentagem de adição e a relação a/c na tensão de escoamento obtida pelo modelo de Herschel-Bulkley



Fonte: Acervo Pessoal

Nota-se comportamento bastante semelhante tanto entre os gráficos do efeito isolado da relação a/c quanto entre os gráficos da interação entre relação a/c e porcentagem de adição para a tensão de escoamento obtida pelos dois métodos.

Através da análise das Figuras 47 e 49, é possível observar que há um decréscimo na tensão de escoamento com o aumento da relação a/c. Esse comportamento era esperado, visto que quanto maior a quantidade de água presente na mistura, menos consistente a mesma se apresenta e, portanto, deforma-se com mais facilidade. Dessa forma, a tensão que deve ser aplicada à mistura para dar início ao escoamento será menor.

Observa-se nas Figuras 48 e 50 que a tensão de escoamento cresceu à medida que aumentou-se a porcentagem de adição de RBROTT para uma mesma relação a/c. Isso deve-se, possivelmente, à elevada finura do RBROTT, que preencheu os vazios intergranulares das pastas cimentícias, promovendo maior coesão entre as partículas. Em função disso, as pastas ficaram mais resistentes ao escoamento inicial, aumentando sua tensão de escoamento.

Para o modelo de HB, na relação a/c 0,45 os traços T45,10, T45,15 e T45,20 apresentaram valores 196,43%, 283,22% e 593,89% maiores quanto comparados com a pasta referência. Já para relação a/c 0,55 os valores dos traços T55,10, T55,15 e T55,20 são 237,49%, 371,16% e 446,04% maiores. Por fim, para relação a/c 0,65 as variações percentuais são de 566,27%, 764,14% e 1129,50% entre os traços T65,10, T65,15 e T65,20 e o traço referência.

Analisando a tensão de escoamento pelo modelo de Bingham, para relação a/c 0,45 os traços T45,10, T45,15 e T45,20 apresentaram valores 134,04%, 236,28% e 412,82% maiores quando comparados ao traço referência, respectivamente. Para relação a/c 0,55 os traços T55,10, T55,15 e T55,20 tiveram um crescimento de 185,70%, 260,97% e 113,17%, respectivamente. Na relação a/c 0,65 as variações percentuais foram de 352,05%, 485,78% e 684,55%.

É importante ressaltar que o aumento na tensão de escoamento está relacionado a uma diminuição da trabalhabilidade da mistura no estado fresco (JANOTKA *et*

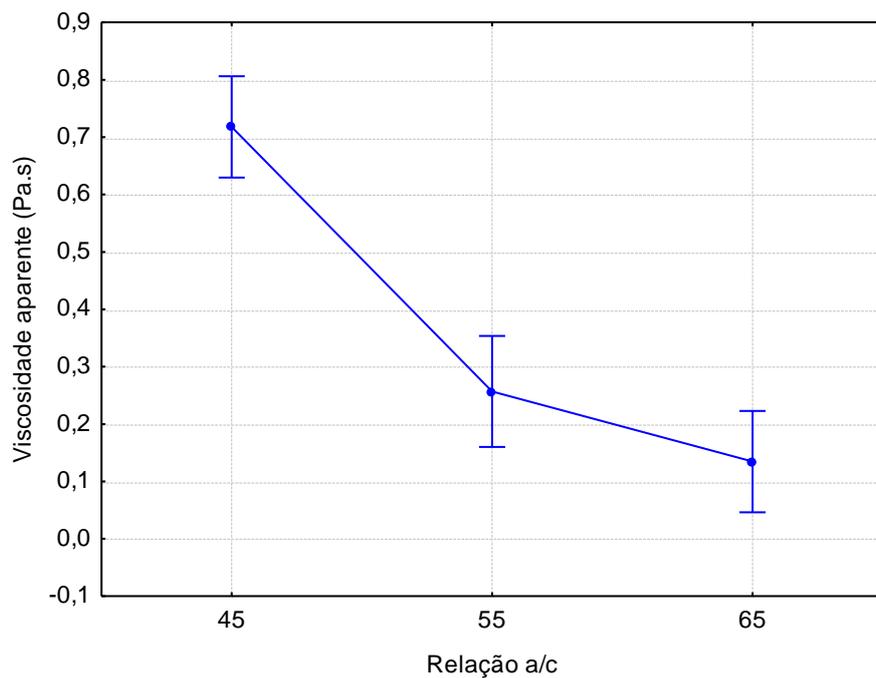
al., 2010; HAN, 2014; BANFILL, 2006). Portanto, a adição de RBROTT poderia não ser desejável por este aspecto.

No entanto, quando são comparados os valores para diferentes relações a/c nota-se que o traço T55,15 apresentou valores semelhantes ao traço TR45 (para os dois modelos), ou seja, a adição de 15% de RBROTT em uma pasta com relação a/c 0,55 provocou o mesmo efeito que uma pasta com 0% de adição e relação a/c 0,45. Assim como o traço T65,10 apresentou valores próximos aos do TR55, também para os dois modelos.

Esses resultados mostram que em matrizes cimentícias com elevada quantidade de água é possível controlar a trabalhabilidade adicionando-se o RBROTT em sua composição, e por este aspecto a utilização do RBROTT é uma alternativa viável.

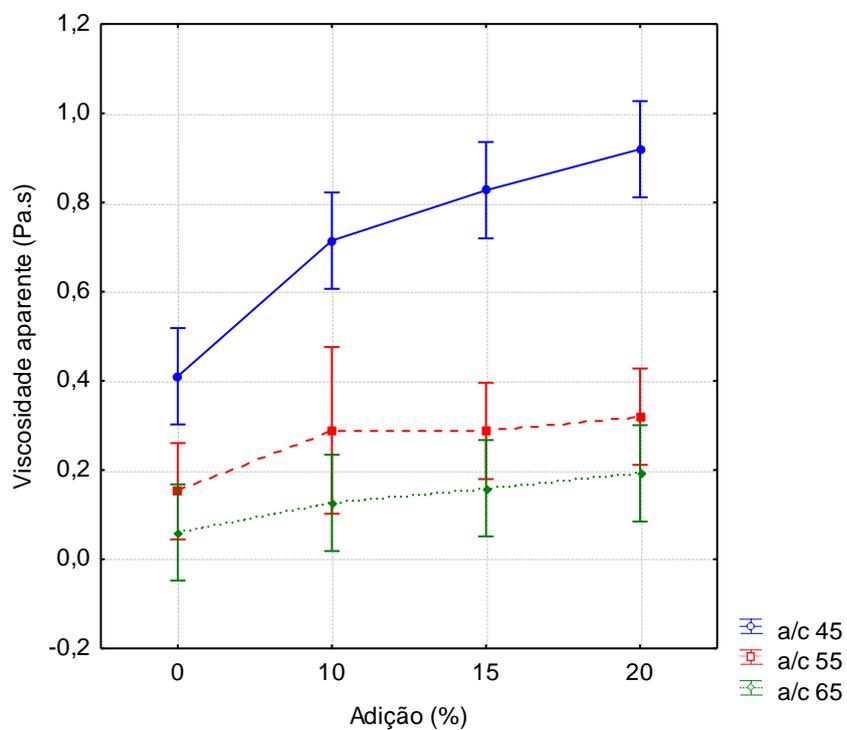
Nas Figuras 51 e 52 são apresentados o efeito isolado da variável a/c e da interação $a/c*\%adição$ para a viscosidade aparente determinada pelo modelo de Bingham. Já nas Figuras 53, 54 e 55, estão representados os efeitos isolados das variáveis $\%adição$ e a/c e da interação $a/c*\%adição$ para o índice de consistência determinada pelo modelo de Herschel-Bulkley.

Figura 51: Efeito isolado da variável relação a/c sobre a viscosidade aparente determinada pelo modelo de Bingham



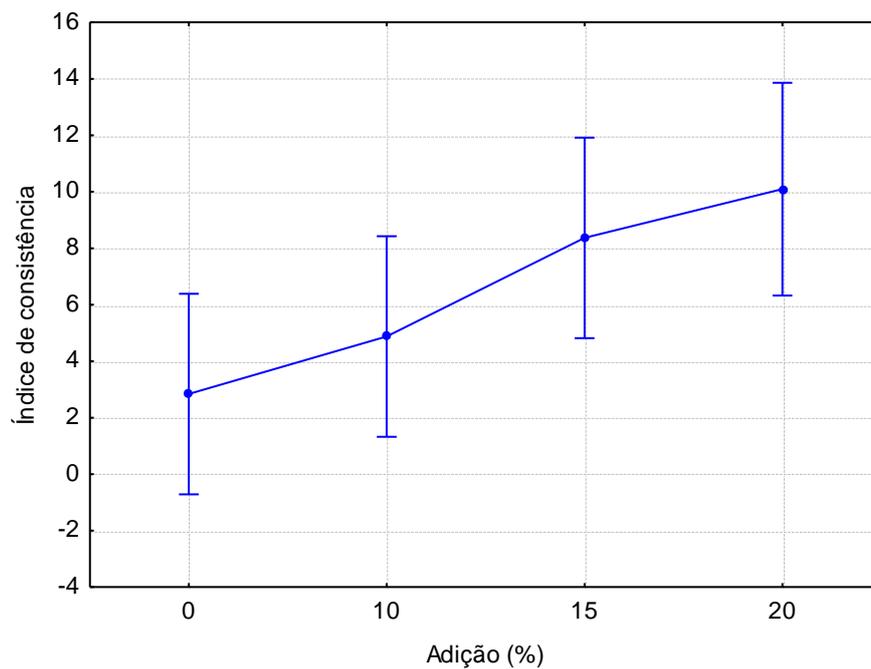
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 52: Efeito da interação entre a porcentagem de adição e a relação a/c viscosidade aparente obtida pelo modelo de Bingham



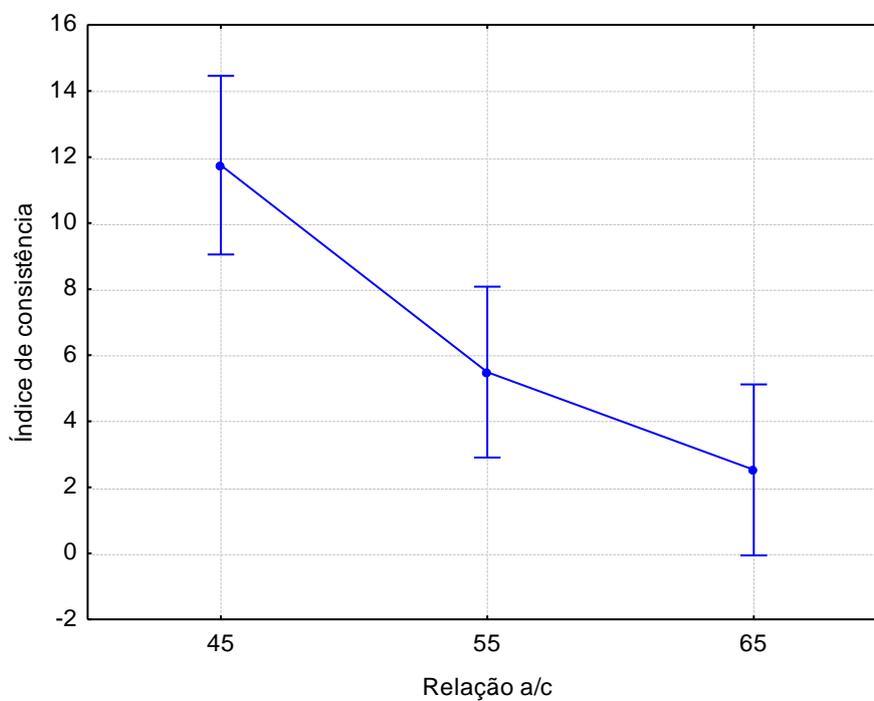
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 53: Efeito isolado da variável porcentagem de adição sobre o índice de consistência determinado pelo modelo de Herschel-Bulkley



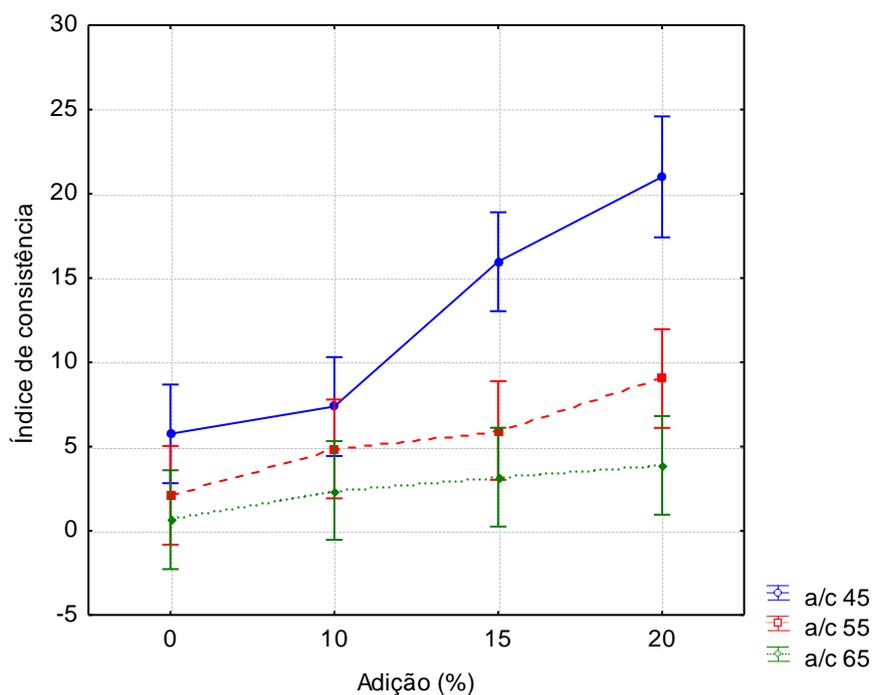
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 54: Efeito isolado da variável relação a/c sobre o índice de consistência determinado pelo modelo de Herschel-Bulkley



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 55: Efeito da interação entre a porcentagem de adição e a relação a/c no índice de consistência obtido pelo modelo de HB



Fonte: Acervo Pessoal

Inicialmente observa-se que a variável porcentagem de adição foi significativa apenas para o índice de consistência determinado pelo modelo de HB.

Analisando a Figura 53, nota-se que o índice de consistência cresce a medida que aumenta-se a porcentagem de adição de RBROTT na mistura. Isso já era esperado uma vez que, a adição de RBROTT provoca maior aglomeração das partículas e eleva as forças de interação entre as mesmas, fazendo com que a pasta fique mais consistente e, portanto, mais resistente ao escoamento.

Já a variável relação a/c foi significativa tanto para a viscosidade aparente quanto para o índice de consistência. Através das Figuras 51 e 54 observa-se comportamento semelhante ao da tensão de escoamento, a medida em que se aumenta a relação a/c há uma diminuição nos valores de viscosidade aparente e índice de consistência. Esse comportamento também era esperado, uma vez que a maior quantidade de água nas misturas promove uma maior fluidez, facilitando o escoamento.

Através das Figuras 52 e 55 é possível avaliar o efeito da interação entre as variáveis relação a/c e porcentagem de adição na viscosidade aparente e índice de consistência. Assim como para relação a/c, aqui também observa-se o mesmo comportamento observado para a tensão de escoamento. Com o aumento da adição de RBROTT na mistura há um aumento nos valores dos parâmetros avaliados, e com aumento na relação a/c, há diminuição dos valores.

Analisando-se a viscosidade aparente medida diretamente pelo modelo de Bingham, observa-se para relação a/c 0,45 que os traços T45,10, T45,15 e T45,20 tiveram aumento de 74,08%, 101,62% e 124,05%, respectivamente quando comparados ao traço TR45. Os traços com relação a/c 0,55, T55,10, T55,15 e T55,20 apresentaram crescimento de 90,37%, 88,84% e 109,85%, respectivamente se comparados ao traço referência. E para aqueles com relação a/c 65 as mesmas diferenças foram de 110,56%, 165,56% e 221,11%.

Em uma mesma análise feita para o índice de consistência medido pelo modelo de Herschel-Bulkley, nota-se que para relação a/c 0,45 os traços T45,10, T45,15 e T45,20 tiveram aumento de 28,17%, 177,67% e 153,51%, respectivamente quando comparados ao traço referência. Os traços com relação a/c 0,55, T55,10, T55,15 e T55,20 apresentaram crescimento de 130,79%, 182,69% e 329,08%, respectivamente quando comparados ao traço TR55. E para aqueles com relação a/c 65 as mesmas diferenças foram de 265,05%, 385,51% e 492,37%, respectivamente.

Observa-se que o T65,15 apresenta valor semelhante de viscosidade aparente ao encontrado para o TR55. Se comparados os valores do índice de consistência, além da semelhança observada anteriormente, nota-se que o valor para o T55,15 (5,95) é bem próximo ao encontrado para o TR45 (5,75), como também observado para tensão de escoamento.

4.2.2 Ensaio de varredura de deformação

Este ensaio foi realizado aplicando pequenas deformações nas amostras variando a amplitude de 10^{-5} a 10^{-1} , com frequência constante de 1 Hz e a partir desse ensaio foi possível traçar as curvas de módulo elástico x deformação em escala logarítmica.

Com os dados extraídos do ensaio foi determinada a deformação crítica que delimita a região viscoelástica do material e avaliou-se a influência da relação a/c e da porcentagem de adição de RBROTT no módulo elástico das pastas analisadas.

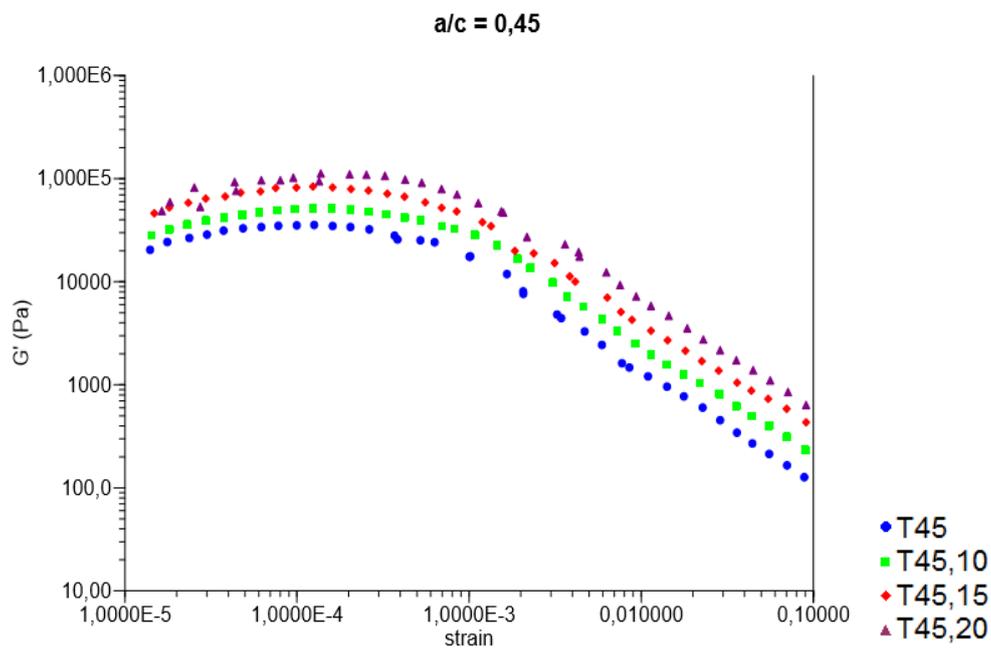
As Figuras 56, 57 e 58 mostram os gráficos de módulo elástico x deformação para as relações a/c 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente e a Tabela 19 traz todos os dados coletados a partir do ensaio de varredura de deformação.

Tabela 19: Deformação crítica e módulo elástico para todos os traços

Traço	Deformação crítica	G' (Pa)
TR45	1,60E-04	46230,00
TR55	1,63E-04	14763,33
TR65	1,58E-04	2011,33
T45,10	1,59E-04	53786,67
T55,10	1,59E-04	33326,67
T65,10	1,52E-04	9173,33
T45,15	1,64E-04	73696,67
T55,15	1,63E-04	56426,67
T65,15	1,22E-04	11732,00
T45,20	1,62E-04	95956,67
T55,20	1,33E-04	57213,33
T65,20	1,63E-04	27733,22

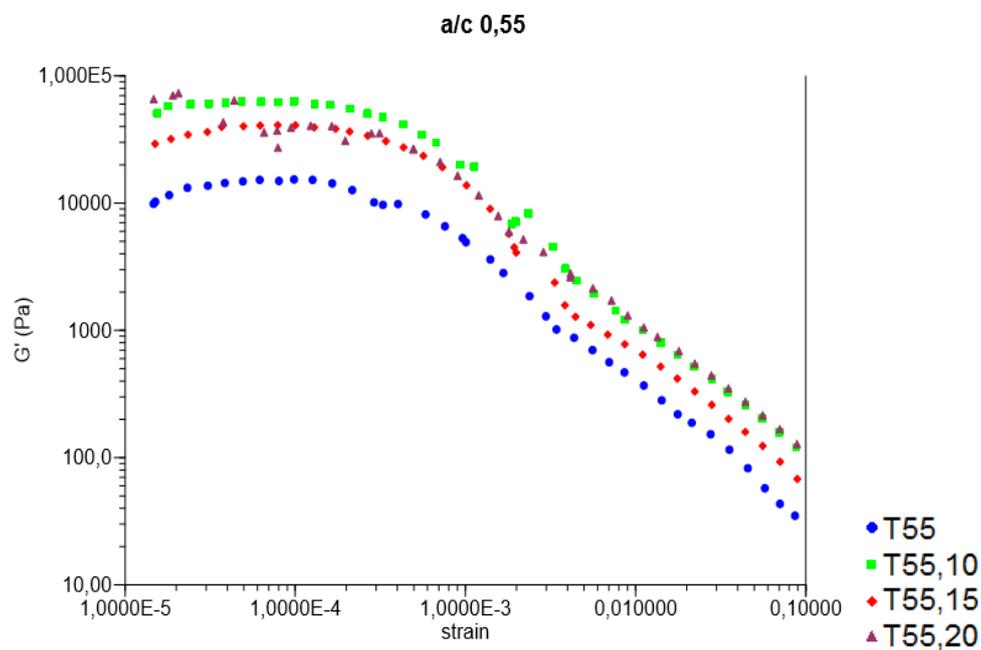
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 56: Curva de módulo elástico x deformação para relação a/c 0,45



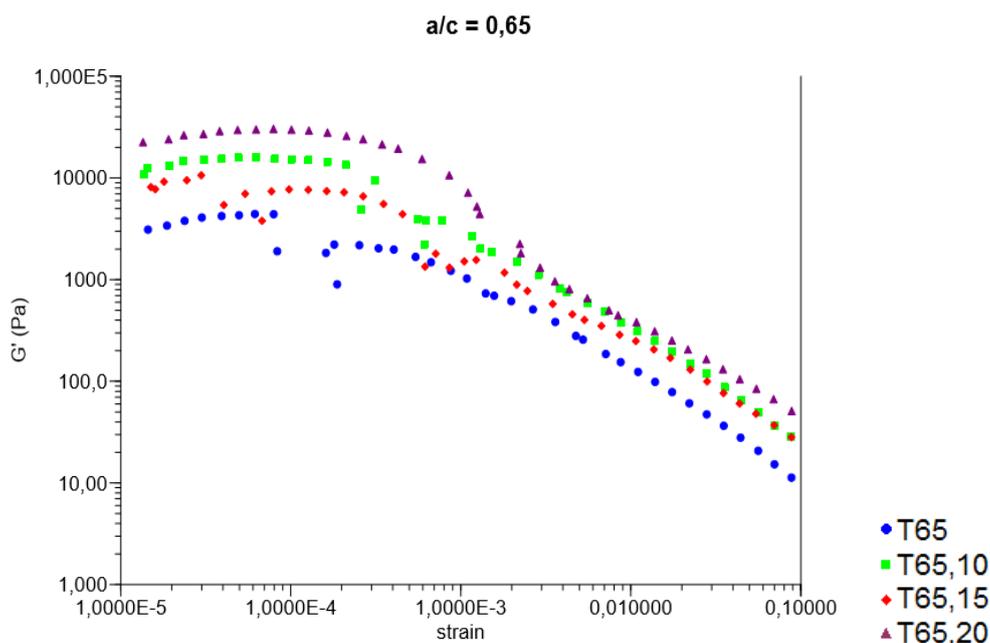
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 57: Curva de módulo elástico x deformação para relação a/c 0,55



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 58: Curva de módulo elástico x deformação para relação a/c 0,65



Fonte: Acervo Pessoal

Observa-se, inicialmente, que todos os traços apresentaram comportamento gráfico semelhante, em que, até determinado valor de deformação, o módulo elástico permaneceu praticamente constante e após a aplicação de uma deformação crítica houve uma diminuição nos valores de módulo elástico conforme aumentava a deformação. Resultados semelhantes em pastas cimentícias foram obtidos por Nachbaur *et al.*, (2001), Baldino *et al.*, (2014), Sato (2015) e Schultz e Struble (1993).

A região anterior a deformação crítica é chamada de região viscoelástica linear do material, em que a deformação aplicada não altera a estrutura do material, porém quando a deformação atinge um valor crítico a estrutura se rompe (NACHBAUR *et al.*, 2001).

Analisando o comportamento das pastas com relação à adição de RBROTT, nota-se que com o aumento na porcentagem de adição de RBROTT houve aumento no módulo elástico para todas as pastas analisadas.

Esse fato deve-se, possivelmente, à elevada finura do resíduo, que preencheu os poros da pasta, aumentando a viscosidade. Dessa forma, há uma maior

resistência à deformação, pois ocorre uma maior interação entre as partículas quando há aumento na porcentagem de RBROTT.

Frente à relação a/c , observa-se que houve uma diminuição do módulo elástico quando aumentou-se a relação a/c . Este fato se deve, possivelmente, ao maior distanciamento entre as partículas promovido pelo aumento da quantidade de água, deixando a pasta menos viscosa e diminuindo a resistência à deformação.

Em uma análise dos dados da Tabela 19, percebe-se que praticamente não houve alteração na deformação crítica entre os traços analisados, independente da adição de RBROTT ou da relação a/c .

Além disso, observa-se que todos os valores de deformação crítica possuem a mesma ordem de grandeza que é de 10^{-4} e segundo Nachbaur *et al.*, (2001), valores pequenos de deformação crítica estão associados a elevadas forças entre as partículas da mistura.

O mesmo comportamento não é observado para o módulo elástico, visto que os valores aumentaram com o aumento da adição de RBROTT para uma mesma relação a/c e diminuíram quando manteve-se a mesma porcentagem de adição de RBROTT e aumentou-se a relação a/c .

Foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA) nos resultados encontrados para o módulo elástico na deformação crítica, afim de avaliar as variações com maior rigor científico. A Tabela 20 apresenta os resultados da ANOVA.

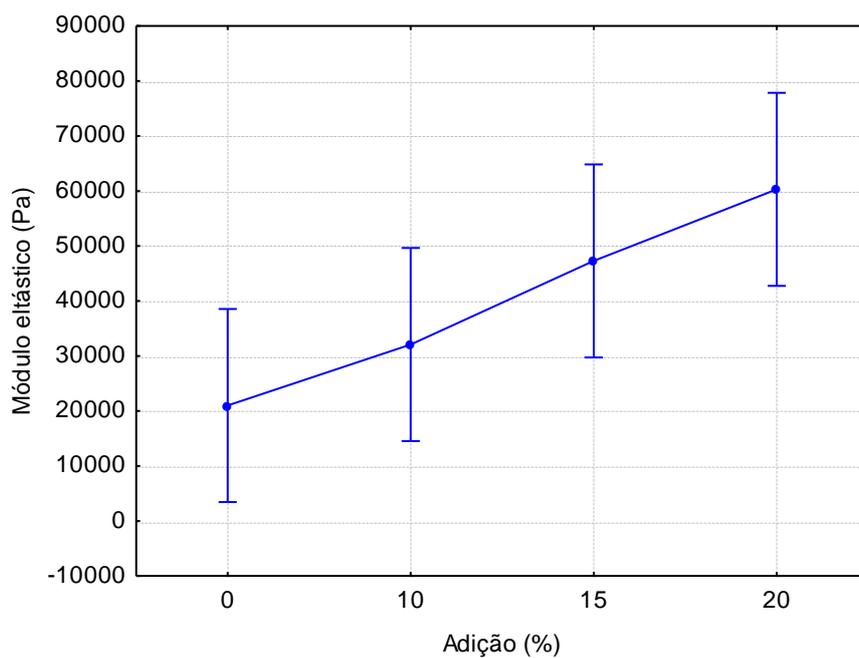
Tabela 20: Resultados da ANOVA para o módulo elástico

Fatores	p-valor	Significância
% adição	0,016056	Significativo
a/c	0,00000	Significativo
%adição* a/c	0,059549	Não-Significativo

Fonte: Acervo pessoal

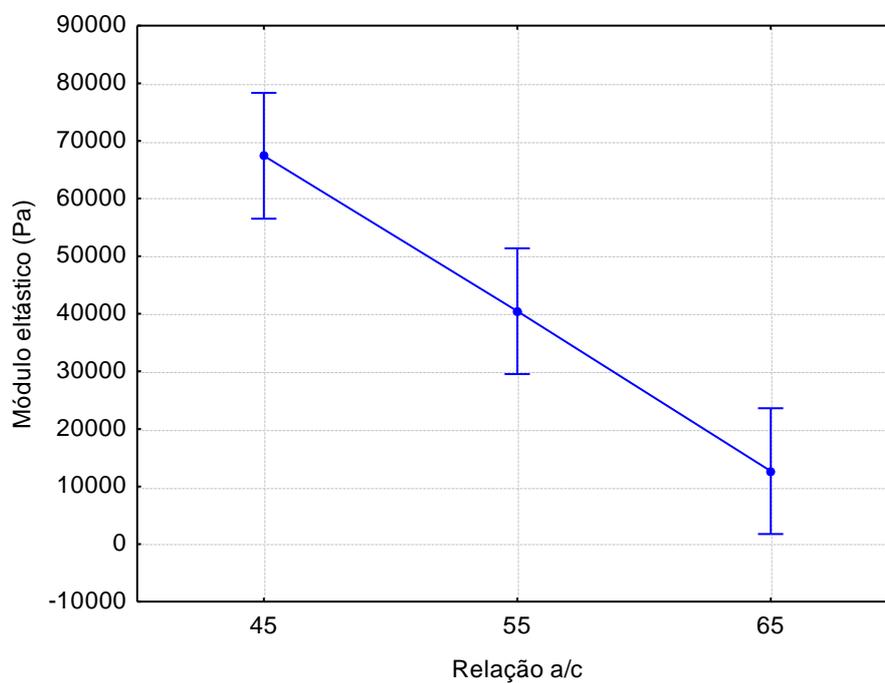
Observa-se que, isoladamente, os fatores relação a/c e porcentagem de adição de RBROTT foram significativos, porém a interação entre os mesmos não foi considerada significativa. Nas Figuras 59 e 60 são apresentados os gráficos do efeito isolado das variáveis %adição e a/c no módulo elástico.

Figura 59: Efeito isolado da variável porcentagem de adição sobre o módulo elástico



Fonte: Acervo pessoal

Figura 60: Efeito isolado da variável relação a/c sobre o módulo elástico



Fonte: Acervo pessoal

Nota-se que com o aumento da porcentagem de adição houve aumento no módulo elástico nas pastas analisadas (Figura 59), o que ocorreu, possivelmente, devido a maior aglomeração das partículas causada pela adição do resíduo, que deixou as pastas mais consistentes, consequentemente aumentando a resistência à deformação.

No entanto, com aumento da relação a/c observa-se uma diminuição no módulo elástico (Figura 60) das pastas cimentícias. Esse comportamento era esperado, visto que a maior quantidade de água nas misturas aumenta a fluidez, deixando-as menos resistentes à deformação.

Através dos dados da Tabela 19 verifica-se que para os traços com relação a/c 0,45 os traços T45,10, T45,15 e T45,20 apresentaram crescimento de 16,35%, 59,41% e 107,56%, respectivamente quando comparados ao traço TR45. Para relação a/c 0,55 os crescimentos foram de 125,74%, 282,21% e 287,54%, respectivamente e para relação a/c 0,65 os percentuais encontrados foram de 356,08%, 483,30% e 1278,85%.

Além disso, observa-se que o T55,15 apresentou valor de módulo elástico (56426,67 Pa), próximo ao T45,10 (53786,67 Pa) e maior que o TR45 (46230 Pa). Assim como o T65,20 (27733,22 Pa) apresentou valor maior que o TR55 (14763,33 Pa).

Esses resultados mostram que é possível atingir valores iguais ou até maiores do módulo elástico obtido na deformação crítica em pastas com menores quantidades de cimento (que tenderiam a ter menor resistência à deformação) adicionando-se o RBROTT à mistura, ou seja, o RBROTT atuou aumentando a resistência à deformação das pastas cimentícias.

4.3 Ensaio nas argamassas

Foram produzidos 12 traços de argamassa variando a relação a/c (0,45, 0,55 e 0,65) e a porcentagem de adição de RBROTT (0%, 10%, 15% e 20%), de forma a avaliar a influência desses parâmetros em matrizes cimentícias.

Além disso, devido ao potencial pozolânico do RBROTT, as argamassas foram analisadas em três idades distintas (28, 63 e 91 dias). Foram feitos ensaios tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, afim de avaliar a massa

específica, índice de consistência, resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico.

4.3.1 Estado fresco

Logo após a produção todas as argamassas foram ensaiadas para determinação da massa específica NBR 13278 (ABNT, 2005) e do índice de consistência NBR 13276 (ABNT, 2005) e os valores encontrados para todos os traços analisados encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21: Massa específica e índice de consistência para todos os traços

Traço	Massa específica (g/cm ³)	Índice de consistência (mm)
TR45	2,180	253
TR55	2,167	308
TR65	2,150	362
T45,10	2,194	229
T55,10	2,169	304
T65,10	2,162	350
T45,15	2,219	222
T55,15	2,179	300
T65,15	2,162	329
T45,20	2,228	194
T55,20	2,179	287
T65,20	2,165	321

Fonte: Acervo pessoal

4.3.1.1 Massa específica

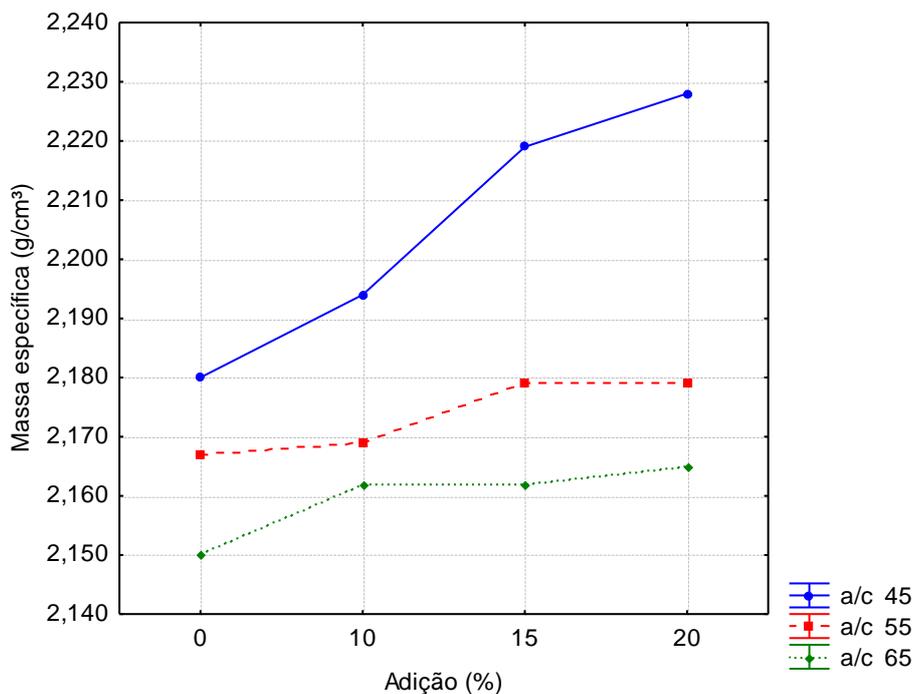
De forma a facilitar a compreensão dos dados expostos na Tabela 21, foi elaborado o gráfico de massa específica relacionada à porcentagem de adição de RBROTT e a relação a/c, exposto na Figura 61.

Observa-se que para uma mesma relação a/c, houve aumento dos valores de massa específica com o aumento da porcentagem de adição de RBROTT e que mantendo constante a porcentagem de adição, os valores diminuem conforme cresce a relação a/c.

Comportamento semelhante foi observado na análise das propriedades reológicas de tensão de escoamento, viscosidade aparente, índice de consistência e módulo elástico.

Esse comportamento era esperado, visto que a massa específica das argamassas varia de acordo com a massa específica de seus componentes (CARASEK, 2007). Neste caso, como o resíduo foi utilizado como adição esperava-se que a massa específica das argamassas aumentasse com o aumento da quantidade de RBROTT, para uma mesma relação a/c.

Figura 61: Resultados de massa específica com relação a porcentagem de adição de RBROTT



Fonte: Acervo pessoal

Para relação a/c 0,65 nota-se que a argamassa com 15% de adição apresentou valor de massa específica igual ao da argamassa com 10% de adição (2,162 g/cm³), assim como para relação a/c 0,55 a argamassa com 20% de adição apresentou valor igual ao da argamassa com 15% de adição (2,179 g/cm³).

Isso pode ser explicado devido a quantidade maior de água nas misturas e a pequena variação da quantidade de adição (5%) que não foi suficiente para preencher os poros das argamassas.

Analisando a influência da relação a/c sobre uma mesma porcentagem de adição, nota-se que há uma diminuição da massa específica com o aumento da relação a/c, visto que a maior quantidade de água provoca um afastamento das partículas.

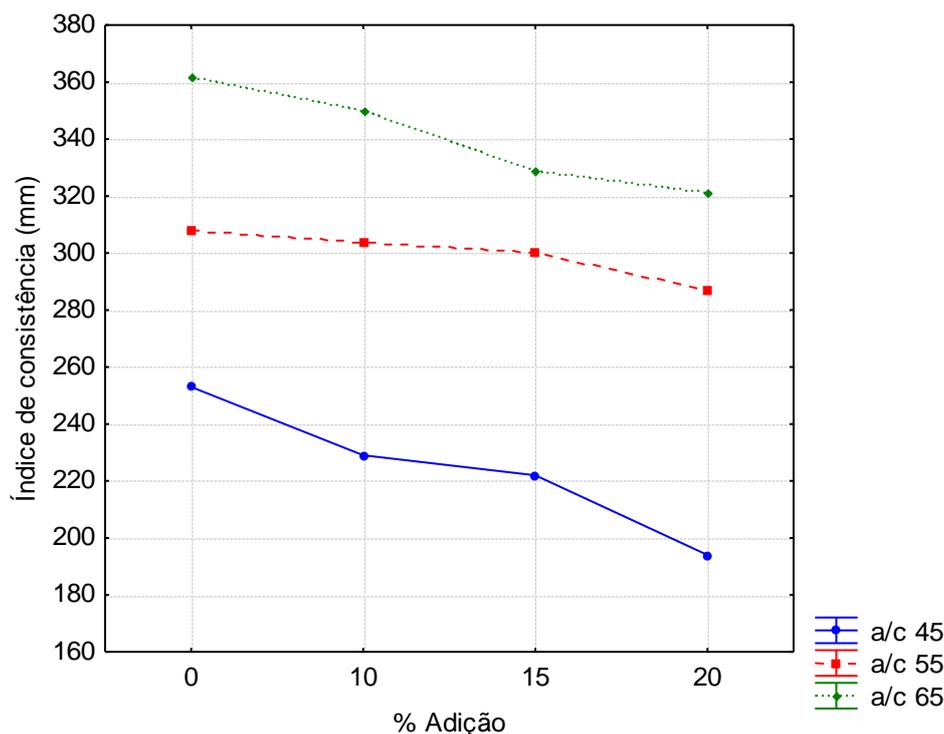
O T45,10 apresentou massa específica 1,14% e 1,50% maior que o T55,10 e o T65,10 respectivamente, assim como o T45,15 apresentou crescimento de 1,82% e 2,66% em relação ao T55,15 e ao T65,15 e o T45,20 obteve valores 2,22% e 2,92% maiores que o T55,20 e o T65,20.

A maior diferença é observada para 20% de adição de RBROTT em que a argamassa com relação a/c 0,45 apresentou massa específica de 2,228 g/cm³ e a argamassa com relação a/c 0,65 teve 2,165 g/cm³ de massa específica.

4.3.1.2 Índice de consistência

A Figura 62 traz o gráfico elaborado para melhor visualização dos dados da Tabela 21 com relação ao índice de consistência, a porcentagem de adição de RBROTT e a relação a/c.

Figura 62: Resultados de índice de consistência com relação à porcentagem de adição de RBROTT para as diferentes relações a/c



Fonte: Acervo pessoal

Cabe salientar que a determinação de índice de consistência é uma medida indireta da reologia das argamassas. Esse método apresenta a vantagem de ser dinâmico, considerando tanto a viscosidade do sistema como a tensão de escoamento, contudo não dissocia a contribuição individual desses parâmetros.

Além disso, avalia qualitativamente a tendência à segregação de fases no sistema, em decorrência da aplicação de energia (CARDOSO *et al.*, 2008).

Observando a Figura 62, nota-se que para a mesma relação a/c, há uma diminuição dos valores com o aumento da porcentagem de adição de RBROTT e para a mesma porcentagem de adição os valores crescem com o aumento da relação a/c.

O índice de consistência é uma propriedade ligada à fluidez da argamassa, pois quanto mais fluida (ou menos consistente), maior será o valor do índice de consistência ou quanto menos fluida (ou mais consistente), menor será o valor. Assim, o resultado encontrado enquadra-se dentro do esperado para os parâmetros analisados e assemelha-se aos resultados encontrados na análise das propriedades reológicas.

Aumentando-se a quantidade de resíduo adicionado à mistura, mantendo-se fixa a relação a/c, há um aumento na consistência da argamassa possivelmente devido à elevada finura do RBROTT, que colmata os poros preenchendo os vazios intergranulares e aumentando as forças de atração entre as partículas, deixando a argamassa mais coesa.

Dessa forma ocorre uma maior interação entre as partículas da argamassa, o que a torna mais coesa e resistente à deformação, aumentando a consistência. Comportamento semelhante foi encontrado por Santos *et al.*, (2013) quando avaliaram o índice de consistência de argamassas com 5%, 10% e 15% de adição de RBRO.

Para relação a/c 0,45 há uma redução de 37,08% quando comparados os valores de índice de consistência para o traço referência (0% de adição) e o traço com 20% de adição de RBROTT. Para relações a/c 0,55 e 0,65 essa diferença é de aproximadamente 6,92% e 11,24%, respectivamente.

4.3.2 Estado endurecido

Feita a verificação das argamassas no estado fresco, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 5 x10 cm para determinação das propriedades de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico.

Os ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico foram realizados seguindo as recomendações das NBR 5739 (ABNT, 2007) e NBR 15630 (ABNT, 2008), respectivamente. Os resultados médios encontrados para as duas propriedades estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Valores médios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico para todos os traços

Traço	Resistência à Compressão (MPa)			Módulo de elasticidade (MPa)		
	28 dias	63 dias	91 dias	28 dias	63 dias	91 dias
TR45	46,81	52,04	54,98	40484,13	40616,10	41401,06
TR55	46,75	51,44	54,09	39182,43	38714,26	38939,61
TR65	41,73	43,98	47,67	36310,78	36137,57	36281,01
T45,10	59,99	65,85	66,66	44392,72	44021,51	44330,87
T55,10	54,83	56,92	63,27	40254,01	40168,73	40357,52
T65,10	40,47	47,24	48,35	35139,38	36360,31	36622,24
T45,15	60,89	66,87	70,14	44487,17	44487,17	44233,60
T55,15	55,85	63,93	66,78	40631,93	40629,58	40594,53
T65,15	44,44	48,35	53,22	36840,19	36875,19	36694,96
T45,20	62,52	72,8	73,96	44288,08	43857,99	44264,33
T55,20	57,48	63,06	66,79	41796,83	39840,02	40847,75
T65,20	44,83	54,4	55,56	36951,90	36056,69	36325,47

Fonte: Acervo pessoal

Para avaliar com maior rigor científico a influência dos fatores relação a/c, idade e porcentagem de adição de RBROTT no comportamento mecânico das argamassas foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Resultados da ANOVA para a resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico

Fatores	Resistência à compressão axial		Módulo de elasticidade dinâmico	
	p-valor	Significância	p-valor	Significância
%adição	0,00000	Significativo	0,029675	Significativo
idade	0,00002	Significativo	0,497878	Não-significativo
a/c	0,00000	Significativo	0,00000	Significativo
%adição*idade	0,834025	Não-significativo	0,977735	Não-significativo
%adição*a/c	0,00010	Significativo	0,00000	Significativo
idade*a/c	0,907896	Não-significativo	0,902165	Não-significativo
%adição*idade*a/c	0,297298	Não-significativo	0,688921	Não-significativo

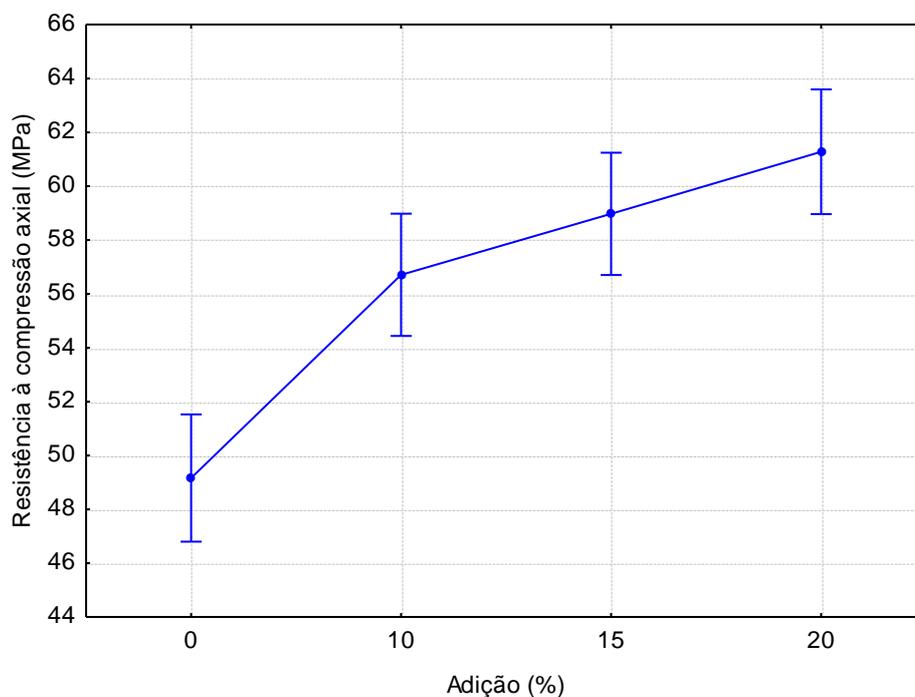
Fonte: Acervo pessoal

4.3.2.1 Resistência à compressão axial

Como mostra a Tabela 23 todos os fatores isoladamente e a interação dupla %adição*a/c tiveram influência significativa, enquanto a interação tripla %adição*idade*a/c e as interações duplas idade*a/c e %adição*idade não influenciaram significativamente a resistência à compressão axial das argamassas.

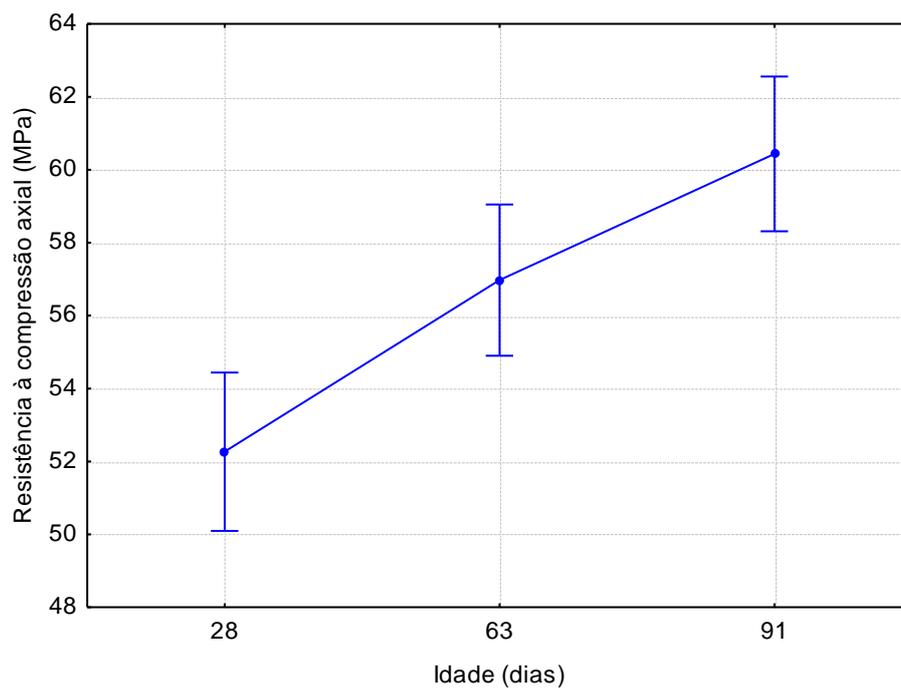
As Figuras 63, 64, 65 e 66 apresentam os gráficos do efeito isolado das variáveis porcentagem de adição, idade e relação a/c e o efeito da interação entre porcentagem de adição e relação a/c sobre a resistência à compressão axial, respectivamente.

Figura 63: Efeito isolado da variável porcentagem de adição sobre a resistência à compressão axial



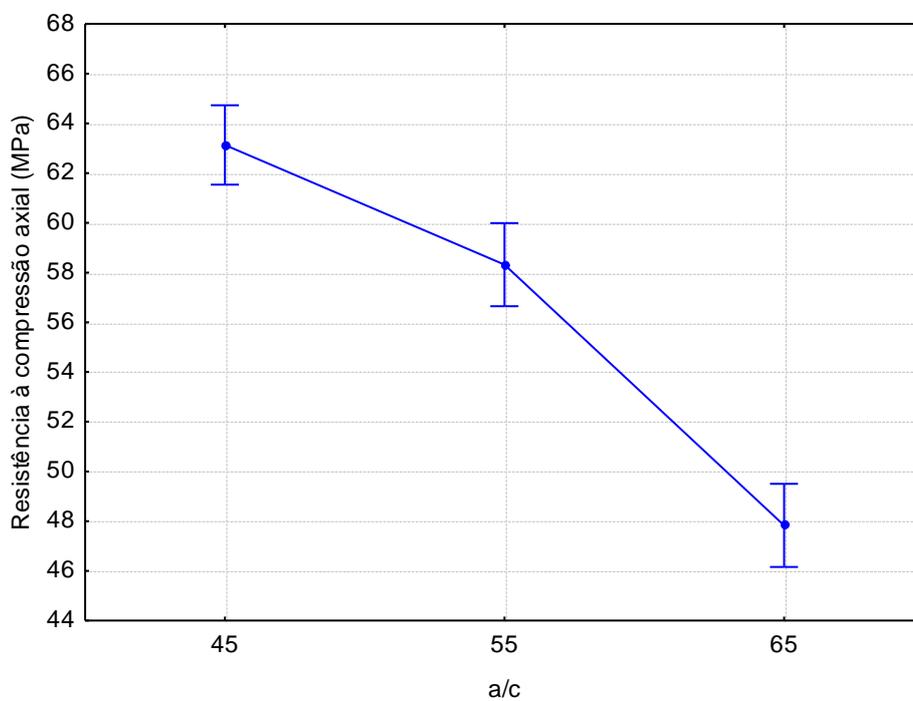
Fonte: Acervo pessoal

Figura 64: Efeito isolado da variável idade sobre a resistência à compressão axial



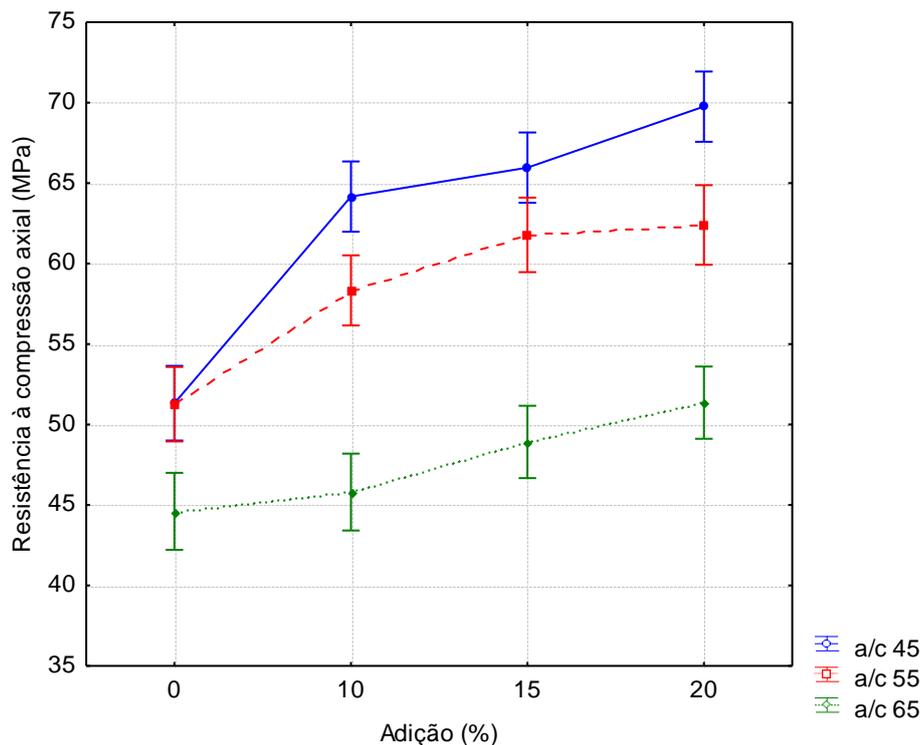
Fonte: Acervo pessoal

Figura 65: Efeito isolado da variável relação a/c sobre a resistência à compressão axial



Fonte: Acervo pessoal

Figura 66: Efeito da interação entre porcentagem de adição de RBROTT e relação a/c sobre a resistência à compressão axial



Fonte: Acervo pessoal

Observa-se através das Figuras 63, 64 e 65 que houve aumento da resistência à compressão axial com o aumento tanto da idade quanto da porcentagem de adição de RBROTT. Já com o aumento da relação a/c, nota-se que há uma diminuição na resistência à compressão axial.

Em uma análise inicial do gráfico da Figura 66, nota-se que a adição de RBROTT de fato provocou um aumento na resistência à compressão axial das argamassas, uma vez que para todas as relações a/c, com o aumento na porcentagem de adição de RBROTT, houve crescimento na resistência mecânica. Apenas para as argamassas de referência não houve diferença entre a resistência à compressão axial para as relações a/c 0,55 e 0,45.

Isso deve-se a uma possível ação pozolânica do RBROTT, que promoveu uma diminuição na porosidade devido à reação entre a pozolana e os álcalis gerados na hidratação do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) que preencheram parte dos poros da matriz cimentícia e, conseqüentemente, gerou ganho de resistência mecânica.

Nota-se também na Figura 66 que o aumento na relação a/c provocou uma diminuição da resistência à compressão axial das argamassas, como era esperado, pois a maior quantidade de água na mistura a deixa mais porosa, diminuindo a resistência à compressão axial. Comportamento semelhante foi observado em concretos avaliados com diferentes relações a/c nos trabalhos de Mittri (2016) e Soares (2014).

Os traços T45,10, T45,15 E T45,20 foram os que apresentaram maiores valores médios de resistência à compressão axial (considerando todas as idades) para todas porcentagens de adição de RBROTT, 64,17 MPa, 65,97 MPa e 69,76 MPa, respectivamente. Esse valores são 9,99%, 6,08% e 11,71%, respectivamente maiores que os traços T55,10, T55,15 E T55,20 e 41,49%, 35,55% e 35,21% maiores que os traços T65,10, T65,15 e T65,20.

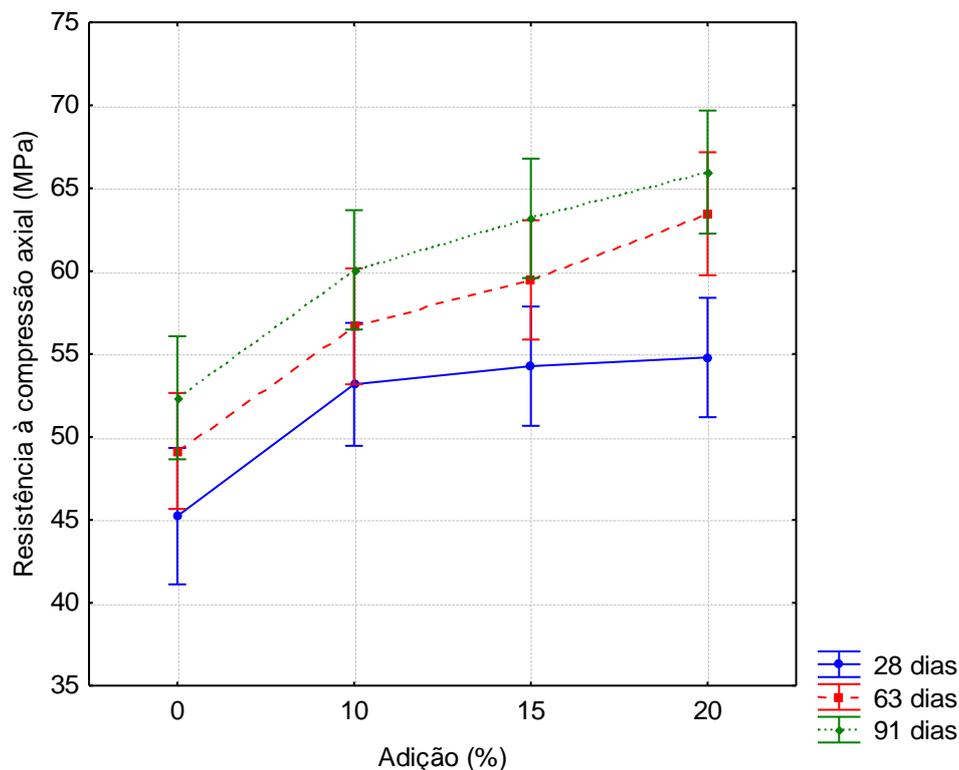
Com relação ao aumento na porcentagem de adição de RBROTT, houve maior influência na resistência à compressão axial para relação a/c 0,45 e menor influência para relação a/c 0,65. Os traços T45,10, T45,15 e T45,20 apresentaram crescimento de 25,14%, 28,65% e 36,04%, respectivamente maiores que o traço referência. Para os traços com relação a/c 0,55 os percentuais de crescimento foram de 14,92%, 22,50% e 23,02%. E para os traços com relação a/c 0,65 foram de 2,01%, 9,47% e 16,05%.

Porém, o T55,10 atingiu valores maiores de resistência à compressão axial do que o TR45 (58,34 MPa e 51,28MPa). Já o T65,20 conseguiu atingir 51,20 MPa de resistência à compressão axial, valor semelhante e até um pouco maior ao encontrado para aos traços TR45 e TR55, 51,28 MPa e 50,76 MPa, respectivamente.

Este fato mostra que foi possível aumentar a relação a/c e manter, ou até mesmo melhorar a resistência à compressão axial adicionando RBROTT à mistura, possivelmente devido ao seu caráter pozolânico.

A Figura 67 apresenta o gráfico dos resultados obtidos através da interação dos fatores porcentagem de adição de RBROTT e idade, mesmo esta não sendo significativa, para fins de análise.

Figura 67: Efeito da interação entre porcentagem de adição de RBROTT e idade sobre a resistência à compressão axial



Fonte: Acervo pessoal

Observa-se inicialmente que com o aumento da idade ocorreu um ganho de resistência à compressão axial para todas as porcentagens de adição de RBROTT. Malta *et al.*, (2013) também observaram ganho de resistência com o avanço da idade em argamassas contendo 5%, 10% e 15% de adição de RBRO sem tratamento térmico.

Esse também era um comportamento esperado, visto que o cimento está em constante hidratação e devido a isso ganha resistência mecânica com a idade, apesar do CP V ARI ser um tipo de cimento que atinge a maior parcela da resistência à compressão axial nas primeiras idades (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Entretanto, observa-se que mesmo para 28 dias houve ganho de resistência mecânica com o aumento da porcentagem de adição de RBROTT, principalmente com 10% de adição, que teve resistência à compressão 14,79% maior que o referênci

Entre as porcentagens de adição de RBROTT o ganho de resistência à compressão foi mais intensificado para a porcentagem de adição de 20%. Quando compara-se os valores de resistência à compressão para 28 e 91 dias, nota-se que houve um crescimento de 19,11%. Comparando-se as mesmas idades para as porcentagens de 10% e 15% o crescimento foi de 14,80% e 17,98%, respectivamente.

Esse fato deve-se possivelmente a elevada quantidade de resíduo adicionado a mistura, que devido à sua possível ação pozolânica colmatou mais intensificamente os poros das argamassas, proporcionando maiores ganhos de resistência mecânica com maiores porcentagens de adição e densificando a estrutura interna do material.

Quando compara-se as argamassas com 0% de adição aos 91 dias com as argamassas com 10% de adição aos 28 dias, observa-se que as duas estão no mesmo patamar, apresentando valores médios de resistência mecânica de 52,25 MPa e 51,76 MPa. Ou seja, a adição de 10% RBROTT provocou um ganho de resistência à compressão axial aos 28 dias comparável a evolução de uma argamassa sem adição até os 91 dias.

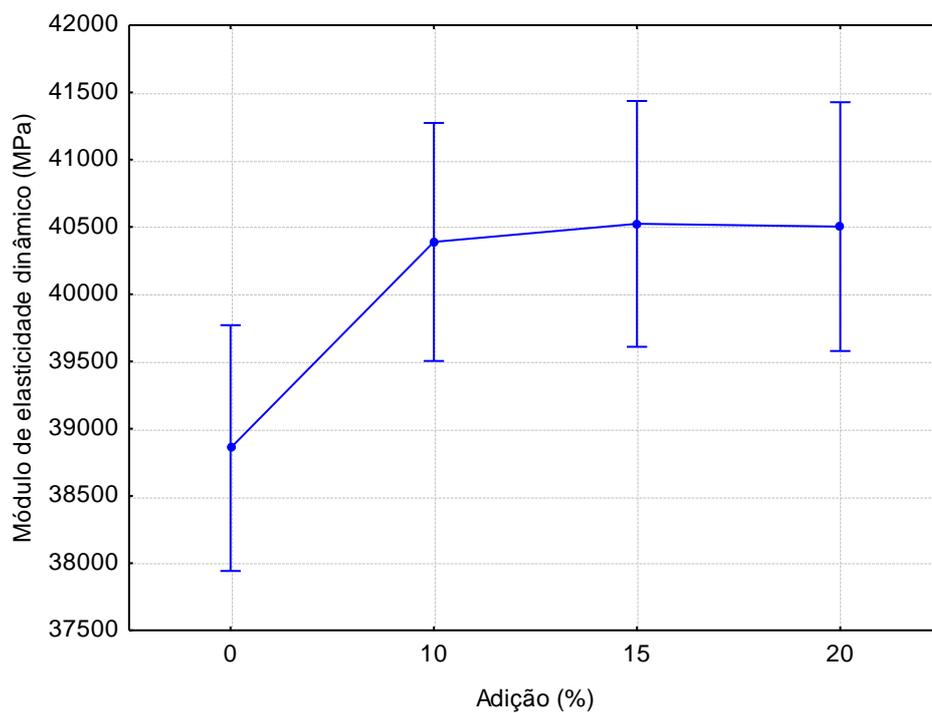
Já para 15% e 20% de adição aos 28 dias, nota-se que ambas apresentam valores maiores de resistência à compressão axial (53,72 MPa e 54,84 MPa), quando comparadas as argamassas com 0% de adição aos 91 dias, indicando que de fato há um efeito físico de preenchimento dos poros da argamassa, evidenciado para maiores valores de porcentagem de adição.

4.3.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Como mostra a Tabela 23 os fatores %adição e relação a/c isoladamente e a interação dupla %adição*a/c tiveram influência significativa, enquanto a interação tripla %adição*idade*a/c, as interações duplas idade*a/c e %adição*idade e o fator idade isoladamente não influenciaram significativamente o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas.

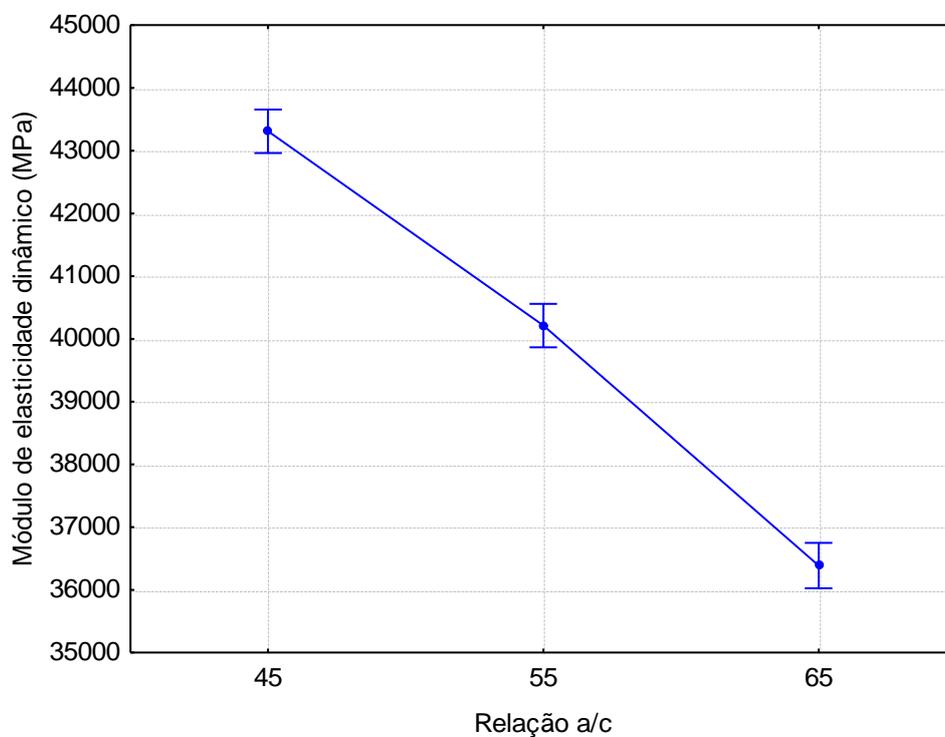
As Figuras 68, 69 e 70 apresentam o gráficos do efeito isolado das variáveis porcentagem de adição e relação a/c e da interação %adição*a/c para o módulo de elasticidade dinâmico.

Figura 68: Efeito isolado da variável porcentagem de adição no módulo de elasticidade dinâmico



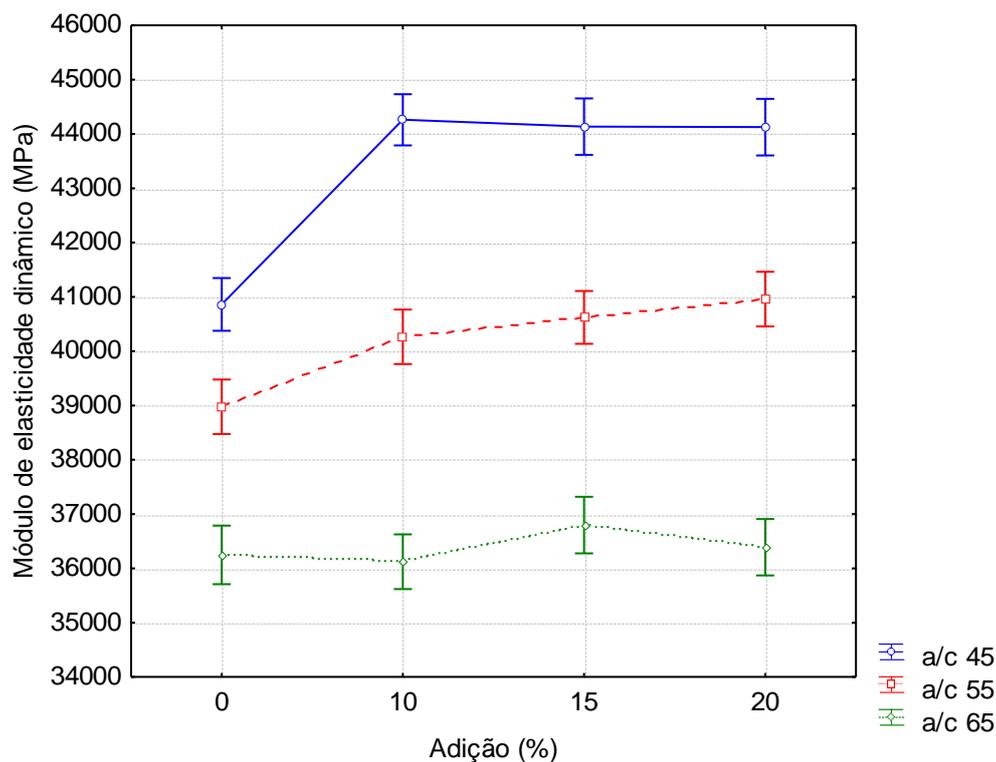
Fonte: Acervo pessoal

Figura 69: Efeito isolado da relação a/c no módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Acervo pessoal

Figura 70: Efeito da interação entre porcentagem de adição de RBROTT e relação a/c sobre o módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Acervo pessoal

Os resultados para o módulo de elasticidade dinâmico não apresentaram a mesma regularidade dos dados obtidos para resistência à compressão axial, no que se refere à ocorrência de uma ordem aproximada de argamassas com maiores e menores resultados, este fato também observado por Uliana (2014).

Através da Figura 68, nota-se que houve um aumento no módulo de elasticidade dinâmico com aumento da porcentagem de adição de RBROTT até 10%. A partir daí, o valor do módulo de elasticidade permaneceu praticamente constante, independente do aumento na porcentagem de adição do resíduo.

Observa-se entretanto, através das Figuras 69 e 70, que para uma mesma porcentagem de adição de RBROTT houve uma diminuição no módulo de elasticidade com o aumento da relação a/c, assim como ocorreu para a resistência à compressão axial.

Isso se deve, possivelmente, a uma maior porosidade da matriz provocada pela maior quantidade de água nas misturas, indicando que as argamassas com maiores quantidade de água ficaram mais flexíveis à deformação, enquanto as argamassas com menor quantidade de água apresentaram um comportamento de maior rigidez da matriz.

Os traços TR45, T45,10, T45,15 e T45,20 apresentaram valores de módulo de elasticidade dinâmico 12,67%, 22,77%, 20,65% e 21,11%, respectivamente maiores que os traços TR65, T65,10, T65,15 e T65,20 evidenciando a significância do fator relação a/c nos resultados encontrados.

Para relação a/c 0,45 nota-se um aumento de 8,36% entre o traço referência e o T45,10, porém com o aumento da adição de RBROTT o módulo de elasticidade permaneceu praticamente constante.

Já para relação a/c 0,55 observa-se que a medida que cresce a porcentagem de adição há um aumento no módulo de elasticidade. Os traços T55,10, T55,15 e T55,20 apresentaram crescimento de 3,38%, 4,30% e 4,83%, respectivamente quando comparados com o traço referência.

Esse fato deve-se, possivelmente, à ação pozolânica do RBROTT, que colmatou os poros das argamassas densificando a matriz, como observado por Vazzoler (2015). Apolinário (2014) observou comportamento semelhante em argamassas com adição de 5%, 10% e 15% de resíduo do corte de mármore e granito em argamassas.

As argamassas com relação a/c 0,65 não apresentaram comportamento semelhante ao das argamassas com relação a/c 0,45 e 0,55, uma vez que os traços T65,10 e T65,20 apresentaram valores menores que os traços TR65 e T65,15, respectivamente.

No entanto, observa-se que apesar dessa diferença os valores permaneceram praticamente constantes para todas as porcentagens de adição de RBROTT (36281,01 MPa, 36040,65 MPa, 36803,45 MPa e 36444,69 MPa).

4.4 Correlação entre as propriedades reológicas das pastas cimentícias e as propriedades das argamassas

Segundo Banfill (2006) a reologia é uma ferramenta importante na caracterização de pastas, argamassas e concretos no estado fresco e no entendimento do seu comportamento prático.

Banfill (2006) e Ferraris e Gaidis (1992) afirmam que é improvável que sem propriedades satisfatórias no estado fresco as propriedades desejadas no estado endurecido sejam alcançadas.

Dessa forma, como visto durante este trabalho, diversos autores têm estudado o comportamento reológico de pastas cimentícias com o intuito de melhor entender o comportamento de argamassas e concretos no estado fresco, além de ser uma ferramenta que pode fornecer informações importantes a respeito dos propriedades no estado endurecido.

Neste trabalho foram realizadas análises reológicas de pastas cimentícias e de propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas com os mesmos proporcionamentos. Assim, foram realizadas análises de forma a verificar a correlação entre os parâmetros reológicos e as propriedades das argamassas.

4.4.1 Correlação entre a tensão de escoamento das pastas cimentícias e o índice de consistência das argamassas

A tensão de escoamento pode ser definida como a mínima tensão aplicada a um fluido necessária para iniciar o escoamento (BETIOLLI, 2007; CASTRO; 207; HAN 2014). Já a consistência pode ser definida como a maior ou menor capacidade da argamassa resistir à deformações sob aplicação de cargas (CARASEK, 2007).

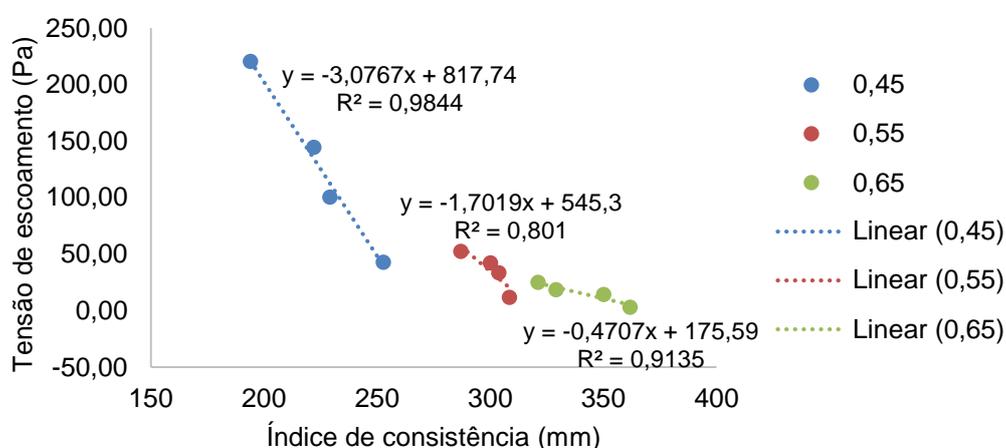
Silva *et al.*, (2005) afirmam que o espalhamento da argamassa (no ensaio de índice de consistência) está relacionado com a resistência interna a deformação que a argamassa apresenta, ou seja, quanto mais resistência à deformação, menor vai ser o espalhamento na mesa.

As duas propriedades são influenciadas pela fluidez do material. Foi observado nos resultados discutidos anteriormente que quanto mais fluida a pasta (maior relação a/c) menores foram os valores de tensão de escoamento.

Comportamento semelhante foi observado para as argamassas, em que quanto maior a relação a/c, maior era o índice de consistência, ou seja, menos consistente.

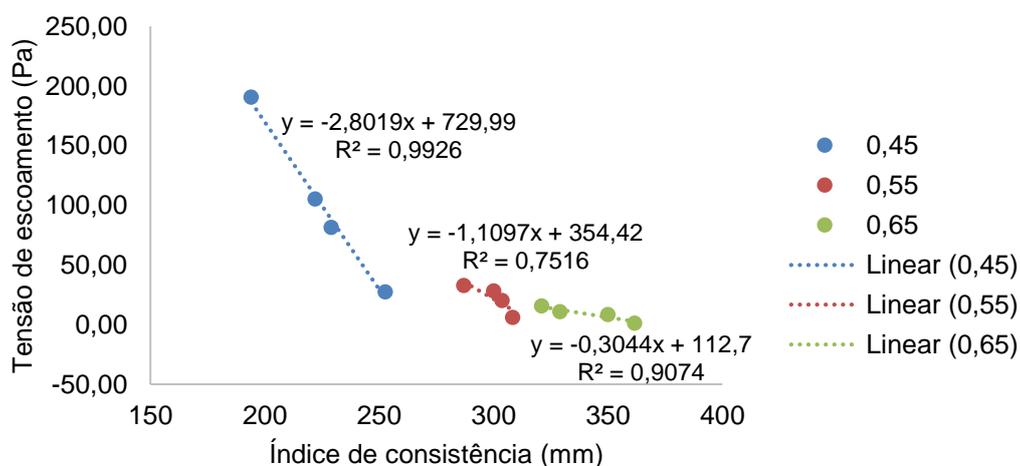
Portanto, foi feita uma análise conjunta das duas propriedades de forma a verificar a correlação entre os valores encontrados, foram utilizados os valores de tensão de escoamento determinados pelo modelo de Bingham e pelo modelo de HB. Os resultados encontram-se nas Figuras 71 e 72.

Figura 71: Correlação entre a tensão de escoamento obtida pelo modelo de Bingham e o índice de consistência das argamassas



Fonte: Acervo pessoal

Figura 72: Correlação entre a tensão de escoamento obtida pelo modelo de Herschel-Bulkley e o índice de consistência das argamassas



Fonte: Acervo pessoal

A análise foi realizada através de uma função linear e é possível observar uma correlação forte entre os parâmetros tensão de escoamento e índice de consistência, para os dois modelos, como era esperado.

Para a tensão de escoamento obtida por Bingham os coeficientes de determinação (R^2) foram de 0,9844, 0,801 e 0,9135 para as relações a/c 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente.

Para a tensão de escoamento obtida por Herschel-Bulkley os coeficientes de determinação foram de 0,9926, 0,7516 e 0,9704. Ambos modelos mostram uma forte correlação decrescente entre as propriedades de tensão de escoamento e índice de consistência.

Golaszewski *et al.*, (2016) também encontrou forte correlação decrescente na correlação entre a tensão de escoamento e o *slump test* para concretos autoadensáveis, assim como Sato (2015) quando comparou a tensão de escoamento de pastas com o *slump test* realizado em concretos com a mesma relação a/c e porcentagem de adição de RBRO avaliados no trabalho de Soares (2014).

À medida que aumenta-se o índice de consistência há uma queda nos valores de tensão de escoamento, uma vez que maiores índices de consistência e menores valores de tensão de escoamento indicam maior fluidez das argamassas e pastas, respectivamente.

Assim, acredita-se que a tensão de escoamento determinada nos ensaios reológicos pode ser um bom parâmetro de avaliação quando deseja-se melhor entender o comportamento da trabalhabilidade no estado fresco, visto que há uma forte correlação entre as duas propriedades.

Além disso, a análise inicial de parâmetros reológicos como a tensão de escoamento pode auxiliar na escolha e dosagem adequada de materiais quando pretende-se avaliar a influência de adições e aditivos, por exemplo, no comportamento de argamassas e concretos no estado fresco.

4.4.2 Correlação entre o módulo elástico das pastas cimentícias no estado fresco e o módulo de elasticidade das argamassas

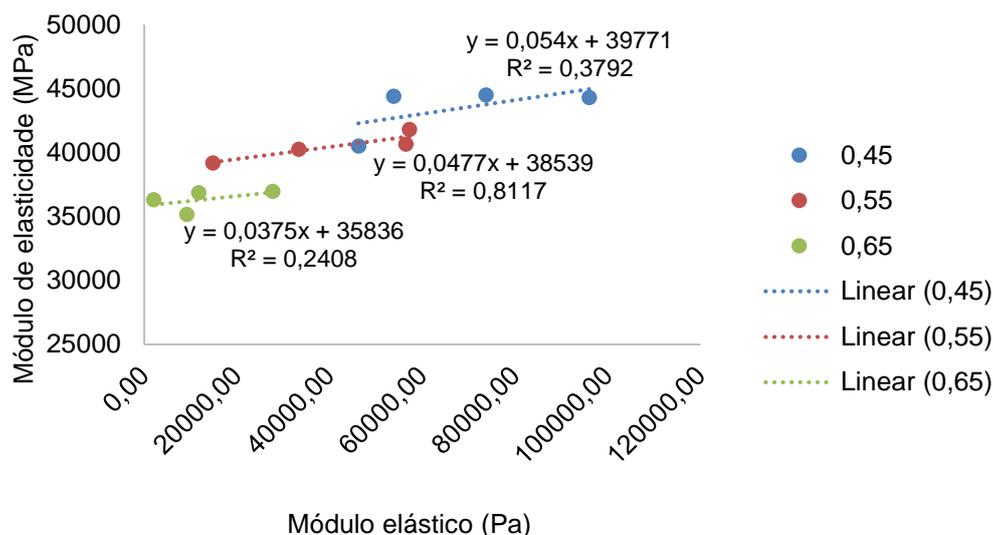
Como visto na revisão bibliográfica, o ensaio de varredura de deformação fornece dados de tensão conforme a deformação é aplicada. A partir desses dados é possível traçar um gráfico tensão x deformação em que a tensão é representada pelo módulo elástico (componente do módulo complexo) e a deformação varia em um intervalo pré definido antes da realização do ensaio.

Através do gráfico é possível determinar a deformação crítica, que estabelece a região viscoelástica do material, em que o módulo elástico não depende da deformação aplicada, ou seja, é constante, e que a partir desta deformação a estrutura interna do material se rompe, provocando queda nos valores de módulo elástico.

Schultz (1991) apud Betioli (2007) avaliou um modelo proposto por Chen e Zukoski (s.d.) para estimar a tensão de escoamento através do módulo elástico e da deformação crítica, que é uma analogia a Lei de Hooke.

No modelo proposto o módulo elástico se assemelha ao módulo de elasticidade, portanto foi feita uma análise da correlação entre esses dois parâmetros. O resultado encontra-se na Figura 73.

Figura 73: Correlação do módulo elástico e do módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Acervo Pessoal

Como visto nos resultados analisados anteriormente, o módulo de elasticidade não apresentou comportamento similar ao da resistência à compressão, visto que para as relações a/c 0,45 e 0,65 os valores permaneceram constantes para todas as porcentagens de adição. Apenas para relação a/c 0,55 houve aumento no módulo de elasticidade com o aumento na porcentagem de adição.

Tal comportamento não foi observado na avaliação no módulo elástico, em que houve crescimento com aumento da adição de RBROTT e diminuição com o aumento da relação a/c, como era esperado.

Esses resultados são evidenciados na análise da correlação linear entre os parâmetros, em que o R^2 para as relações a/c 0,45 e 0,65 foram baixos (0,3792 e 0,2408, respectivamente) quando comparados ao R^2 de 0,8117 para relação a/c 0,55.

Portanto, para os dados coletados nesta pesquisa não foi possível estabelecer uma correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico determinado nas argamassas no estado endurecido e o módulo elástico obtido nos ensaios reológicos nas pastas cimentícias.

No entanto, de forma geral, conclui-se que a observância de correlações entre parâmetros reológicos de pastas cimentícias e propriedades de argamassas e concretos tanto no estado fresco quanto endurecido pode levar a medidas mais cientificamente precisas e ao estabelecimento de uma ligação entre reologia e tecnologia de materiais.

Capítulo 5

Conclusões e considerações finais

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa proporciona uma contribuição ao estudo de matrizes cimentícias com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico frente às propriedades reológicas de pastas cimentícias e propriedades de argamassas nos estados fresco e endurecido.

Inicialmente o RBRO foi submetido a um tratamento térmico (fusão a 1200 °C) e então foram avaliadas suas características para verificação da atividade pozolânica.

De forma a investigar a influência do RBROTT em matrizes cimentícias foram utilizadas quatro porcentagens de adição de RBROTT (0%, 10%, 15% e 20%), três relações a/c (0,45, 0,55 e 0,65) e as propriedades das argamassas no estado endurecido foram ensaiadas em 3 idades (28, 63 e 91 dias).

Estão apresentadas neste capítulo as conclusões gerais e específicas desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros acerca do tema aqui abordado.

5.1 Conclusão geral

A partir dos resultados encontrados nesta pesquisa, conclui-se que o RBROTT possui características de um material pozolânico, pois atendeu a todos os critérios estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

Além disso, constatou-se que a utilização do RBROTT como adição mineral atuou significativamente tanto nas propriedades avaliadas nas pastas cimentícias (tensão de escoamento, viscosidade aparente, índice de consistência e módulo elástico) através dos ensaios reológicos quanto nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido (massa específica, índice de consistência, resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico).

5.2 Conclusões específicas

5.2.1 Quanto a atividade pozolânica do RBROTT

Com relação à caracterização do RBROTT foram realizados ensaios para verificação dos critérios estabelecidos na NBR 12653 (ABNT, 2015) para classificação de materiais pozolânicos.

Na análise da composição química o resíduo apresentou-se como material sílico aluminoso e atendeu aos limites químicos normatizados. Além disso, apresentou material retido na peneira nº 325 de apenas 8,8%, enquanto o mínimo exigido pela norma é de 20%.

Foram realizados ensaios para determinação do índice de atividade pozolânica com a cal e do índice de desempenho com o cimento seguindo recomendações das NBR 5751 (ABNT, 2015) e NBR 5752 (ABNT, 2014), respectivamente.

O índice de atividade pozolânica com a cal apresentou resultado satisfatório, pois o mínimo exigido pela norma é de 6 MPa, enquanto o resultado atingido foi de 7,4 MPa. O índice de desempenho com o cimento também atendeu ao critério da norma, uma vez que o mínimo exigido é de 90% e o resultado encontrado foi de 98,5%. Dessa forma, o RBROTT atendeu a todos os critérios estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

5.2.2 Pastas cimentícias

5.2.2.1 Ensaio de fluxo

Através dos resultados obtidos com a realização dos ensaios de fluxo, inicialmente conclui-se que as pastas comportam-se como um fluido não newtoniano e pseudoplástico com tensão de escoamento.

Através das curvas de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento, utilizando a curva de desaceleração foi possível determinar através do software Data Analysis que o modelo reológico que melhor se adequa ao comportamento apresentado é o de Herschel-Bulkley, devido a não linearidade apresentada.

Observou-se que, de forma geral, com o aumento da porcentagem de adição de RBROTT, para todas as relações a/c, houve um aumento para as propriedades analisadas e que, mantendo-se a porcentagem de adição e aumentando a relação a/c, houve diminuição para todas as propriedades.

As pastas com 20% de adição e relação a/c 0,45 apresentaram os maiores valores de tensão de escoamento para os dois modelos avaliados. Sendo que no modelo de Bingham e Herschel-Bulkley houve um aumento de 412,82% e 593,89%, respectivamente em relação a pasta referência.

Com relação a viscosidade e ao índice de consistência as pastas com 20% de adição e relação a/c 0,45 também apresentaram os maiores valores e quando comparados com a pasta referência houve um aumento de 124,05% e 153,51%, respectivamente.

5.2.2.2 Ensaio de varredura de deformação

Neste ensaio foram determinados os parâmetros de deformação crítica e módulo elástico nesta deformação.

Observou-se que o valor de deformação crítica manteve-se na ordem de 10^{-4} para todas as pastas cimentícias analisadas. No entanto, o módulo elástico determinado na deformação crítica mostrou crescimento com o aumento da porcentagem de adição de RBROTT nas misturas.

Quanto às relações a/c, observou-se que com o aumento da quantidade de água na mistura houve uma diminuição no módulo elástico, mantendo-se fixa a porcentagem de adição de RBROTT.

Assim como nas outras propriedades avaliadas, a pasta com 20% de adição de RBROTT e relação a/c 0,45 apresentou os maiores valores de módulo elástico com um crescimento de 107,56% quando comparada com a pasta referência.

5.2.3 Argamassas

5.2.3.1 Estado fresco

Para massa específica notou-se que com o aumento na porcentagem de adição de RBROTT, para todas as relações a/c, houve aumento nos valores. O T45,20, o T55,20 e o T65,20 apresentaram crescimento de 2,19%, 0,58% e 0,69%, respectivamente, quando comparados aos traços referência.

Para o índice de consistência observou-se que com o aumento na porcentagem de adição de RBROTT, para todas as relações a/c, houve diminuição nos valores. O T45,20, o T55,20 e o T65,20 apresentaram diminuição de 23,22%, 6,92% e 11,24% quando comparados aos respectivos traços referência. Evidenciando que a adição de resíduo aumentou a consistência das argamassas.

5.2.3.2 Estado endurecido

Observou-se que com o aumento da relação a/c houve uma diminuição da resistência à compressão axial, como era esperado, para todas as porcentagens de adição e idades.

Avaliando-se o efeito da idade, notou-se que a resistência à compressão axial aumentou com o aumento da idade, o que corrobora com a atividade pozolânica do RBROTT avaliada através de sua caracterização.

Além disso, observou-se que o aumento da porcentagem de adição de RBROTT provocou aumento na resistência à compressão axial para todas as relações a/c e idades analisadas. O T45,20 aos 91 dias apresentou crescimento de 34,53% quando comparado ao TR45 na mesma idade. Assim como o T55,20 e o T65,20 aos 91 dias apresentaram crescimento de 23,47% e 16,56%, respectivamente quando comparados aos traços referência na mesma idade.

Para o módulo de elasticidade dinâmico o aumento da porcentagem de RBROTT provocou aumento na propriedade apenas para relação a/c 0,55. Para relação a/c 0,45 a adição de 10% provocou um aumento de 8,36%, porém para 15% e 20% de adição os valores mantiveram-se praticamente constantes. Já para relação a/c 0,65 praticamente não houve alteração na propriedade com o aumento da adição de RBROTT.

5.2.4 Correlação entre os parâmetros reológicos das pastas cimentícias e as propriedades das argamassas

Observou-se que há uma correlação decrescente forte entre a tensão de escoamento das pastas e o índice de consistência das argamassas para todas as relações a/c utilizadas.

Com o aumento da adição de RBROTT houve aumento na tensão de escoamento e diminuição do índice de consistência, o que evidencia o preenchimento dos poros das matrizes cimentícias pelo RBROTT, possivelmente devido a sua elevada finura e o aumento nas forças de interação entre as partículas.

Para a análise do módulo elástico das pastas cimentícias e do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, observou-se que não foi possível estabelecer uma correlação entre os valores obtidos nesta pesquisa.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Devido a limitações inerentes ao próprio programa experimental e também ao tempo disponível para realização da pesquisa, seguem alguns aspectos que não puderam ser contemplados, mas que são de fundamental importância para complementação e prosseguimento das análises realizadas neste trabalho.

- Avaliação do comportamento das propriedades reológicas de pastas cimentícias com adição de RBROTT através de outros métodos como, ensaio de varredura de frequência, varredura de tempo, *vane test* e *squeeze flow*;
- Estudo de pastas cimentícias e argamassas com percentuais de substituição do cimento por RBROTT;
- Estudo de pastas cimentícias e argamassas com maiores percentuais de adição de RBROTT;
- Produção de cimento composto com RBROTT, visto as características de pozolonicidade apresentadas pelo resíduo após tratamento térmico;
- Realizar o comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios reológicos de pastas cimentícias com resultados obtidos em concretos.

Referências

Referências normativas e bibliográficas

REFERÊNCIAS

AKBULUT, H.; GÜRER, C.; CETIN, S.; ELMACI, A. Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. **Constructions and Building Materials**. v. 36, p. 430-436, 2012.

AL-AKHRAS, N. M.; ABABNEH, A.; ALARAJI, W. A. Using burnt stone slurry in mortar mixes. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 2658-2663, 2010.

ALVES, M. S. **Estudo das Características e da Viabilidade do Uso de Resíduos Gerados no Polimento de Rochas Graníticas como Adição em Concretos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2008.

ANGULO, S. C.; ZORDAN, S.E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**. In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. CT206 - IBRACON. São Paulo - SP. 2001.

APOLINÁRIO, E. C. A. **Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento Portland**. 2014. 193 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2014.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balço das Exportações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2012**. Informe 01/2013. São Paulo, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balço das Exportações, Importações, Produção e Consumo Interno Brasileiro de Rochas Ornamentais em 2014**. Informe 01/2015. São Paulo, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Panorama Mundial do Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2013**. Informe 13/2014. São Paulo, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Panorama Mundial do Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2013**. Informe 1/2017. São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739** – Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 12127** – Gesso para construção – Determinações físicas do pó. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12653** – Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 13276** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13278** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15630** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 5751** – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 5752** – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 7215** – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR NM 23** – Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR NM 24** – Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

BABISK, M. P. **Desenvolvimento de vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de rochas ornamentais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, 2009.

BALDINO, N.; GABRIELE, D.; LUPI, F. R.; SETA, L.; ZINO, R. Rheological behavior of fresh cement pastes: Influence os synthetic zeolites, limestone and silica fume. **Cement and Concrete Research**. v. 63, p. 38-45, 2014.

BANFILL, P. F. G. Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials. **Construction and Building Materials**. v. 8, 1994.

BANFILL, P. F. G. Rheology of Fresh Cement and Concrete. **Rheology Reviews**, p. 61-130, 2006.

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.

BARATA, M. S.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 69-78, 2002.

BARBOSA, W. S. **Alteração do comportamento reológico da suspensão cimentícia aplicada sobre substratos porosos**. 2010. 152 f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2010.

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.

BILGIN, N.; YEPREM, H. A.; ARSLAN, S.; BILGIN, A.; GÜNAY, E.; MARSBOGLU. M. Use of waste marble powder in brick industry. **Construction and Building Materials**. v. 29, p. 449-457, 2013.

CALMON, J. L., MORATTI, M., MORAES S., CENCI D., Self-compacting concrete using marble and granite sawing wastes as filler. **World Sustainable Building Conference**, Tokyo, 2005.

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**. Brasília. Agência Nacional das Águas e Instituto Brasileiro de Mineração. Capítulo 5, p. 199-231, 2006.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F. S. S.; DA SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. Reciclagem do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas. Encontro Nacional de Edificações e Comunidades Sustentáveis. **Anais**. Canela. ANTAC. 1997.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009.

138 f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2009.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G.; BANFILL, P. F. G. Characterisation of rendering mortars by squeeze flow and rotational rheometry. **Cement and Concrete Research**. v. 57, p. 79 -87, 2014.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. N. Caracterização reológica de argamassas pelo método *squeeze-flow*. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. **Anais**. Florianópolis. SBTA. 2005.

Careddu, N., Siotto, G., Siotto, R., & Tilocca, C. **From landfill to water, land and life: The creation of the Centre for stone materials aimed at secondary processing**. *Resources Policy*, 38(3), 258-265, 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.

CENTRO BRASILEIRO DOS EXPORTADORES DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Informativo das exportações de rochas – Dezembro 2014**. Vitória, 2014.

CHIODI, C. F. **Consumo interno, perfil de utilização e estrutura de comercialização das rochas ornamentais e de revestimento no Brasil**. Publicação técnica. ABIROCHAS. Minas Gerais. 2004.

COLANGELO, F.; MARROCCOLI, M.; CIOFFI, R. Properties of self-levelling concrete made with industrial wastes. **RILEM proceedings pro**, v. 40, p. 580-589, 2010.

CONTE, T.; CHAOUICHE, M. Rheological behavior of cement pastes under Large Amplitude Oscillatory Shear. **Cement and Concrete Research**. v. 89, p. 332 - 344, 2016.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 113–117, 2010.

COSME, R. L. **Estudo reológico de mástiques com filer de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) e escória moída de aciaria (EMA)**. 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado). Programa de PósGraduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

COUTO, P. B. **Caracterização reológica de pastas de cimento Portland de alta resistência contendo diferentes tipos de polímeros superabsorventes pela técnica de reometria rotacional**. 2016. 212 f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

CRUZ, D. F. M. da; LAMEIRAS, R. de M.; BARBOZA, A. da S. R.; LIMA, L. A. de. **Estudo das propriedades mecânicas de argamassas produzidas utilizando-se resíduo do corte de mármore e granito.** In: VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. São Paulo. 2003. IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto) – CT 206 –Meio Ambiente.

DAL MOLIN, D.C.C., Adições minerais. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia.** 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, v. 1, p. 261-309, 2011.

DILS, J.; SCHUTTER, G.; BOEL, V. Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review. **RILEM Materials and Structures**, 2012.

ELICHE-QUESADA, D.; CORPAS-IGLESIAS, F. A.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; IGLESIAS-GODINO, F. J. Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing. **Construction and Building Materials.** v. 34, p. 275-284, 2012.

ESPÍRITO SANTO. Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Instrução Normativa Nº 019** de 17 de agosto de 2005. Dispõe sobre a definição dos procedimentos de licenciamento das atividades de beneficiamento de rochas ornamentais. Disponível em <<http://www.meioambiente.es.gov.br/default.asp?pagina=18190>>. Acesso em 21 jan. 2016.

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.

FERRARIS, C. F.; DE LARRARD, F. **Testing and modelling of fresh concrete rheology.** National Institute of Standards and Tchenology. 1998.

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

FRANÇA, M. S.; CARDODO, F. A.; PILEGGI, R. G. Avaliação do comportamento de mistura de argamassas através de reometria rotacional. **Ambiente Construído.** v. 12, n. 2, p. 165-174, 2012.

FRANÇA, M. S.; CARDODO, F. A.; PILEGGI, R. G. Influência do tempo de mistura nas propriedades reológicas de argamassas. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. **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.

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.

FRASCÁ, M. H. B. O. Rocha como material de construção. In: ISAIA, G. C. Materiais de Construção Civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais. São Paulo: IBRACON, v1, p.437-480, 2007.

GENCEL, O; OZEL, C.; KOKSAL, F.; ERDOGMUS, E.; MARTÍNEZ-BARRERA, G.; BROSTOW, W. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. **Journal of Cleaner Production**. v. 21, p. 62-70, 2012.

GHAFAARI, E.; CHAHARI, S. A.; FENG, Y.; SEVERGNINI, F.; LU, N. Effect of zinc oxide and al-zinc oxide nanoparticles on the rheological properties of cement paste. **Composites Part B**. v. 105, p. 160-166, 2016.

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. **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.

GONÇALVES, J.P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil, 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.

HAN, D. **Flow behavior and microstructure of cement-based materials**. 263 f. Dissertation presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin. 2014.

HAN, D.; FERRON, R. D. Effect of mixing method on microstructure and rheology of cement paste. **Construction and Building Materials**. v. 93, p. 278–288, 2015.

JAIN N. Effect of nonpozzolanic and pozzolanic mineral admixtures on the hydration behavior of ordinary Portland cement. **Construction and Building Materials**. v. 27, p. 39-44, 2012.

JALAL, M.; POULADKHAN, A.; HARANDI, O. F.; JAFARI D. COMPARATIVE study on effects of Class F fly ash, nano silica and sílica fume on properties of high performance self compacting concrete. **Construction and Building Materials**. v. 94, p. 90-104, 2015.

JANOTKA, I.; PUERTAS, F.; PALACIOS, M.; KULIFFAYOVA, M.; VARGA, C. Metakaolin sand-blended-cement pastes: Rheology, hydration, process and mechanical properties. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 791–802, 2010.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 113p. Tese (Livre Docência)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

JORDONI, L. S. **Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concretos**. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

KALETA, A.; GRZESZCZYK, S. The influence of chosen factors on the rheological properties of cement paste. **Procedia Engineering**. v. 108, p 568 – 574, 2015.

KARASBAHIN, M.; TERZI, S. Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. **Construction and Building Materials**. v. 21, p. 616-620, 2007.

MA, K.; FENG, J.; LONG, G.; XIE, Y. Effects os mineral admixtures on shear thickening of cement paste. **Construction and Building Materials**. v. 126, p. 609 – 616, 2016.

MACHADO J. C. V. **Reologia e escoamento de fluidos, ênfase na indústria do petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002.

MARÇAL, R. L. S. B.. **Fabricação de vidros especiais a partir de resíduos da indústria de rochas ornamentais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, 2011.

MÁRMOL, I.; BALLESTER, P.; CERRO, S.; MONRÓS, G.; MORALES, J.; SÁNCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cement & Concrete Composites**. v. 32, p. 617-622, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutural, propriedades e materiais**, 3 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, p. 674, 2008.

MITTRI, S. H. M. **Contribuição ao estudo do comportamento de concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente em relação aos aspectos mecânicos e de durabilidade** 2016. 167 f. Dissertação (Mestrado). Programa de PósGraduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. In: **Revista Escola de Minas**, vol.64, ním.2, abril-jun, p. 147-154. Escola de Minas, Brasil: 2011.

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.

NACHBAUR, L.; MUTIN, J. C.; NONAT, A.; CHOPLIN, L. Dynamic mode rheology of cement and tricalcium silicate pastes from mixing to setting. **Cement and Concrete Research**. v. 31, p. 183 – 192, 2001.

NEHDI, M.; RAHMAN, M. A. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. **Cement and Concrete Research**. v. 34, p. 1993 – 2007, 2004.

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

PARK, C. K.; NOH, M. H.; PARK, T. H. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**. v. 35, p. 842 – 849, 2005.

PHAN, T. H.; CHAOUICHE, M.; MORANVILLE, M. Influence of organic admixtures on the rheological behavior of cement pastes. **Cement and Concrete Research**. v. 36, p. 1807 -1813, 2006.

PILEGGI, R. G.; STUART, 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.

RAMOS, T.; MATOS, A. M.; SCHMIDT, B.; RIO, J.; SOUSA-COUTINHO, J.. Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. **Construction and Building Materials**. v. 47, p. 1001–1009, 2013.

REIS, A. S. **Estudo do aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

ROUSSEL, N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. **Cement and Concrete Research**. v. 36, p. 1797-1806, 2006.

SANT, G.; FERRARIS, C. F.; WEISS, J. Rheological properties of cement pastes: A discussion of structure formation and mechanical property development. **Cement and Concrete Research**. v. 38, p. 1286 - 1296, 2008.

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. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 1, 2013

SANTOS, M. L. L. de O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SATO, V. Y. **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.

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

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

SEFFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L. Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico. **Revista Matéria**. V. 15, n, 1, p. 12-20, 2010.

SHANG, Y.; ZHANG, D.; YANG, C.; LIU, Y.; LIU, Y. Effect os graphene oxide on the rheological properties of cement pastes. **Construction and Building Materials**. v. 96, p. 20–28, 2015.

SIRIRUANG, C.;TOOCHINDA, S.; JULNIPITAWONG, P.; TANGTERMSIRIKUL, S. CO₂ capture using fly ash from coal fired power plant and applications of CO₂-captured fly ash as a mineral admixture for concrete. **Journal of Environmental Management**. v 170, p. 70 – 78, 2016.

TA INSTRUMENTS. **Discovery hybrid accessories**. Disponível em: <<http://www.tainstruments.com>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

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

TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; OLHERO, S.; FERREIRA, J. M. F. Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. **Journal of the European Ceramic Society**. v. 29, p. 23-30, 2008.

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.

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

VAZZOLER, J. S. **Investigação de potencialidade pozolânica do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico para produção de pasta cimentícia**. 2015. 145 f. Dissertação (Mestrado). Programa de PósGraduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

VIKAN, H.; JUSTNES, H.; WINNEFELD, F.; FIGI, R. Correlating cement characteristics rheology of paste. **Cement and Concrete Research**. v. 37, p. 1502 – 1511, 2007.

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

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.