

Contribution to the rheological study of cementitious pastes with addition of residues from the processing of ornamental rocks

Contribuição ao estudo reológico de pastas cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais



V. Y. SATO ^a
yumisato2003@hotmail.com

A. P. L. GALINA ^a
aplacorte@gmail.com

J. E. S. L. TEIXEIRA ^a
jamilla.teixeira@ufes.br

Abstract

Brazil is one of the world's largest producers and exporters in the field of ornamental stones. On the other hand, the production and processing of ornamental stones result in a large volume of unused material in the form of sludge, usually discarded inappropriately in sedimentation ponds or landfills. Several researches have been carried out aiming the reuse of this material in cementitious matrixes. In the field of rheology, there are still incipient national studies that use the rheological parameters obtained experimentally to determine the behavior of cement matrix based on Portland cement. Thus, the objective of this work is to characterize rheologically the behavior of cementitious pastes with and without addition of ornamental rock processing residue (RBRO) in its natural condition. Cement pastes were prepared with three a/c ratios (0.45, 0.55, 0.65) and four residue addition contents (0%, 5%, 10%, 15%) and submitted to the flow test. In tests for characterization of the residue, the RBRO presented as a material of specific fineness and mass near the cement, having low reactive activity, indicating that the residue can be used as an inert mineral addition in the cementitious matrix. In the rheological characterization tests of the pulps studied, it was observed in the flow tests that the samples behaved as a non-Newtonian, pseudoplastic and thixotropic fluid.

Keywords: ornamental rock waste, cement pastes, rheology.

Resumo

O Brasil é um dos grandes produtores e exportadores mundiais no setor de rochas ornamentais. Em contrapartida, a produção e o beneficiamento de rochas ornamentais resultam em grande volume de material não aproveitado em forma de lama, geralmente descartados de maneira inadequada em lagoas de decantação ou aterros. Diversas pesquisas têm sido realizadas objetivando o reaproveitamento deste material em matrizes cimentícias. No campo da reologia, ainda são incipientes estudos nacionais que utilizem os parâmetros reológicos obtidos experimentalmente para determinar o comportamento de matrizes cimentícias a base de cimento Portland. Contudo, o objetivo desse trabalho é caracterizar reologicamente o comportamento de pastas cimentícias com e sem adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) em sua condição natural. Foram fabricadas pastas cimentícias com três relações a/c (0,45; 0,55; 0,65) e quatro teores de adição do resíduo (0%, 5%, 10%, 15%) e submetidas ao ensaio de fluxo. Em testes para caracterização do resíduo, o RBRO se apresentou como um material de finura e massa específica próximas do cimento, possuindo baixa atividade reativa, indicando que o resíduo pode ser utilizado como adição mineral inerte na matriz cimentícia. Já em ensaios de caracterização reológica das pastas estudadas, observou-se nos ensaios de fluxo que as amostras se comportaram como um fluido não newtoniano, pseudoplástico e tixotrópico.

Palavras-chave: resíduo de rochas ornamentais, pastas cimentícias, reologia.

^a Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Vitória, ES, Brasil.

1. Introdução

Os questionamentos preliminares desta pesquisa giram em torno da caracterização e utilização do resíduo gerado na produção e beneficiamento de rochas ornamentais, nomeado e batizado pelo Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) como lama de beneficiamento de rochas ornamentais como material alternativo na produção de concreto. Segundo a classificação de resíduos sólidos da norma NBR 10004 [1], os sólidos provenientes dessa lama foram classificados como classe II A - resíduo não inerte.

Os resíduos sólidos provenientes desse processo de beneficiamento primário de rochas ornamentais geralmente são descartados em lagoas de decantação ou aterros e, muitas vezes, sem um processo de tratamento para eliminar ou reduzir os constituintes presentes. Pela grande quantidade produzida, ambientalistas acusam as indústrias desse setor como fontes de contaminação e/ou poluição do meio ambiente tornando esses rejeitos um problema ambiental [2]. Constata-se, portanto, a necessidade de aproveitar o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) no Brasil e, principalmente, no estado do Espírito Santo. Em vista disso, é de extrema importância a preocupação com estudos que tornem o setor de rochas mais sustentável do ponto de vista ambiental, dando um destino mais nobre aos rejeitos produzidos por este setor e que também viabilize a utilização do resíduo do ponto de vista técnico, garantindo a qualidade e a durabilidade do produto que venha a incorporar estes rejeitos.

Alguns estudos apontam o reaproveitamento do RBRO como material alternativo em várias áreas e aplicações, tais como argamassa [3], revestimento cerâmico [2], piso intertravado [4], entre outros. Visto que boa parte desse resíduo gerado é reaproveitada sob a forma de subproduto industrial, uma forma de contribuição para o emprego do RBRO é utilizar na fabricação de concretos [5-12].

Por sua vez, o concreto é um material que exige atenção especial, desde a fase de especificação até a cura, pois muitas vezes possui função estrutural. Através da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) obtemos a norma NBR 7212 [13], que determina o tempo limite para executar o lançamento do concreto, sendo este de 150 minutos a partir da sua mistura. Caso esse tempo seja ultrapassado, o concreto poderá apresentar perda de trabalhabilidade por perda de água por evaporação e início da pega devido às reações de hidratação do cimento.

Para o controle tecnológico do concreto e a verificação da sua trabalhabilidade no seu estado fresco, um ensaio comumente utilizado e realizado é o índice de consistência medido através do teste de abatimento de tronco de cone (Slump test), normatizado na NBR NM 67 [14]. Contudo, algumas propriedades do concreto (tensão de cisalhamento, tensão de escoamento e viscosidade) não são possíveis de se obter através desse ensaio, sendo necessária a busca de mais informações a respeito dessas propriedades para um melhor entendimento do seu comportamento em diversas aplicações.

De modo geral, as propriedades do concreto em seu estado fresco estão diretamente relacionadas com o comportamento da pasta cimentícia [15]. Uma maneira de analisar esse comportamento é através da reologia, um ramo da física sugerida pela primeira vez por Bingham [16] para descrever a deformação e escoamento de materiais quando submetidos a esforços originados por forças externas [17-20].

Para a determinação dos parâmetros reológicos da pasta cimentícia, tais como tensão de escoamento, viscosidade aparente, perfil reológico do material e, ainda, os efeitos da consolidação desse material associados à hidratação do cimento, a literatura propõe alguns testes como, por exemplo, ensaio de fluxo, ensaio oscilatório (varredura de tempo e varredura de deformação) e ensaio de palheta ou Vane test [11; 21-25].

Tabela 1
Caracterização física e química do cimento CP V ARI

	Propriedade	Resultado	Método de ensaio	Limite
	Massa específica (g/cm ³)	2,823	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.
Finura	Área específica - Blaine (cm ² /g)	4459	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	≥ 3000
	Material retido na peneira 200 (%)	0,1	NBR 9202 (ABNT, 1985)	N.E.
Tempos de pega	Início de pega (min)	128	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≥ 60
	Fim de pega (min)	181	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≤ 600
Resistência à compressão	1 dia (MPa)	29,4	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 14
	3 dia (MPa)	42,2	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 24
	7 dia (MPa)	46,0	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 34
Composição química	Perda ao fogo - PF (%)	3,84	NBR NM 18 (ABNT, 2001)	≤ 4,5
	SiO ₂ (%)	18,65	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	CaO (%)	63,72	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	MgO (%)	0,75	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Al ₂ O ₃ (%)	4,91	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Fe ₂ O ₃ (%)	2,97	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	K ₂ O (%)	0,80	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	SO ₃ (%)	2,87	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 4,5
	C ₃ A teórico	7,66	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Resíduo insolúvel - RI (%)	0,75	NBR NM 15 (ABNT, 2012)	≤ 1,0

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

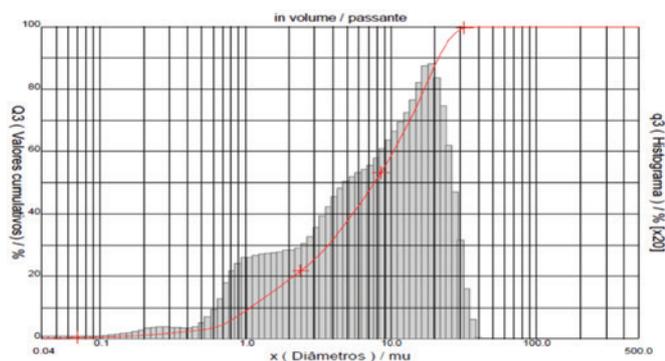


Figura 1
Distribuição granulométrica do cimento CP V ARI

Segundo De Larrard et al. [26], a utilização do reômetro não tem a finalidade somente de medir o maior número de parâmetros possíveis, entretanto avalia-se também as quantidades físicas que podem estar cientificamente relacionadas aos diversos estágios de utilização do concreto. Como exemplo disso, pode-se citar a tensão de escoamento, que indica a tensão mínima necessária para o concreto fresco se deformar. Reis [27] afirma que essa tensão está diretamente relacionada com o ensaio de abatimento de tronco de cone. Quanto maior a tensão de escoamento de uma matriz cimentícia, espera-se um menor abatimento obtido pelo ensaio tradicional de abatimento de tronco de cone do concreto no estado fresco. Outro parâmetro reológico é a viscosidade aparente, que aponta o acréscimo de tensão que deve ser imposta para produzir uma determinada taxa de cisalhamento. A viscosidade aparente se associa, na prática, às capacidades de aplicação, bombeamento, segregação do material e acabamento, facilitando a distinção entre um concreto trabalhável de um que apresenta um comportamento “pegajoso”, com dificuldades para bombear e apresentando vazios na superfície do elemento estrutural quando a forma é retirada [15].

Apesar do número cada vez crescente de estudos que visam incorporar o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais, observa-se que a maior parte dessas pesquisas foca na análise do comportamento mecânico do concreto. O estudo do comportamento reológico com adição destes rejeitos ainda é incipiente. Assim, de uma maneira geral, neste trabalho, busca-se viabilizar o aproveitamento e a utilização do RBRO na construção civil, incorporando no concreto como adição para minimizar os impactos

Tabela 2
Caracterização física do RBRO

Método de ensaio	Característica	Resultado	Limites
NBR NM 23 (ABNT,2001)	Massa específica (g/cm ³)	2,5253	N.E
NBR 12127 (ABNT, 1991)	Massa unitária (g/cm ³)	0,766	N.E
NBR NM 24 (ABNT, 2002)	Teor de umidade inicial (%)	38,27	N.E
NBR NM 24 (ABNT, 2002)	Teor de umidade utilizado na pesquisa (%)	0,04	≤ 3,0
NBR NM 76 (ABNT, 1998)	Área específica (Método de Blaine) (cm ² /g)	6179,3	N.E.
NBR 11579 (ABNT, 2012)	Material retido na peneira n° 200 (%)	3,08	N.E.
NBR 9202 (ABNT,1985)	Material retido na peneira n° 325 (%)	7,0	≤ 34

ambientais provocados pela indústria de mineração e beneficiamento dessas rochas e, ainda, reduzir os custos dada a possível redução no volume de cimento Portland necessário na fabricação de concreto.

2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo utilizar dos conceitos de reologia para investigar a influência da incorporação de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais nas propriedades reológicas de pastas cimentícias, analisando as interações que ocorrem entre este rejeito e os outros constituintes das pastas (cimento e água, nesse estudo). Sobretudo, é investigado como o efeito filler deste rejeito pode alterar os parâmetros reológicos analisados, pois este se torna um material pulverulento de elevada finura após seu processo de preparação (secagem, destorroamento, quarteamento e moagem).

3. Materiais e métodos

3.1 Cimento

Foi utilizado nesta pesquisa o cimento classificado como cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) de acordo com a norma NBR 5733 [28]. O cimento utilizado foi doado por uma empresa situada no município da Serra – ES. A caracterização química referente ao lote de cimento utilizado foi fornecida pelo fabricante e sua caracterização física foi realizada em laboratório, apresentados na Tabela 1.

A distribuição granulométrica do cimento foi realizada por meio de granulômetro a laser modelo 1064 – CILAS. A Figura 1 mostra a curva de distribuição granulométrica do cimento.

Através do gráfico de distribuição granulométrica é possível observar que os grãos do cimento apresentam valores D10 na ordem de 1,08µm, D50 na faixa dos 7,68µm, D90 com 21,15µm, 100% está abaixo de 36,00 µm, com seu valor médio para tamanho dos grãos na ordem de 9,64µm.

3.2 Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO)

O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais é fornecido sob a forma de lama, sem o tratamento prévio, foi doada por uma serraria situada no município da Serra – ES. A lama fornecida é

proveniente do desdobramento dos blocos nos teares de fios diamantados e do polimento das chapas de rochas. A coleta desse material foi em diferentes depósitos da própria serraria, seguindo a norma NBR 10007 [29], e armazenados em tonéis plásticos de 20 litros para transportar até o laboratório.

O material apresentava alta umidade (38,3%), sendo necessária uma secagem ao ar, por 48 horas para a utilização desse resíduo como adição e/ou substituição nas pastas de cimento estudadas, para melhor amostragem e obtenção de uma mistura homogênea. Após a secagem, o resíduo foi quartado e amostras parciais foram coletadas de duas partes opostas diagonalmente de acordo com a norma NBR 26 [30]. Após a coleta, as amostras foram distribuídas em tabuleiros e secas em estufa por mais 24 horas.

3.2.1 Caracterização do RBRO

a) Caracterização física

Foram executados os ensaios para determinação da massa específica, massa unitária, superfície específica, finura e composição granulométrica do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais. Os resultados estão descritos na Tabela 2.

A massa específica do RBRO, $2,525 \text{ g/cm}^3$, é 10,5% menor que a massa específica do cimento CP V ARI ($2,823 \text{ g/cm}^3$).

A área específica é uma característica importante para adições minerais. Quando comparados materiais de mesma composição química, quanto maior for a área superficial do material, maior será a possibilidade de reação com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento devido à sua área de contato com os reagentes [31]. A área específica do RBRO ($6179 \text{ cm}^2/\text{g}$) é maior que a do cimento CP V ARI ($4459 \text{ cm}^2/\text{g}$), o que indica que o resíduo tem partículas mais finas do que este.

A distribuição granulométrica é mostrada pela Figura 2, a dimensão dos grãos equivalentes ao D10 (diâmetro abaixo do qual se situam 10 % das partículas) na ordem de $1,7 \mu\text{m}$, D50 na ordem de $11,0 \mu\text{m}$ e D90 na ordem de $40 \mu\text{m}$. De acordo com Gonçalves [10] o agregado fino geralmente tem diâmetro médio entre 50 e $150 \mu\text{m}$ e preenche os vazios deixados pela descontinuidade do agregado miúdo. A adição com potencial efeito filler, por sua vez, tem diâmetro médio menor que $50 \mu\text{m}$ e atua no preenchimento

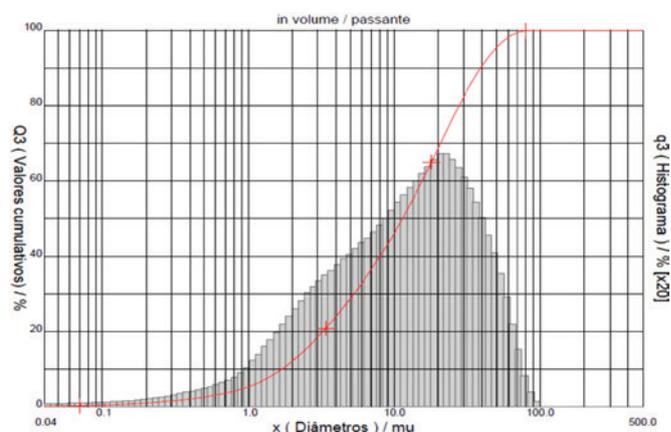


Figura 2

Curva de distribuição granulométrica do RBRO

dos poros deixados pelos produtos de hidratação do cimento [10]. É possível constatar que o resíduo RBRO é um material pulverulento, mais fino que o cimento, que pode ter efeito filler em matrizes cimentícias.

b) Caracterização química

Foi efetuada caracterização do RBRO por meio do ensaio de perda ao fogo (PF) e composição química por meio de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), resultados podem ser vistos na Tabela 3. O RBRO é composto predominantemente por quartzo sílica (SiO_2) e por feldspato alumina (Al_2O_3) sendo, portanto, um material sílico-aluminoso.

A partir dos resultados da fluorescência de raios-x constata-se a predominância do quartzo sílica (SiO_2) e, secundariamente, do feldspato alumina (Al_2O_3), o que evidencia ser o resíduo sílico-aluminoso. Em menores teores há presença de minerais do grupo das micas (Na_2O e K_2O), compostos estes presentes em rochas graníticas. A presença do óxido de magnésio (MgO), possivelmente, é proveniente do desgaste das sapatas de polimento que são fabricados com cimento sorel, formado por óxidos de magnésio e cloro tipicamente adotados na confecção das coroas abrasivas.

Tabela 3

Composição química do RBRO

Propriedades	RBRO	Limites
Perda ao fogo - PF (%)	3,5	$\leq 6,0$
Composição química	SiO_2 (%)	66,80
	CaO (%)	3,44
	MgO (%)	0,93
	Al_2O_3 (%)	13,50
	Fe_2O_3 (%)	3,79
	K_2O (%)	3,83
	Na_2O (%)	3,50
	C (%)	1,11
	TiO_2 (%)	0,16
	SO_3 (%)	0,06
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	85,08	N.E.

Obs.: limites estabelecidos com base nos dados da Classe E de pozolanas descritos na NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos (ABNT, 2014); N.E. = não estabelecido.

Tabela 4
Nomenclatura das amostras

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

vas [32]. Quanto à perda ao fogo, o valor encontrado pode ser referente aos materiais provenientes do polimento, como ceras e resinas, já que a amostra de resíduo estudada possui tanto a lama proveniente do corte dos blocos quanto à lama do polimento das chapas.

c) Índice de atividade pozolânica

A NBR 12653 [33] define como pozolana um material sílico ou sílico-alumínico que sozinho possui pouco ou nenhuma propriedade cimentícia. Contudo, em temperatura ambiente e na presença de umidade, pode reagir com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentantes. Uliana [34] e Soares [35] constataram que o RBRO não se enquadra nos requisitos da NBR 12653 [33] em seus aspectos da verificação da pozolanidade em argamassas, tanto com cal como com cimento. Dessa forma, o RBRO pode ser utilizado como filler em argamassas e concretos, podendo exercer efeito físico de preenchimento dos vazios e densificação das misturas.

3.3 Pastas cimentícias estudadas

Foram estudadas um total de 12 (doze) pastas cimentícias variando o percentual de resíduo adicionado em relação a massa de cimento e a relação a/c. Foi definida uma nomenclatura para cada amostra a ser estudada para distinguir com mais facilidade, começando pela pasta de cimento sem resíduo (pasta de referência), seguida de mais três porcentagens de adição do resíduo com relação à massa de cimento (5%; 10%; 15%) e três relações água/cimento distintas (0,45; 0,55; 0,65). A Tabela 4 apresenta as

Tabela 5
Processo de mistura para 100 e 300 segundos

Tempo de mistura	Mistura em velocidade baixa (V1)	Parar e limpar	Mistura em velocidade baixa (V2)	Parar e limpar	Mistura em velocidade baixa (V2)	Tempo total
100 segundos	30s	60s	30s	60s	40s	3 minutos e 40 segundos
300 segundos	90s	60s	90s	60s	120s	7 minutos

nomenclaturas adotadas, sendo que C significa cimento, R é o resíduo seguido do número percentual adicionado e último número é a relação água/cimento.

As proporções de resíduos e a/c utilizadas teve como base o trabalho de Soares [35], que estudou a influência da adição de resíduos nas propriedades de trabalhabilidade e mecânicas de concretos no estado fresco e endurecido com ênfase na análise da durabilidade de concretos. De forma a correlacionar os resultados de abatimento encontrados por Soares [35] com os apresentados neste estudo, manteve-se então as mesmas relações a/c e percentual de resíduos.

3.4 Determinação do procedimento de mistura para produção de pastas cimentícias para ensaios reológicos

É fundamental a definição de um procedimento de mistura a ser empregado em ensaios utilizando um reômetro de cisalhamento dinâmico Dynamic Shear Rheometer (DSR) para que a amostra esteja homogênea antes da execução do ensaio. De acordo com alguns pesquisadores, o tempo de mistura é um dos fatores que influenciam na homogeneização da pasta. França et al. [36, 37] mostraram em suas pesquisas que amostras com maior tempo de mistura demonstram mais eficiência, produzindo argamassas mais fluidas e estáveis. Para uma melhor análise do teste para a obtenção do processo de mistura, foi escolhida a pasta cimentícia com maior viscosidade, menor relação água/cimento e maior percentual de resíduo RBRO (C R15 45), pois seria a pasta com maior dificuldade para homogeneizar.

Então, foram realizados diversos testes para analisar e definir qual o melhor procedimento de mistura para preparação das amostras. Teve como base uma modificação do método de mistura desenvolvido pela Texas Transportation Institute, baseado no estudo realizado pela Portland Cement Association e mais tarde pelo National Institute of Standards and Technology [38]. Após esse processo, as amostras foram submetidas ao ensaio de fluxo de 3 ciclos no reômetro e analisadas através do gráfico gerado pelo ensaio. Assim como os autores utilizaram um misturador mecânico de alto cisalhamento [38], foi utilizado nessa pesquisa um misturador da marca Oster, modelo 6855 de 14 velocidades e 450 watts. Possui lâminas de aço inoxidável, copo de vidro seguro contra choque térmico testado para resistir mudanças extremas de temperatura. As massas dos materiais foram estabelecidas numa balança eletrônica digital de precisão de 0,01g.

3.4.1 Determinação do tempo de mistura

O primeiro fator a ser definido foi o tempo de mistura no misturador.

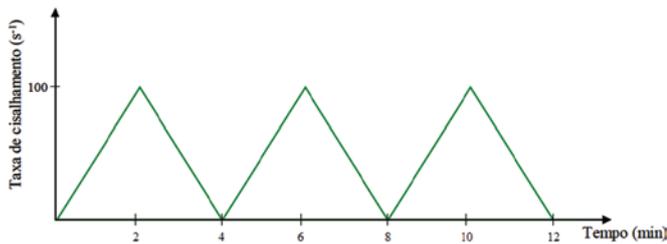


Figura 3
Rampa de aceleração e desaceleração de 3 ciclos

Neste estudo foram analisados dois tempos de mistura efetiva (tempo do misturador ligado): (a) 100 segundos e (b) 300 segundos. O procedimento de mistura a ser seguido foi o mesmo para os dois tempos, modificando apenas o tempo que o misturador fica ligado e utilizando somente as duas primeiras velocidades do misturador. Primeiramente, pesou-se separadamente a quantidade de água, cimento e resíduo com aproximação de 1,0g. Em seguida, foi colocado no misturador primeiro o cimento e o resíduo e depois se acrescentou a água. Após a junção dos materiais, o misturador foi ligado na primeira velocidade por (a) 30 segundos ou (b) 90 segundos a depender dos tempos de mistura efetiva de 100 segundos ou 300 segundos, respectivamente, e depois o equipa-

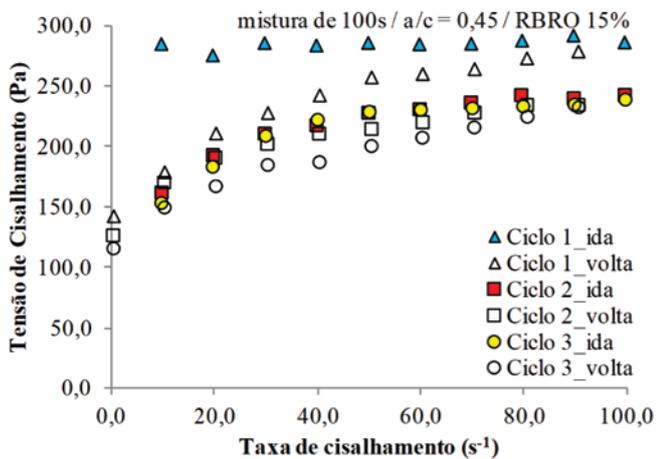
Tabela 6
Área de histerese das amostras de mistura de 100 e 300 segundos

Tempo de mistura (s)	100	300
Ciclo 1	3035,31	3.549,91
Ciclo 2	468,65	1.410,36
Ciclo 3	1482,37	1.076,52

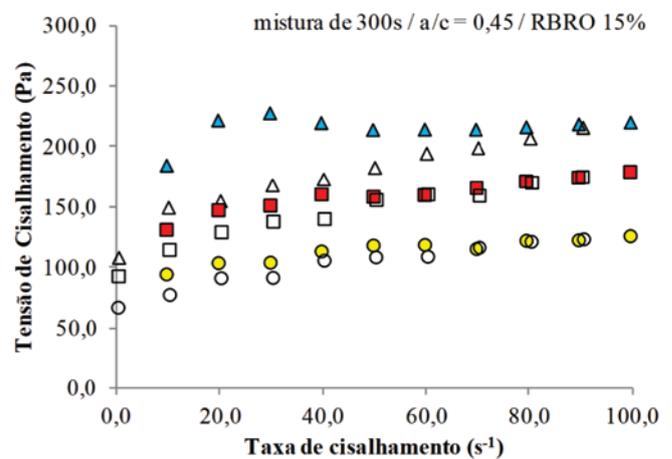
mento foi desligado por 60 segundos para limpar manualmente as paredes do copo do misturador. A seguir, o aparelho foi ligado novamente na segunda velocidade por (a) 30 segundos ou (b) 90 segundos e desligado em seguida por mais 60 segundos para a limpeza do copo do misturador. Por fim, ligou-se o equipamento e a pasta foi misturada por (a) 40 segundos ou (b) 120 segundos na segunda velocidade de forma a obter um a pasta homogênea. O tempo total do processo de mistura (a) foi de 3 minutos e 40 segundos, para o procedimento com 100 segundos de mistura efetiva e (b) foi de 7 minutos, para o procedimento com 300 segundos de mistura efetiva (Tabela 5).

3.4.2 Ensaio de fluxo de 3 ciclos

Imediatamente após cada processo de mistura (a) e (b), foi realizado o ensaio de fluxo com 3 ciclos seguidos (aceleração de



(a)



(b)

Figura 4
Gráficos de tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento das misturas de (a) 100 segundos e (b) 300 segundos

Tabela 7
Área de histerese dos processos de mistura para teste com pré-cisalhamento diferentes realizado pelo reômetro

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

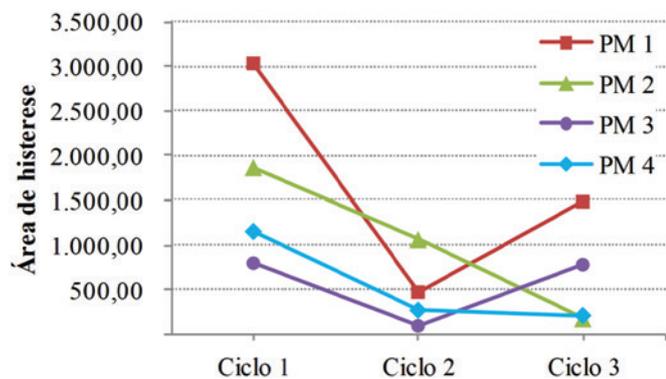


Figura 5
Gráfico com os valores da área de histerese de cada processo de mistura

0 a 100s⁻¹ por 2 minutos e desaceleração de 100 a 0s⁻¹ por mais 2 minutos, totalizando em 12 minutos de ensaio), como mostra a Figura 3. O que se espera é que após cada ciclo, se obtenha o mesmo resultado para os parâmetros reológicos mostrando assim a eficiência do procedimento de mistura para dispersão das partículas. Caso contrário, esta dispersão se daria durante o ensaio, o que não é desejado. Através do gráfico de tensão versus taxa de cisalhamento, gerado pelo ensaio realizado no reômetro, é possível calcular a área de histerese (diferença de tensão entre a curva de aceleração e a curva de desaceleração), que indica o estado de dispersão da amostra. Os resultados desta análise inicial para determinação do tempo de mistura são apresentados na Figura 4 e Tabela 6.

Foi observado que, apesar de os valores das tensões de cisalhamento da amostra de 100 segundos serem maiores que os da mistura de 300 segundos, a área de histerese encontrada para os dois tempos de mistura não variaram significativamente. Assim, o tempo de mistura adotado nesta pesquisa foi de 100 segundos.

No entanto, mesmo com esses tempos de misturas, percebeu-se que os valores encontrados em cada ciclo eram ainda dispersos, não observando uma constância de valores das áreas de histerese. Foi então adotado, além do tempo de mistura de 100s, um pré-cisalhamento executado no reômetro, como proposto por Williams et al. [39], para quebrar as estruturas das partículas antes do ensaio. Segundo estes autores, o pré-cisalhamento funciona como um misturador de alto-cisalhamento, o que torna a pasta mais homogênea.

3.4.3 Determinação da utilização de pré-cisalhamento no reômetro

A segunda definição foi o emprego de um pré-cisalhamento feito pelo

Tabela 8
Valores da área de histerese do ensaio de fluxo

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

reômetro antes de cada ensaio. Utilizou-se a mistura efetiva de 100 segundos no misturador e antes de cada ensaio de 3 ciclos a amostra era submetida a um pré-cisalhamento. Foram realizados vários procedimentos de pré-cisalhamento da mistura (PM), variando o tempo e a taxa de cisalhamento para uma análise mais detalhada. Através dos ensaios, as curvas tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento foram analisadas e foi possível calcular a área de histerese de cada ciclo bem como a tensão de escoamento do primeiro ciclo de cada. Os valores de área de histerese e, cada ciclo e para cada taxa de pré-cisalhamento são apresentados na Tabela 7 e Figura 5.

Observando o gráfico, nota-se que o último processo de mistura (PM 4) apresenta resultados mais constantes entre os três ciclos de carregamento com uma menor área de histerese. Isso significa que a mistura foi eficaz com energia suficiente para quebrar todos os aglomerados nessa etapa, após um tempo e uma taxa de cisalhamento maiores, apresentando maior homogeneização [39]. Dessa forma, foi definido como procedimento de mistura para produção de pastas cimentícias o tempo de mistura no misturador de 100 segundos com pré-cisalhamento de 100s⁻¹ por 2 minutos pré-estabelecido no programa do reômetro para ser executado antes de cada ensaio acontecer.

3.5 Ensaio de fluxo

Os ensaios foram realizados em regime permanente, isto é, as propriedades em uma dada seção do escoamento não se alteram com o decorrer do tempo. Como o cimento está em constante hidratação e liberação de calor, foi escolhido um estágio em que é observada uma baixa taxa de liberação de calor denominado período de indução ou dormência com duração aproximada de 30 minutos a 3 horas. Esse período de indução é observado após os primeiros 20 minutos de hidratação do cimento. Por essa razão foi escolhido o tempo de hidratação de 20 minutos contados a partir do contato do cimento com a água para a realização dos ensaios. Para a realização dos ensaios de fluxo foi utilizado um reômetro rotacional modelo AR 2000ex (TA Instruments). Foi escolhida a geometria de placas paralelas, que possui diâmetro de 40 mm e espaçadas de 1 mm. Para evitar a evaporação da água e manter a temperatura da amostra em 23 °C durante o ensaio, utilizou-se um dispositivo protetor (peltier). Para impedir o deslizamento da amostra foi fixado na superfície de cada placa um adesivo texturizado, constituído de um adesivo acrílico e de abrasivos artificiais de grãos nº 60 (óxido de alumínio) aplicados sobre um filme de poliéster e protegido por um revestimento de papel siliconado.

Tabela 9
Valores de tensão de escoamento do ensaio de fluxo

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

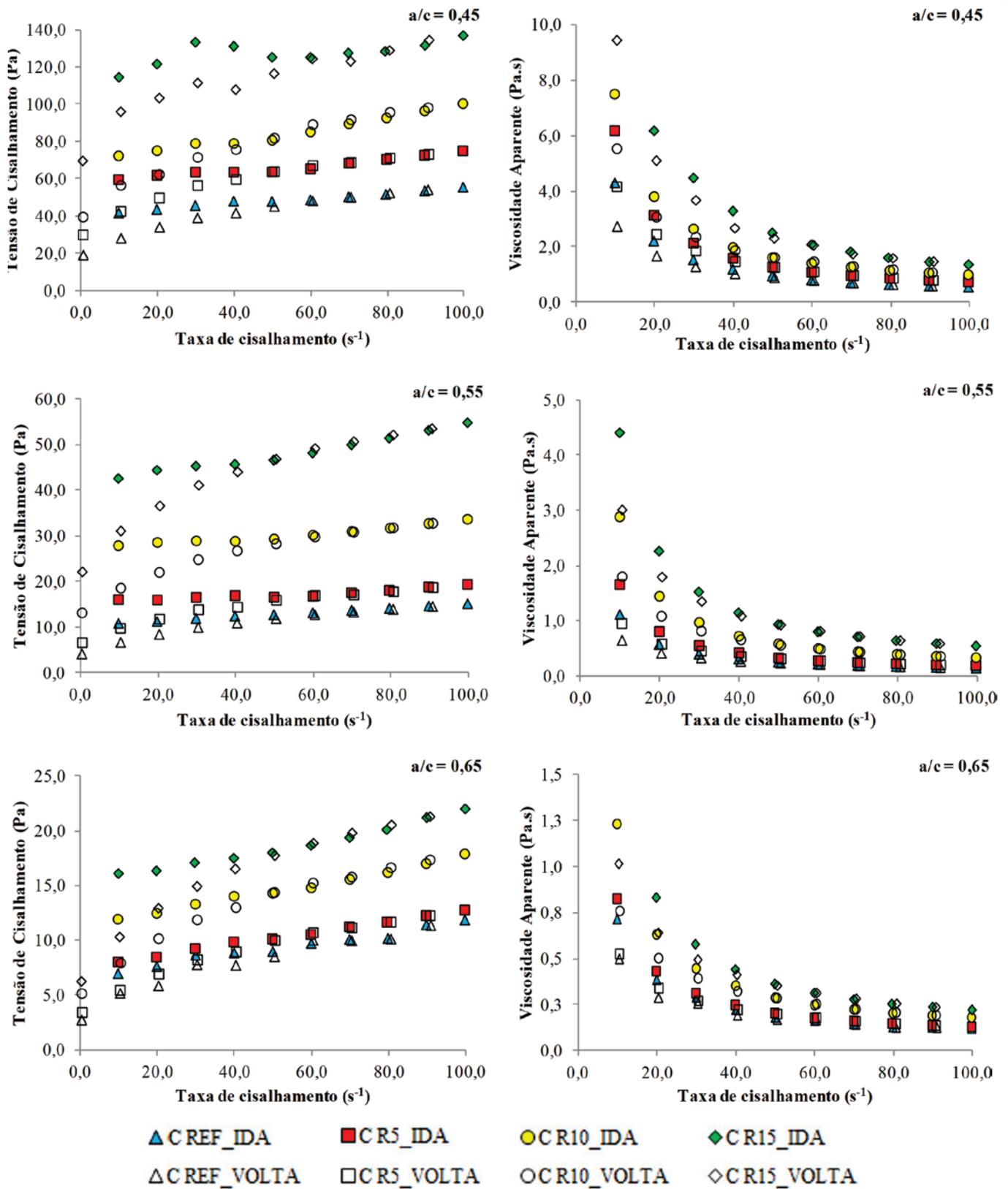


Figura 6

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

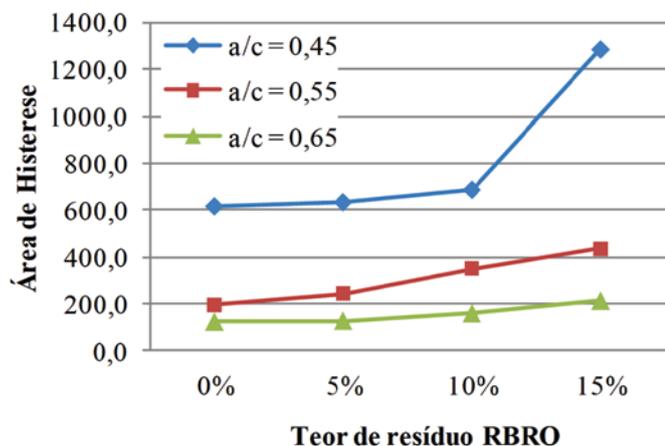


Figura 7 Gráfico da área de histerese vs. teor de resíduo

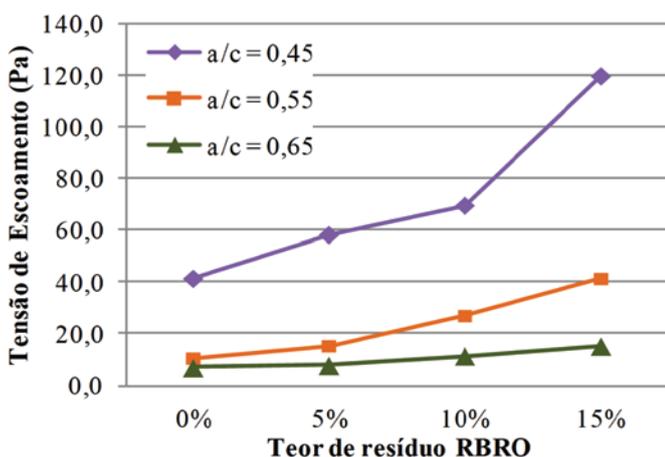


Figura 8 Gráfico da tensão de escoamento vs. teor de resíduo

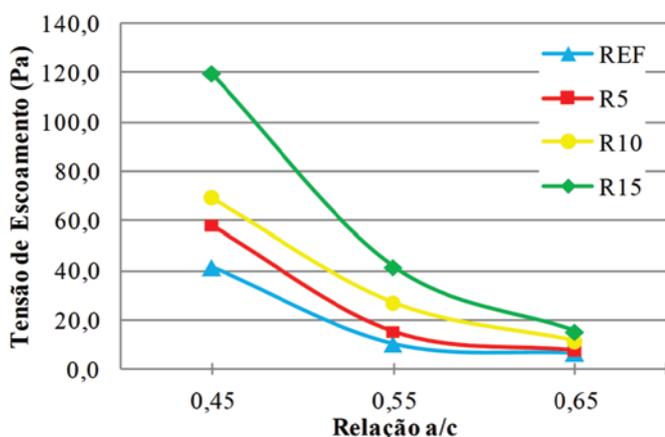


Figura 9 Gráfico da tensão de escoamento vs. relação água/cimento

Tabela 10

Valores de abatimento de tronco de cone obtidos por Soares [35] relacionados com a tensão de escoamento do ensaio de fluxo

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

No ensaio de fluxo, a amostra foi submetida a uma variação da taxa de cisalhamento primeiramente crescente de 0 a 100 s⁻¹ (curva de aceleração) por 2 minutos e, imediatamente depois, submetida a uma desaceleração até 0, em mais 2 minutos. Foram traçadas as curvas tensão versus taxa de cisalhamento e viscosidade versus taxa de cisalhamento e, assim, pode-se determinar as propriedades reológicas do material, tais como viscosidade e tensão de escoamento. Além de se verificar o efeito da relação a/c nas propriedades reológicas, foi verificado também o efeito da hidratação do cimento no seu comportamento reológico.

4. Resultados e discussões

4.1 Análise dos parâmetros reológicos

Na Figura 6 são apresentados os resultados de ensaios de fluxos para as 12 pastas cimentícias estudadas.

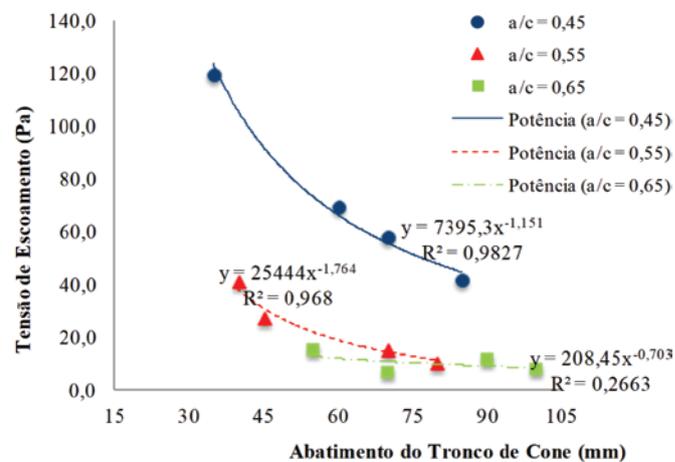


Figura 10 Gráfico da tensão de escoamento obtida na presente pesquisa vs. abatimento de tronco de cone obtidos por Soares [35]

Em uma análise inicial, observa-se que as amostras se comportam como um fluido não newtoniano, pois a tensão de cisalhamento varia não-linearmente com a taxa de cisalhamento. Observa-se um comportamento de um fluido pseudoplástico, apresentando uma diminuição da viscosidade aparente quando há um aumento da taxa ou da tensão de cisalhamento.

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

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

Na Figura 7, é notável que a relação água/cimento 0,65 apresentou a menor área de histerese, em todos os teores de resíduo. Isso significa que houve quebra dos aglomerados, apresentando maior homogeneização.

Após a observação dos gráficos, foi possível calcular a área de histerese de cada ciclo (Tabela 8), que consiste na área entre as curvas de aceleração e desaceleração do gráfico de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento.

Na Tabela 9 e Figura 8 são apresentados os resultados dos valores de tensão de escoamento obtidos. É possível notar que as pastas têm um comportamento de fluido com ponto de escoamento com altos valores de tensão de escoamento, pois esse tipo de fluido necessita de uma tensão de cisalhamento mínima para dar início ao seu escoamento.

Analisando o efeito da relação a/c , verifica-se que a tensão de escoamento é praticamente constante na relação $a/c = 0,65$, mostrando sua homogeneidade mesmo com a adição do resíduo RBRO, como apresentado na Figura 9. Assim, espera-se que mesmo após a adição de resíduo em teores elevados (15%), a trabalhabilidade da mistura não é afetada caso seja utilizada uma relação a/c de 0,65. Já para relações a/c menores, espera-se uma redução da trabalhabilidade por causa de uma maior aglomeração das partículas.

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

4.2 Correlação entre parâmetros reológicos da pasta cimentícia com a trabalhabilidade do concreto no estado fresco

Correlacionando os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone de concretos com adição de resíduo no estado fresco obtidos por Soares [36] e a tensão de escoamento de pastas cimentícias de cada traço obtida na presente pesquisa, a Tabela 10 e a Figura 10 foram estabelecidas. É importante mencionar aqui que a correlação é feita utilizando os resultados de abatimento de tronco de cone obtidos por Soares [36] para concretos no estado fresco enquanto o presente estudo mostra valores de tensão de escoamento da fase da pasta cimentícia destes concretos, i.e., somente água misturada a cimento e resíduo (quando em avaliando

pastas com resíduos), utilizando o mesmo tipo de cimento, relação a/c e proporção destes materiais para os dois estudos.

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

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

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

5. Conclusões

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

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

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

O resíduo de rochas ornamentais estudado apresentou a caracterização física de um material pulverulento com poder de efeito filer em matrizes cimentícias. Na caracterização química, ele se mostrou sílico-aluminoso formado por compostos cristalinos com baixa atividade reativa, indicando estabilidade química. Conclui-se, portanto, que o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, no seu estado natural, pode ser considerado como uma adição mineral de preenchimento (fíler) dos poros inter-granulares por não possuir atividade química e ter uma alta superfície específica. Em relação ao procedimento de mistura ideal das pastas cimentícias, na análise do tempo de mistura das pastas cimentícias, a área de histerese encontrada para os dois tempos de mistura (100 e 300 segundos) não variaram significativamente e que os valores encontrados em cada ciclo eram ainda dispersos. Foi então adotado, além do tempo de mistura de 100s, um pré-cisalhamento executado no reômetro e observou-se que dentre diferentes tem-

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

Realizados os ensaios de fluxo, observou-se que as amostras se comportam como um fluido não newtoniano, pseudoplástico e tixotrópico. É possível observar que o resíduo C R15 (15% de resíduo) apresenta os maiores valores de tensão de cisalhamento e viscosidade. Isso se deve a finura do RBRO, preenchendo os poros inter-granulares, o que dificulta o escoamento inicial (tensão de escoamento maior) do fluido. Quando se aumenta a relação água cimento, há uma queda significativa da tensão de escoamento. Isso ocorreu pelo aumento da quantidade de água adicionada na pasta, apresentando um fluido menos viscoso, com maior trabalhabilidade e fluidez. Contudo, na relação a/c de 0,65, a tensão de escoamento é praticamente constante, mostrando sua homogeneidade mesmo com a adição do resíduo.

Observou-se também que a os valores de tensão de escoamento e os valores de consistência dos respectivos traços estão inversamente proporcionais. Com o aumento do teor de RBRO, diminui o abatimento e aumenta a tensão de escoamento. Isso confirma que o resíduo se comportou como um filler, tornando a amostra mais viscosa e com menor trabalhabilidade, pois preenche os vazios inter-granulares na matriz. Acredita-se que o uso deste tipo de correlação, com base em análise de parâmetros reológicos pode levar a medidas do grau de trabalhabilidade de uma maneira mais científica.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPES pelo apoio financeiro e também as equipes de laboratório do LEMAC-UFES pelo suporte técnico.

7. Referências bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- [2] NUNES, R. L. S.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Reciclagem de resíduos de granito para uso na indústria de revestimentos cerâmicos. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 46, 2002, São Paulo. Anais... São Paulo, 2002, p. 1-13.
- [3] CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; SOUZA, F. L. S.; SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. Reciclagem de resíduos provenientes do corte de granito na produção de argamassas de assentamento. In: Revista Engenharia, Ciência & Tecnologia, Vitória, v. 2, p. 1-7, 1998.
- [4] 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.
- [5] ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; SANTOS, J. R.. Recycling of stone slurry in industrial activities: application to concrete mixtures. In: Building and Environment, Lisboa, v. 42, n. 2, p. 810-819, fev. 2007.
- [6] ALVES, M. S. Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos. 2008. 133p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- [7] ALZBOON, K. K.; MAHASHEH, K. N. Effect of using stone cutting waste on the compression strength and slump characteristics of concrete. In: International Journal of Civil and Environmental Engineering, Jordânia, v. 1, n. 4, p. 168-173, 2009.
- [8] 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.
- [9] BINICI, H.; KAPLAN, H.; YILMAZ, S. Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. In: Scientific Research and Essay, Turquia, v. 2, n. 9, p. 372-379, set. 2007.
- [10] 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.
- [11] LISBÔA, E. M. Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas. 2004. 121f. 109. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.
- [12] LOPES, J. L. M. P.; BACARJI, E.; PAZINI A. E. J.; RÊGO, J. H. S.; PEREIRA, A. C. Estudo do potencial de utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como filler, para a produção de concretos. In: Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão da UFG, 3, 2006, Goiânia. Anais... Goiânia: COMPEEX, 2006.
- [13] _____. NBR 7212: Execução de concreto dosado em central. Rio de Janeiro, 1984.
- [14] _____. NBR NM 67: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- [15] 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.
- [16] BINGHAM, E. C. The new science of rheology. In: Review of Scientific Instruments, v. 4, n. 9, p. 473-476, set. 1933.
- [17] AULTON, M. E. Delineamento de formas farmacêuticas. 2. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2008.
- [18] CORRÊA, N. M.; CAMARGO JÚNIOR, F. B.; IGNÁCIO, R. F.; LEONARDI, G. R. Avaliação do comportamento reológico de diferentes géis hidrofílicos. In: Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas, v. 41, n. 1, jan./mar. 2005.
- [19] LABA, D. Rheological properties of cosmetics and toiletries. New York: Marcel Dekker, 1993, p. 09-33.
- [20] LEONARDI, G. R.; MAIA CAMPOS, P. M. B. G. Estabilidade de formulações cosméticas. In: International Journal Pharmaceutical Compounding, v. 3, n. 4, p.154-156, 2001.

- [21] 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.
- [22] CAVALCANTI, D. J. H. Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais. 2006. 141f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.
- [23] SATO, V. Y.; EVANGELISTA, K. T. C.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; TRISTÃO, F. A. Estudo das propriedades reológicas de pastas de cimento de concretos bombeados. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 54., 2012, Maceió. Anais... Maceió: IBRACON, 2012.
- [24] TEIXEIRA, J. E. S. L.; SATO, V. Y.; AZOLIN, L. G.; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L.; CALMON, J. L. Estudo do comportamento reológico de pastas cimentícias utilizando reômetro de cisalhamento dinâmico. In: *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, São Paulo, v. 7, n. 6, p. 922-939, dez. 2014.
- [25] VENÂNCIO, P. B. F. Dosagem de argamassa para estaca raiz. 2008. 173f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2008
- [26] DE LARRARD, F.; SEDRAN, T.; HU, C.; SZITKAR, J. C.; JOLY, M.; DERKX, F. Evolution of the workability of superplasticized concretes: assessment with the BTRHEOM rheometer. In: *International Rilem Conference – Production Methods and Workability of Concrete*, 1996, Paisley/Scotland. Proceedings... London: E & FN Spon, jun. 1996, p. 377-388.
- [27] REIS, J. F. A. Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado: estudo de caso. 2008. 177f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.
- [28] _____. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991
- [29] _____. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos Rio de Janeiro, 2004.
- [30] _____. NBR NM 26: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.
- [31] NITA, C.; HOHN, V.M. Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/451*. ISSN 0103-9830. São Paulo, SP, 2007.
- [32] DE AZEREDO, S. R.; BOBROVNITCHII, G. S.; GUIMARÃES, R. S.; FILGUEIRA, M. Desenvolvimento de um novo compósito abrasivo de desbaste de rochas ornamentais. In: *Revista Matéria*, v. 13, n. 1, p. 203-208, 2008.
- [33] _____. NBR 12653: Materiais Pozolânicos - Especificação. Rio de Janeiro, 2014.
- [34] 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.
- [35] SOARES, R. B. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais. 2014. 163f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- [36] 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.
- [37] FRANÇA, M. S.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Avaliação do comportamento de mistura de argamassas através de reometria rotacional. In: *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 165-174, abr./jun. 2012.
- [38] 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.
- [39] WILLIAMS, D. A.; SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M. The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste. In: *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 9, p. 1491-1496, jun. 1999.