

Study of cement pastes rheological behavior using dynamic shear rheometer

Estudo do comportamento reológico de pastas cimentícias utilizando reômetro de cisalhamento dinâmico



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

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

L. G. AZOLIN^a
lu_gagno@hotmail.com

F. A. TRISTÃO^a
fernandoavancini@ct.ufes.br

G. L. VIEIRA^a
geilma.vieira@gmail.com

J. L. CALMON^a
calmonnt@npd.ufes.br



Abstract

Concrete, in its fresh state, has flow characteristics that are crucial to its proper launch and densification. These characteristics are usually measured through empirical testing as the slump test, but this test does not quantify completely the material behavior. Since this material is characterized as a Bingham fluid, it is essential the study of its rheological behavior to verify its properties even in fresh state. The use of classical rheology has been employed by the scientific community to obtain rheological parameters determinants to characterize this material, such as yield stress, plastic viscosity and evolution of shear stress to shear rate. Thus, this present study aims to determine the rheological behavior of different cement pastes produced with cement CP III 40 RS, varying between them the hydration periods (20 and 60 min), the water-cement ratio (0.40, 0.45 and 0.50) and the use or not of additive. Samples were assayed by flow test to determine the rheological parameters showing the effect of the variables mentioned above in these parameters.

Keywords: rheology, cement paste, viscosity, shear stress.

Resumo

O concreto, em seu estado fresco, possui características de fluidez que são determinantes para seu correto lançamento e adensamento. Estas características são geralmente medidas através de ensaios empíricos como o abatimento de tronco de cone, porém este ensaio não quantifica totalmente o comportamento do material. Sendo o material caracterizado como fluido binghamiano, é fundamental o estudo de seu comportamento reológico para a verificação de suas propriedades ainda no estado fresco. O uso da reologia clássica tem sido empregado pela comunidade científica de forma a obter parâmetros reológicos determinantes na caracterização deste material, tais como a tensão de escoamento, viscosidade plástica e evolução da tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo verificar o comportamento reológico de diferentes pastas cimentícias produzidas com o cimento CP III 40 RS e variando-se entre elas o tempo de hidratação (20 e 60 min), a relação água-cimento (0,40; 0,45 e 0,50) e com e sem incorporação de aditivo. Amostras foram ensaiadas através de ensaios de fluxo para determinação dos parâmetros reológicos, mostrando o efeito das variáveis acima mencionadas nestes parâmetros.

Palavras-chave: reologia, pasta de cimento, viscosidade, tensão de cisalhamento.

^a Department of Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo, Vitória – ES – Brasil.

1 Introdução

É sabido que o concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo. Sua aplicação abrange diversas áreas da construção civil. Basicamente, pode-se definir o concreto como um material compósito formado pela mistura de um aglomerante (cimento), agregados miúdos, agregados graúdos, água e ar, podendo conter adições e aditivos químicos para melhorar ou modificar algumas de suas propriedades. As propriedades desse material compósito são influenciadas pelas propriedades de seus constituintes e o estudo destas é de grande importância para a determinação das características ideais do concreto a ser utilizado em obra.

Para a utilização do concreto é desejável que este tenha, entre outras características, trabalhabilidade adequada. Essa característica é dependente de vários fatores, tais como do projeto de misturas, dos equipamentos a serem utilizados no lançamento do material, do acabamento a se realizar e das condições locais. O concreto deve ter coesão e viscosidade adequada, para que seja possível realizar seu transporte sem que ocorram situações indesejadas que prejudiquem sua qualidade, como a segregação de seus constituintes.

Assim, o concreto é um material que exige atenção especial, desde a fase de especificação até a cura, pois muitas vezes possui função estrutural. A norma NBR 7212 (ABNT, 1984) determina que o tempo limite para executar o lançamento do concreto seja 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 em campo é o teste de abatimento de tronco de cone (Slump test), normatizado na NBR NM 67 (ABNT, 1998). Contudo, algumas propriedades reológicas do concreto, tais como viscosidade, tensão de cisalhamento, tensão de escoamento, entre outras, não são possíveis de se obter através desse ensaio. Entretanto, o emprego de equipamentos automatizados e controlados, tais como os reômetros, garante a obtenção de informações mais precisas a respeito do fluido estudado.

A reologia é o ramo da física que analisa os efeitos provocados um material através de aplicações de uma tensão ou deformação, procurando entender as relações entre tensão, deformação, taxa de deformação e tempo. Há uma preocupação quanto à mecânica de corpos deformáveis que podem estar no estado sólido, líquido ou gasoso (MARTINS, 2004; COSTA, 2006; SCHRAMM, 2006). O estudo da reologia, na prática, está voltado para os materiais que apresentam propriedades do escoamento mais complexas do que as de um fluido simples (líquido ou gás) ou as de um sólido elástico ideal, apesar de que, dependendo das condições que o ensaio é realizado, o material terá um comportamento simples ou complexo (CASTRO, 2007).

Segundo De Larrard et al. (1996), a finalidade de se utilizar um reômetro não é apenas medir o maior número de parâmetros possíveis, mas avaliar quantidades físicas que possam estar cientificamente relacionadas aos vários estágios de utilização do concreto. Reis (2008) afirma que essa tensão de cisalhamento está diretamente relacionada com o ensaio de abatimento de tronco de cone. Outro parâmetro reológico analisado 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 (CASTRO et al., 2011).

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

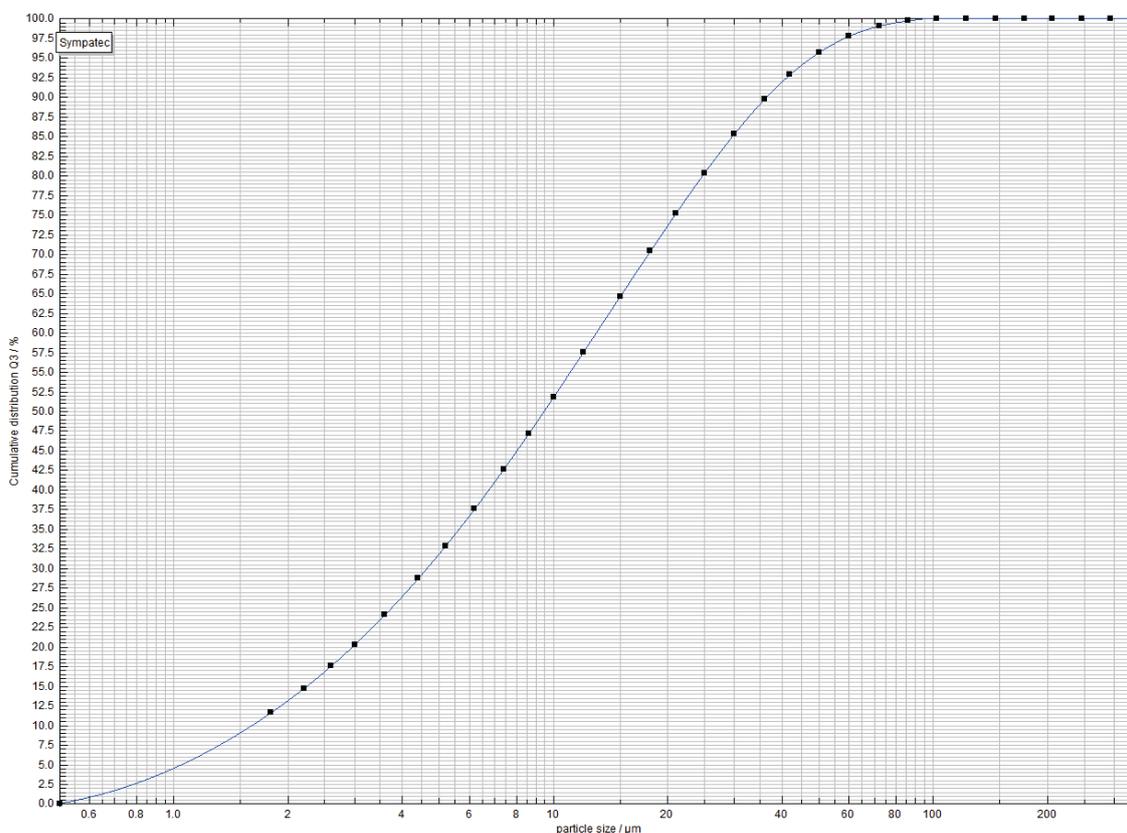
Para a determinação dos parâmetros reológicos da pasta cimentícia, tais como tensão de escoamento, viscosidade aparente, perfil reológico do material e, ainda, os efeitos da consolidação desse material associados à hidratação do cimento, a literatura propõe alguns testes como, por exemplo, ensaio de fluxo, ensaio oscilatório (varredura de tempo e varredura de deformação) e ensaio de palheta ou Vane test (SATO et al., 2012; LISBÔA, 2004; CAVALCANTI, 2006; VENÂNCIO, 2008; SAAK et al., 2001; BETIOLI et al., 2009). Apesar do número cada vez crescente de estudos que visam à análise do comportamento do concreto em seu estado fresco, o uso de ferramentas e ensaios baseados na reologia rotacional ainda é incipiente.

O concreto no seu estado fresco pode ser considerado um fluido e, por conseguinte, os princípios básicos da reologia podem ser aplicados a este material (METHA, 1986). Os fatores mais importantes que causam incompatibilidades de concreto podem ser resumidos como a quantidade de C3A; o tipo e a quantidade de sulfato de rolamento no cimento; álcalis solúveis em água (Na⁺, K⁺), tanto a partir do cimento quanto do aditivo; o tipo e a dosagem de ambos, como misturas minerais; a temperatura de pasta de cimento e a relação água/cimento. Alguns pesquisadores (FERRARIS, 1996; ZHANG, 2001; CHEN, STRUBLE, ZHANG, 2006) relataram a sensibilidade dos parâmetros reológicos para os fatores acima mencionados.

Para a análise dos parâmetros reológicos de pastas e argamassas cimentícias, alguns parâmetros devem ser cuidadosamente definidos. O tempo e a energia de mistura na fabricação de misturas, por exemplo, influenciam significativamente nas propriedades reológicas do material. Em sua pesquisa, França, Cardoso e Pileggi (2011 e 2012) mencionam que quanto maior o tempo de mistura, mais eficiente é o processo de mistura devido à maior energia envolvida no processo, produzindo um material disperso (menor o tamanho das unidades móveis, partículas ou aglomerados), homogêneo, estável e um comportamento mais fluido. A mistura de pasta de cimento deve imitar o cisalhamento que é submetido no concreto. Bhattacharja e Tang (2000) também relataram a utilização de um misturador de alto cisalhamento para preparação da pasta de cimento simulando o efeito de cisalhamento.

Levando em consideração a necessidade de uma avaliação mais abrangente das propriedades do concreto no seu estado fresco, esta pesquisa busca fazer a análise das propriedades reológicas de pastas cimentícias através da realização de ensaio de fluxo utilizado o reômetro de cisalhamento dinâmico como principal equipamento de ensaio. Assim, propriedades reológicas de pastas produzidas com diferentes relações água-cimento com e sem incorporação de

Figura 1 - Curva granulométrica do cimento Portland CP III 40 RS



aditivos serão analisadas para verificar os efeitos destes constituintes no comportamento reológico de pastas cimentícias.

2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo verificar o comportamento reológico de diferentes pastas cimentícias produzidas através da mistura de água e cimento Portland, com e sem incorporação de aditivos, de forma a se verificar a influência destes constituintes nos parâmetros reológicos analisados (tensão de escoamento, viscosidade aparente, perfil reológico do material e efeitos da consolidação desse material associados à hidratação do cimento). Na composição dessas pastas foram utilizadas diferentes relações água-cimento (0,40; 0,45 e 0,50), com e sem incorporação de aditivo. Além disso, as pastas foram ensaiadas em diferentes tempos de hidratação (20 e 60 min), para que também fosse possível a verificação do efeito da hidratação do cimento nas propriedades reológicas das pastas cimentícias estudadas.

3. Materiais e métodos

3.1 Materiais

Para a realização desta pesquisa utilizou-se o cimento CP III 40 RS, classificado como cimento Portland de Alto Forno resistentes à sulfatos

de acordo com a norma NBR 5735 (ABNT, 1991). Para caracterização granulométrica do material, foi realizado ensaio utilizando um granulômetro (modelo Sympatec®) de difração a laser, cuja lente realiza leituras em materiais na faixa de 1,8 a 350 µm. A Figura 1 mostra a curva de distribuição granulométrica obtida para o cimento utilizado neste estudo. O aditivo incorporado nas pastas cimentícias estudadas foi o GLENIUM® 51 (da empresa BASF S. A.), que é um superplastificante à base de éter policarboxílico. A água utilizada neste trabalho foi obtida diretamente da rede de água da concessionária.

Tabela 1 - Relações a/c e quantidade de aditivo nas pastas analisadas

Pasta cimentícia	Relação a/c	Aditivo
Pasta 1	0,40	-
Pasta 2	0,45	-
Pasta 3	0,50	-
Pasta 4	0,40	0,2 %
Pasta 5	0,45	0,2 %
Pasta 6	0,50	0,2 %

Tabela 2 – Processo de mistura dos materiais

Procedimento	Tempo inicial (s)	Tempo final (s)
Junção de cimento com a água	0	30
Mistura com mixer	30	60
Limpeza e espera	60	120
Mistura com mixer	120	150

3.2 Composição e preparação das pastas cimentícias

Nesta pesquisa foram analisadas amostras de pastas cimentícias com três relações a/c distintas, com e sem acréscimo de aditivo. Na Tabela 1 são apresentados os valores de relação a/c e a quantidade de aditivo determinada para cada amostra utilizada no ensaio de fluxo.

3.2.1 Procedimento de mistura

Como ainda não há um método normatizado de mistura para a produção de pastas cimentícias a serem utilizadas na determinação das propriedades reológicas utilizando reômetro de cisalhamento dinâmico, foi adotado na presente pesquisa o procedimento de mistura das pastas cimentícias segundo a norma NBR 13276 (ABNT, 2005) que se trata do preparo da mistura e determinação do índice de consistência da argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. As massas dos materiais foram estabelecidas numa balança eletrônica digital de precisão de 0,01g. Utilizou-se um misturador mecânico para garantir a homogeneização da amostra. De acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2005), primeiramente, pesou-se separadamente a quantidade de água e cimento com apro-

ximação de 1,0g. Em seguida acrescentou-se na água a porção específica de cimento correspondente à relação a/c estudada, de modo contínuo num período de 30 segundos. Após a junção dos materiais, estes foram misturados com um mixer por 30 segundos e então o equipamento foi desligado. Limpou-se o mixer e esperaram-se mais 60 segundos e, por fim, ligou-se o equipamento e misturou-se por mais 30 segundos de forma a obter um a pasta homogênea. Nas pastas compostas também pelo aditivo, este foi incorporado à pasta após o término da mistura mencionada anteriormente, e a nova mistura foi homogeneizada com a espátula por 30 segundos. A Tabela 2 mostra as etapas executadas para preparação das pastas cimentícias.

Após todo o processo de mistura, as amostras foram mantidas em recipientes herméticos até a realização dos ensaios para que não houvesse perda de umidade para o meio. Antes de cada ensaio, a pasta era misturada novamente da seguinte forma: 30 segundos com o mixer, 15 segundos com a espátula e 30 segundos com o mixer novamente, a fim de manter sua homogeneidade.

3.3 Ensaio de fluxo

Através do ensaio de fluxo é possível obter a tensão de cisalhamento a uma dada taxa de cisalhamento. O ensaio consiste na aplicação de uma taxa crescente de cisalhamento com aceleração de 0 a 100 s⁻¹ em 2 min seguida de uma desaceleração até 0, em mais 2 min, como ilustrada na Figura 2.

A partir da variação desses parâmetros, pode-se traçar o perfil reológico dos materiais e assim determinar importantes propriedades reológicas, tais como viscosidade aparente (η_{ap}), tensão de escoamento (σ_0) e área de histerese (AH). A viscosidade aparente das pastas cimentícias foi avaliada na máxima taxa de cisalhamento aplicada, que neste estudo foi de 100 s⁻¹. A tensão de escoamento foi aproximada pela extrapolação da curva de tensão de cisalhamento vs taxa de cisalhamento, até a taxa 0 s⁻¹.

Figura 2 – Rampa de 0 a 100 s⁻¹ em 2 minutos e até 0 s⁻¹ em mais 2 minutos (Betioli et al., 2009)

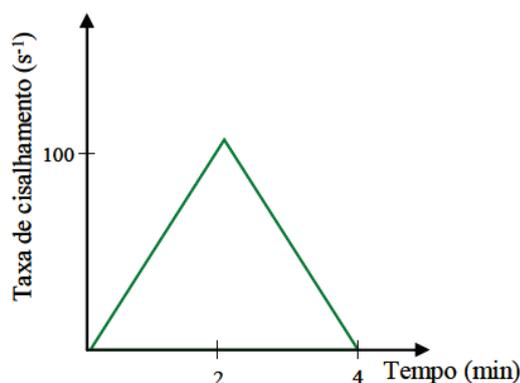
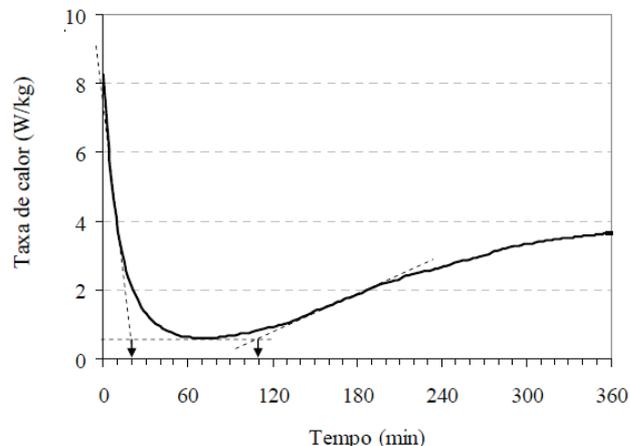


Figura 3 – Taxa de calor liberado durante 6 h de hidratação. O intervalo do período de indução ocorre entre 20 min e 110 min, aproximadamente (Silva, 2001)



Outro parâmetro analisado com os resultados do ensaio de fluxo é a área de histerese (AH). Esta área é formada através das curvas de aceleração e desaceleração no gráfico de tensão de cisalhamento vs taxa de cisalhamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000; BETIOLI *et al.*, 2012) e indica o grau de estruturação/desestruturação do sistema. Os ciclos de cisalhamento foram realizados em tempos predefinidos dentro do intervalo de indução ou dormência do cimento, o qual apresenta menor liberação de calor (KIRCHHEIM, 2008). Neste intervalo as reações de hidratação do cimento são consideradas controladas, o que permite considerar a conservação da massa no momento do ensaio. Silva (2001) determinou o período de indução entre 20 min e 110 min a partir das intersecções do trecho horizontal com duas retas: a reta traçada no período de pré-indução e a extrapolação da linha de regressão do período de aceleração, como apresentado na Figura 3.

Dessa forma, as pastas cimentícias foram ensaiadas em dois tempos distintos de hidratação do cimento (20 min e 60 min) dentro do intervalo de indução do material para análise dos efeitos da hidratação do cimento nas propriedades reológicas das pastas cimentícias. Para a realização dos ensaios de fluxo foi utilizado um reômetro de cisalhamento dinâmico. A geometria escolhida para o ensaio de fluxo foi a geometria de placas paralelas, que possui diâmetro de 40 mm e espaçadas de 1 mm. Para cada pasta estudada, foram ensaiadas três amostras. Na composição dos gráficos de tensão de cisalhamento vs taxa de cisalhamento e viscosidade vs taxa de cisalhamento utilizou-se a média aritmética dos valores das amostras. A partir da análise dos gráficos verificaram-se os efeitos da relação água-cimento, da incorporação do aditivo e da hidratação do cimento em seu comportamento reológico. Para evitar a evaporação da água e manter a temperatura da amostra em 25°C durante o ensaio, utilizou-se um dispositivo protetor (placa peltier). Foi fixado na superfície de cada placa um adesivo texturizado para impedir o deslizamento da amostra, como ilustrado na Figura 4.

4. Resultados e discussão

As Figura 5 e 6 ilustram a tensão de cisalhamento e a viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para as pastas cimentícias (com e sem aditivo) químico para cada tempo de hidratação (20 e 60 min) analisado neste estudo.

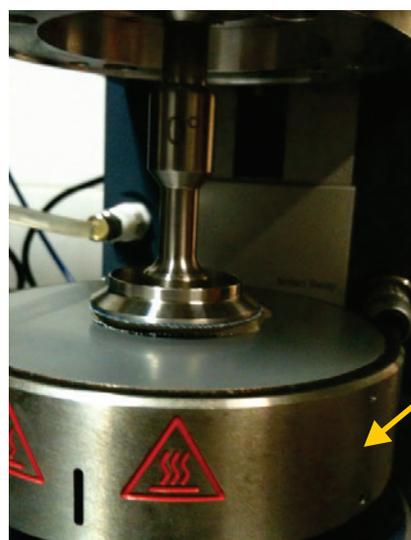
É possível perceber que as pastas cimentícias estudadas necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial (s_0) para iniciar o escoamento. Após superar esta tensão de escoamento, as pastas apresentam um comportamento não linear, mostrando uma tendência de comportamento de um fluido Herschel-Bulkley, também conhecido como Bingham generalizado.

Ao se analisar as áreas de histereses entre as curvas de aceleração e desaceleração do gráfico tensão de cisalhamento vs taxa de cisalhamento, é possível perceber que aos 20 minutos de hidratação, esta área é praticamente nula. Isso pode indicar o estado de dispersão das amostras. Áreas de histereses pouco significativas indicam que o processo de mistura adotado foi suficiente para a obtenção de uma amostra homogênea com a quebra de todos os aglomerados. Já aos 60 minutos de hidratação, percebe uma tendência de reestruturação destes aglomerados e dessa, forma, essa quebra se dá nos ciclos de cisalhamento impostos.

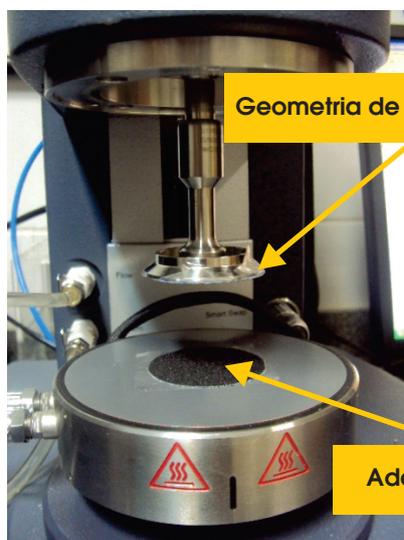
A ação do aditivo é percebida pela redução dos níveis de tensão de cisalhamento das amostras. Segundo Oliveira *et al.* (2003 *apud* França, Cardoso e Pilegi, 2012), os níveis de tensão requeridos para mistura de concretos são reduzidos ao se utilizar aditivos, pois estes possibilitam uma melhor dispersão das partículas.

Observa-se (Figura 6) que em todas as pastas a viscosidade aparente, obtida através da relação entre a tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento, diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, mostrando a natureza tixotrópica do material. Nas pastas que obtiveram o acréscimo do aditivo ficaram evidentes os efeitos da adição destes no comportamento reológico das pastas, como a

Figura 4 – Geometria de placas paralelas com peltier e adesivo texturizado



Placa Peltier



Geometria de placas paralelas

Adesivo texturizado

Figura 5 – Tensão de cisalhamento vs taxa de cisalhamento em pastas cimentícias: (a) sem aditivo e (b) com aditivo, ensaiadas nos tempos de hidratação de 20 e 60 minutos

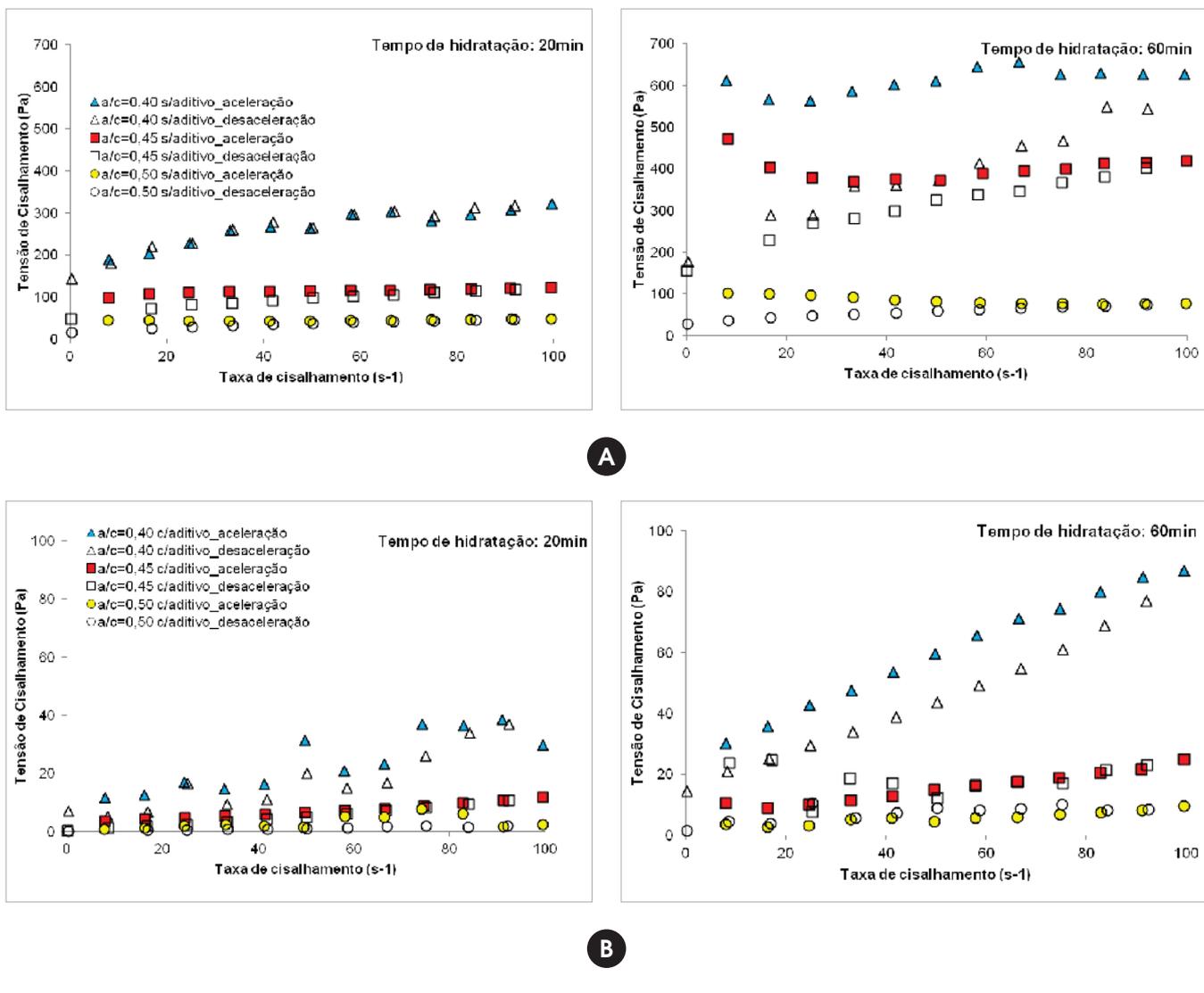


Tabela 3 – Propriedades reológicas das pastas cimentícias após tempo de hidratação de 20 min.

a/c	η_{ap} (Pa.s)		σ_0 (Pa.s)	
	Sem aditivo	Com aditivo	Sem aditivo	Com aditivo
0,4	3,2	0,29	143	8,5
0,45	1,2	0,11	47	2,48
0,5	0,48	0,02	15	0,2

Tabela 4 – Propriedades reológicas das pastas cimentícias após tempo de hidratação de 60 min.

a/c	η_{ap} (Pa.s)		σ_0 - Aceleração (Pa.s)	
	Sem aditivo	Com aditivo	Sem aditivo	Com aditivo
0,4	6,3	0,87	576	27
0,45	4	0,2	441	8
0,5	0,8	0,1	100	3

diminuição da viscosidade aparente, como mostrado na Figura 6, quando comparadas as pastas sem aditivos (Figura 5). Com a adição deste material, as pastas se tornaram mais fluidas, e mais susceptíveis a deformações excessivas quando submetidas a tensões de cisalhamento, tornando mais difícil a medição de valores de tensão de cisalhamento com o equipamento utilizado nesta pesquisa. A Tabela 3 e 4 apresenta os valores da viscosidade aparente e das tensões de escoamento obtidas para os tempos de 20 min e 60 min de hidratação, respectivamente.

É possível verificar que pastas sem aditivo e relação a/c de 0,40; 0,45 e 0,50 sofreram, respectivamente, um incremento de 4, 9 e 7 vezes nas suas tensões de escoamento quando atingiram a idade de hidratação de 60 min em comparação com a idade de hidratação de 20 min. O incremento no tempo de hidratação fez com que as pastas apresentassem uma estrutura mais aglomerada, devido ao

processo de hidratação das partículas de cimento, sendo portanto necessário a aplicação de uma maior tensão para iniciar o escoamento da pasta, fenômeno este refletido no incremento de valor da tensão de escoamento. Como esperado, as pastas sem aditivo exibiram maiores resistências ao escoamento quando comparadas às pastas com aditivos, valores estes que também refletiram nas viscosidades aparentes das pastas estudadas. A adição de aditivos plastificantes a base de policarboxilato causam dispersão das partículas de cimento, aumentando assim sua fluidez, efeito conhecido como repulsão elétrica. Assim, as pastas com aditivos se tornam mais fluidas, resultando numa expressiva diminuição dos valores de tensão de escoamento e viscosidade aparente quando comparamos pastas com mesma relação água-cimento.

A Figura 7 ilustra a correlação entre a tensão de escoamento e a relação água-cimento obtida neste estudo.

Figura 6 – Viscosidade aparente vs taxa de cisalhamento em pastas cimentícias: (a) sem aditivo e (b) com aditivo, ensaiadas nos tempos de hidratação de 20 e 60 minutos

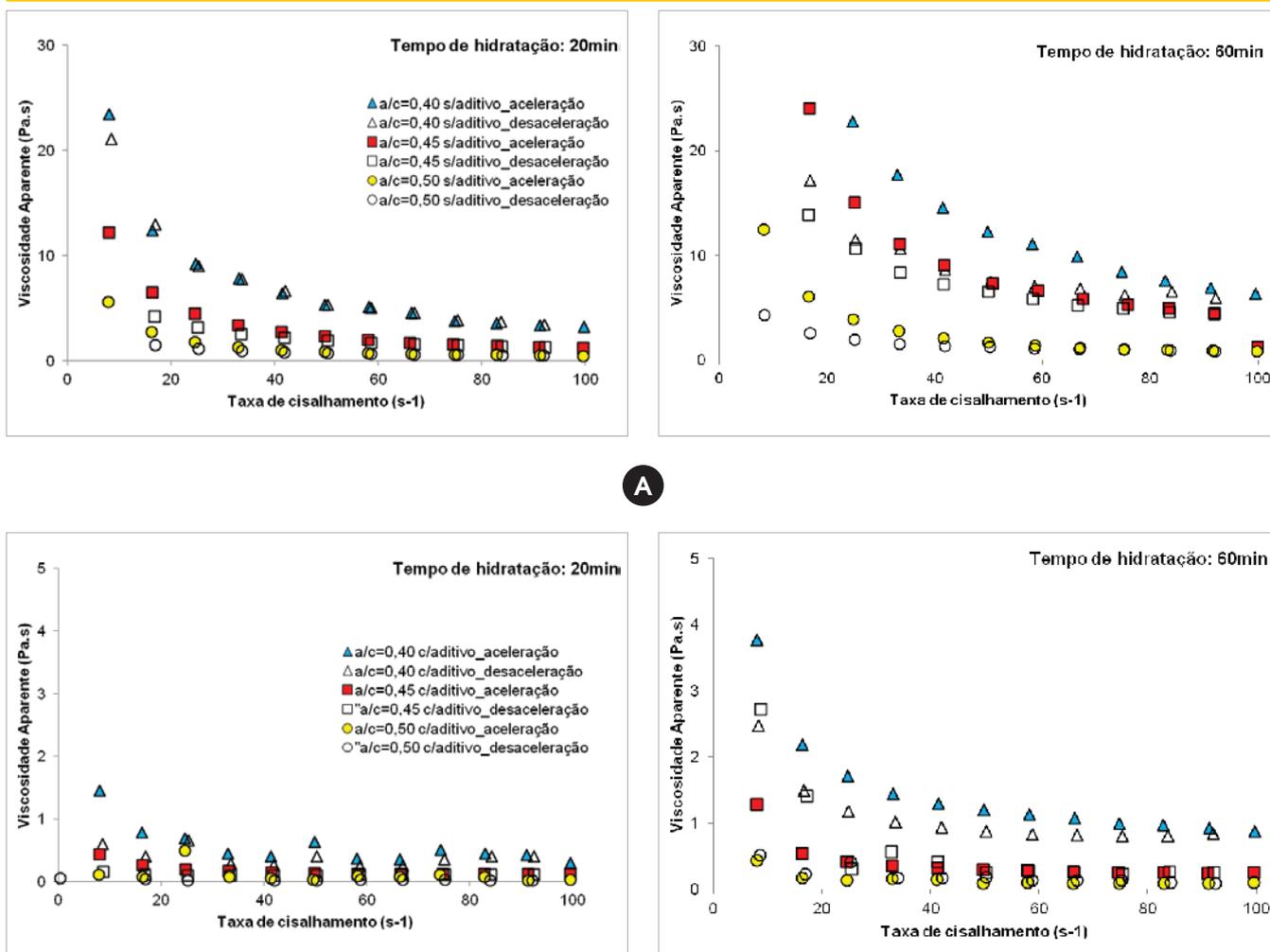
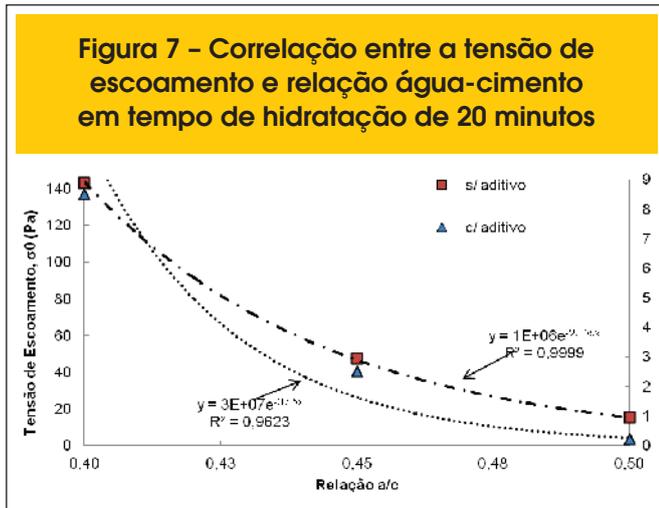


Figura 7 - Correlação entre a tensão de escoamento e relação água-cimento em tempo de hidratação de 20 minutos



É possível perceber uma tendência de correlação entre os parâmetros analisados utilizando uma função exponencial, tanto para pastas com e sem uso de aditivo. Os coeficientes de determinação (R^2) de 0,99 e 0,96 para as pastas sem e com aditivos, respectivamente, mostram uma correlação negativa forte entre a tensão de escoamento com a relação água-cimento. 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

Para uma melhor compreensão da influência de variáveis importantes na dosagem de misturas cimentícias (relação a/c, hidratação do cimento e uso de aditivos químicos) no comportamento de materiais à base de cimento, utilizou-se ensaios reológicos. O comportamento reológico pastas cimentícias é complexo, pois diversos fatores interferem nas suas propriedades como, por exemplo, o tipo de cimento e sua natureza reativa, a relação água/cimento utilizada, a presença de aditivos, as condições de mistura (velocidade, tempo, confinamento), entre outros.

O ensaio de fluxo é uma ferramenta eficaz para a determinação das propriedades reológicas de pastas cimentícias em laboratório uma vez que é possível solicitar as amostras com alta magnitude de cisalhamento. O que resultou em diferentes valores das propriedades reológicas (viscosidade aparente e tensão de escoamento).

Observou-se que a viscosidade aparente é maior em pastas com menor relação água/cimento entre as amostras sem incorporação de aditivo. As pastas que tiveram incorporação de aditivo mostraram viscosidades aparentes com pouca variação.

Verificou-se que as tensões de escoamento das pastas sem aditivo cresceram significativamente com a idade de hidratação.

Mostra-se necessária a realização de mais pesquisas para caracterização reológica de pastas cimentícias considerando o grande número de materiais que podem ser utilizados na confecção as mesmas.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo aporte finan-

ceiro, e ao Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção (LEMAC) do Centro tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo pelo apoio técnico e por disponibilizar a infraestrutura necessária para a realização desta pesquisa.

7. Referências

- [01] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Preparo da mistura e determinação do índice de consistência da argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos, 2005.
- [02] _____. NBR 5735: Cimento Portland de Alto Forno. Rio de Janeiro, 1991.
- [03] _____. NBR 7212: Execução de concreto dosado em central. Rio de Janeiro, 1984.
- [04] _____. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- [05] BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. An introduction to rheology. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 1993.
- [06] BETIOLI, A. M.; JOHN, V. M.; GLEIZE, P. J. P., PILEGGI, R. G. Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 37-48, out./dez. 2009.
- [07] BETIOLI, A. M. , GLEIZE, P. J. P., JOHN, V. M. , PILEGGI, R. G. Effect of EVA on the fresh properties of cement paste. Cement & Concrete Composites Vol. 34, 255–260, 2012.
- [08] BHATTACHARJA, S.; TANG, F. J. Rheology of cement paste in concrete with different mix designs and interlaboratory evaluation of the mini-slump cone test, PCA R&D, Serial No. 2412, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2000.
- [09] 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.
- [10] CASTRO A. L., LIBÓRIO J. B. L., PANDOLFELLI V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão. Revista Cerâmica, São Carlos, v. 57, p. 63-75, 2011.
- [11] 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.
- [12] CHEN, C.; STRUBLE, L. J.; ZHANG, H. Using dynamic rheology to measure cement-admixture interactions. Journal of ASTM International, West Conshohocken, v. 3, mar. 2006.
- [13] COSTA, M. R. M. M. Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos. 2006. 131f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [14] 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, 1996, p. 377-388.
- [15] FERRARIS, C. F. Measurements of rheological properties of high performance concrete: state of the art report. Journal of

- Research of the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, v. 104, n. 5, p. 461-478, 1996.
- [16] FRANÇA, M. S.; CARDOSO, 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.
- [17] 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.
- [18] GHIO, V. A.; MMONTEIRO P. J.; DEMSETZ, L. A. The rheology of fresh cement paste containing polysaccharide gums. *Cement Concrete Research*, Philadelphia, v. 24, n. 2, p. 243-249, 1994.
- [19] HACKLEY, V. A.; FERRARIS, C. F. Guide to rheological nomenclature: measurements in ceramic particle systems. NIST special publication, v. 946, 2001.
- [20] KIRCHHEIM, A.P. Aluminatos tricálcicos cúbico e ortorrômbico: análise da hidratação in situ e produtos formados. 2008. 265f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2008.
- [21] LISBÔA, E. M. Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas. 2004. 121f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.
- [22] MARTINS, A. L. P. Estudo das propriedades reológicas do muco brônquico de pacientes sob fisioterapia respiratória. 2004. 70f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fisioterapia. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.
- [23] METHA, P. K. *Concrete: structure, properties, and materials*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliff, New Jersey, p. 449, 1986.
- [24] NONAT, A.; MUTIN, J. C.; LECOQ, X.; JIANG, S. P. Physico-chemical parameters determining hydration and particle interactions during the setting of silicate cements. *Solid State Ionics*, v. 101-103, n. 2, p. 923-930, nov. 1997.
- [25] OLIVEIRA, I. R., STUDART, A. R., PILEGGI, R. G., PANDOLFELLI, V. C. *Dispersão e empacotamento de partículas: Princípios e aplicações em processamento cerâmico*. Fazendo Arte Editorial. 2000.
- [26] RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques, and applications*, Book 2001.
- [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] SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste. *Cement and Concrete Research*, Philadelphia, v. 31, n. 2, p. 205-212, fev. 2001.
- [29] 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.
- [30] SCHRAMM, G. *Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos*. 2. ed. São Paulo: Artiliber, 2006.
- [31] SILVA, D. A. Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento portland. 2001. 246f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Departamento de Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [32] TATTERSALL, G.H.; BANFILL P.F.G. *The Rheology of Fresh Concrete*, Pitman, p. 356, 1983.
- [33] 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.
- [34] ZHANG, H. *Using Dynamic Rheology to Explore the Microstructure and Stiffening of Cementitious Materials*, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.