

Influência do procedimento de ensaio na determinação das propriedades reológicas de pastas de cimento

Test procedure influence on the evaluation of rheological properties of cement pastes

Renan Serralvo Campos⁽¹⁾, Matheus Souza Silva⁽²⁾, Helmer Murra Caetano⁽²⁾, Geraldo de Freitas Maciel⁽³⁾

- ⁽¹⁾ *Doutorando, Departamento de Engenharia Mecânica, FEIS-UNESP*
⁽²⁾ *Graduando, Bolsista PIBIC, Departamento de Engenharia Civil, FEIS-UNESP*
⁽³⁾ *Professor Titular, Departamento de Engenharia Civil, FEIS-UNESP*
Avenida Brasil Sul, 56 – Centro, Ilha Solteira – São Paulo

Resumo

A caracterização reológica de pastas de cimento, argamassas e concretos envolve a determinação de parâmetros reológicos de suspensões complexas, compostas por diversos materiais constituintes que interagem entre si, sobre o ponto de vista químico e físico. Ainda é necessário considerar que diferentes condições de ensaio e de mistura, tais como, geometria do equipamento, temperatura, energia de mistura, protocolo de ensaio, entre outras, poderão influenciar na determinação das propriedades reológicas destes compósitos. O entendimento das propriedades reológicas da pasta de cimento pode prover informações importantes sobre sua microestrutura e interação entre seus componentes, sendo essencial para a completa compreensão do comportamento do concreto no estado fresco. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência do protocolo de ensaio na caracterização reológica de pastas de cimento. Para tanto, foram estabelecidos protocolos de ensaio distintos, com variação da taxa de deformação máxima (50 e 100s⁻¹) e do modo de aplicação do cisalhamento (linear e em patamares). A relação água/cimento das pastas analisadas foi 0,40, 0,50 e 0,60, em massa. Os resultados obtidos indicaram que o protocolo de ensaio exerce influência significativa na determinação dos parâmetros reológicos, sendo obtidos resultados mais reprodutíveis com a aplicação do cisalhamento em patamares e com a taxa de cisalhamento máxima igual a 100s⁻¹.

Palavra-Chave: reologia, pasta de cimento, reometria, procedimento de ensaio.

Abstract

The rheological characterization of cement pastes, mortars and concretes takes into account the rheological parameters of complex suspensions, composed by different materials which interact among themselves, under chemical and physical points of view. It is also necessary to consider that different test and mixing conditions, such as equipment geometry, temperature, mixing energy, test protocol, among others, may influence the determination of the rheological properties of these composites. Understanding the rheological properties of cement paste can provide important information about its microstructure and interaction between its components, being essential for a complete understanding of the concrete's behavior in the fresh state. In this sense, the aim of this study was to evaluate the influence of the test protocol on the rheological characterization of cement pastes. For this purpose, different test protocols were established, varying the maximum shear rate (50 and 100s⁻¹) and the shear application mode (linear and in steps). The water/cement ratio of the analyzed pastes was 0.40, 0.50 and 0.60, by weight. The results obtained indicated that the test protocol has a significant influence on the determination of the rheological parameters, with more reproducible results being obtained with the application of shear in steps and the maximum shear rate equal to 100s⁻¹.

Keywords: rheology, cement paste, rheometry, test procedure.



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

1. Introdução

Concretos e argamassas podem ser descritos como materiais de natureza multifásica, compostos por uma suspensão coloidal (pasta de cimento), pela fração granular (agregados) e pelo ar aprisionado. Adições minerais, aditivos químicos e fibras podem ser empregados a fim de ressaltar ou inibir determinadas propriedades destes compósitos.

Para que os materiais cimentícios atendam aos requisitos de consistência, resistência e durabilidade que lhes são esperados, em função de sua aplicação, é necessário o correto proporcionamento dos materiais constituintes, assim como o controle efetivo de suas propriedades nos estados fresco e endurecido. No entanto, em geral, o controle de qualidade dos compósitos cimentícios se dá, em maior frequência, exclusivamente no estado endurecido por meio de ensaios de resistência à compressão (GEYER; SÁ, 2006; MACIEL; BARBOSA; PEREIRA, 2016).

A caracterização dos materiais à base de cimento no estado fresco é executada por meio de ensaios empíricos (abatimento de tronco de cone, funil V, cone de Marsh, caixa L, etc.), que têm por finalidade qualificar propriedades como consistência, capacidade de escoamento, bombeabilidade, habilidade passante, entre outras, e até mesmo inferir algum parâmetro reológico fundamental (viscosidade e/ou tensão limite de escoamento) (TOUTOU; ROUSSEL, 2006). Contudo, os testes empíricos não são capazes de caracterizar completamente o comportamento reológico dos materiais cimentícios. Para tanto, é necessário recorrer aos ensaios reométricos, nos quais é possível obter os parâmetros reológicos fundamentais destes compósitos (FEYS *et al.*, 2017).

A reologia é a ciência do escoamento e da deformação da matéria, a qual concerne o estudo das interações entre tensão de cisalhamento, taxa de deformação e tempo (BANFILL, 1994). O entendimento das propriedades reológicas da pasta de cimento pode prover informações importantes sobre sua microestrutura e interação entre seus componentes, sendo essencial para a completa compreensão do comportamento do concreto no estado fresco (SANT; FERRARIS; WEISS, 2008; YAHIA, 2014). Nesse sentido, diversos autores (FERRARIS; OBLA; HILL, 2001; AL-MARTINI; NEHDI, 2010; KONG; ZHANG; HOU, 2013; LI *et al.*, 2016) consideram vantajoso conhecer as características reológicas das pastas de cimento antes de se discutir as propriedades reológicas do concreto.

Os parâmetros reológicos das pastas de cimento, em regime permanente, são obtidos por meio de curvas de fluxo, que correlacionam diversas taxas de deformação com as respectivas tensões de cisalhamento, ou vice-versa. A determinação de tais curvas é efetuada, de modo geral, por meio de protocolos de ensaio constituídos de etapas ascendente e descendente, isto é, com incremento e decréscimo progressivo, respectivamente, da taxa de deformação ou da tensão de cisalhamento imposta, em um determinado intervalo de tempo. As variações na taxa de deformação ou na tensão de cisalhamento podem ser efetuadas de modo linear ou em patamares, nos quais o parâmetro imposto é mantido constante durante um dado tempo (FEYS *et al.*, 2017). Para

garantir que o material ensaiado apresente o mesmo histórico de cisalhamento e uniformidade, é usual empregar uma etapa precedente à curva ascendente, conhecida como pré-cisalhamento, que consiste, em geral, na aplicação de uma taxa de deformação (ou tensão de cisalhamento) constante por um determinado tempo, seguida por um curto período de repouso do material (AL-MARTINI; NEHDI, 2010; BESSAIES-BEY *et al.*, 2016).

O comportamento reológico das pastas de cimento é descrito, de modo geral, como similar ao de um fluido Binghamiano (Equação 1) ou de Herschel-Bulkley (Equação 2) (ROUSSEL; BESSAIES-BEY, 2015; FEYS *et al.*, 2017).

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$\tau = \tau_0 + K_n \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

Em que: τ é a tensão de cisalhamento; τ_0 é a tensão limite de escoamento; μ_p é a viscosidade plástica; $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação; K_n é o índice de consistência, n é o índice de escoamento.

Os ensaios reológicos costumam ser executados em condições de temperatura e umidade controladas, exceto quando estes fatores são as variáveis em estudo (FEYS *et al.*, 2017). Usualmente, o tempo decorrido entre o contato da água com o aglomerante e os ensaios reométricos é fixado, visando a análise dos compósitos em um mesmo grau de hidratação.

É possível encontrar na literatura especializada estudos sobre a influência de diversos fatores no comportamento reológico de suspensões cimentícias, tais como: ação dos aditivos químicos e adições minerais (BANFILL, 2011; KONG; ZHANG; HOU, 2013; CELIK; CANAKCI, 2015; NG; JUSTNES, 2015); temperatura (PETIT; WIRQUIN; KHAYAT, 2010; GWON; SHIN, 2019); procedimento e energia de mistura (HAN; FERRON, 2015; VANCE; SANT; NEITHALATH, 2015; HAN; FERRON, 2016); protocolo e instrumentação de ensaio (ASSAAD; HARB; MAALOUF, 2016; HAN; FERRON, 2016); morfologia dos agregados (CEPURITIS *et al.*, 2016; HAFID *et al.*, 2016), entre outros. Entretanto, tais estudos, em sua maioria, se restringem à avaliação de uma única fase dos compósitos cimentícios (pasta, argamassa ou concreto), utilizam equipamentos e protocolos de ensaios diversos e, dada a expressiva variedade de materiais constituintes, com diferentes composições químicas e características morfológicas, as comparações entre os resultados apresentados na literatura tornam-se quase impossíveis, sendo meramente especulativas.

Tendo em vista o exposto, torna-se necessária a investigação quantitativa de como tais fatores influenciam na caracterização reológica dos materiais cimentícios, quais deles são mais influentes, quais são mais facilmente controlados, de modo a poder conceber pastas, argamassas e concretos com as propriedades reológicas requeridas para sua adequada aplicação e acabamento, sem negligenciar os aspectos de resistência e durabilidade.

Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência do protocolo de ensaio na determinação dos parâmetros reológicos de pastas de cimento, sendo estabelecidos quatro protocolos de ensaio distintos, com variação da taxa de deformação máxima (50 e 100s⁻¹) e do modo de aplicação do cisalhamento (linear e em patamares).

2. Materiais e Métodos

2.1. Produção das pastas de cimento

As pastas de cimento estudadas foram produzidas com cimento composto CP II E32, que apresentou massa específica igual a 2,870 g/cm³, determinada conforme o procedimento da NBR NM 23 (ABNT, 2001), e água potável. Neste trabalho foram estudadas pastas com relação água/cimento (a/c) iguais a 0,40, 0,50 e 0,60, em massa.

As pastas de cimento foram misturadas mecanicamente, em misturador planetário, com duas configurações de velocidade, sendo descrito a seguir:

- adicionar toda a água e o cimento e deixar em repouso por 30s;
- misturar por 30s em velocidade baixa (61,3±0,3 rpm);
- efetuar a limpeza da cuba e da pá e deixar a mistura em repouso por 150s;
- misturar por 60s em velocidade alta (121,9±0,5 rpm).

2.2. Ensaio reométricos

Para a realização dos ensaios reométricos foi utilizado um reômetro *R/S Rheometer*, da fabricante *Brookfield Engineering Laboratories, Inc.*, com controle da taxa de deformação. A geometria adotada foi cilindros coaxiais, sendo empregado o *spindle* CC45, com as seguintes características: raio interno igual a 22,5 mm; raio externo (copo) igual a 24,4 mm; volume de amostra de 100 ml. Os limites de medição da geometria escolhida são: taxa de deformação, de 0 a 1291s⁻¹; tensão de cisalhamento, de 0 a 195,8Pa; viscosidade, de 0,02 a 15Pa.s.

Os protocolos de ensaio analisados foram precedidos de um ciclo de pré-cisalhamento, com aplicação de taxa de deformação constante de 50s⁻¹, durante 60s, seguido de repouso do material por 30s. Os protocolos instituídos receberam a seguinte nomenclatura – CD050, CD100, CP050 e CP100, sendo a seguir detalhados:

- *Protocolo CD050*: curva ascendente de 0 a 50s⁻¹ por 160s; curva descendente de 50 a 0 s⁻¹, com duração de 160s;
- *Protocolo CD100*: curva ascendente de 0 a 100s⁻¹ por 160s; curva descendente de 100 a 0 s⁻¹, com duração de 160s;
- *Protocolo CP050*: curva ascendente de 0 a 50s⁻¹, em cinco etapas, com duração de 32s cada etapa; curva descendente de 50 a 0s⁻¹, em cinco etapas, com duração de 32s cada etapa;

- *Protocolo CP100*: curva ascendente de 0 a 100s⁻¹, em cinco etapas, com duração de 32s cada etapa; curva descendente de 100 a 0s⁻¹, em cinco etapas, com duração de 32s cada etapa.

A representação gráfica dos protocolos de ensaio utilizados é apresentada na Figura 1.

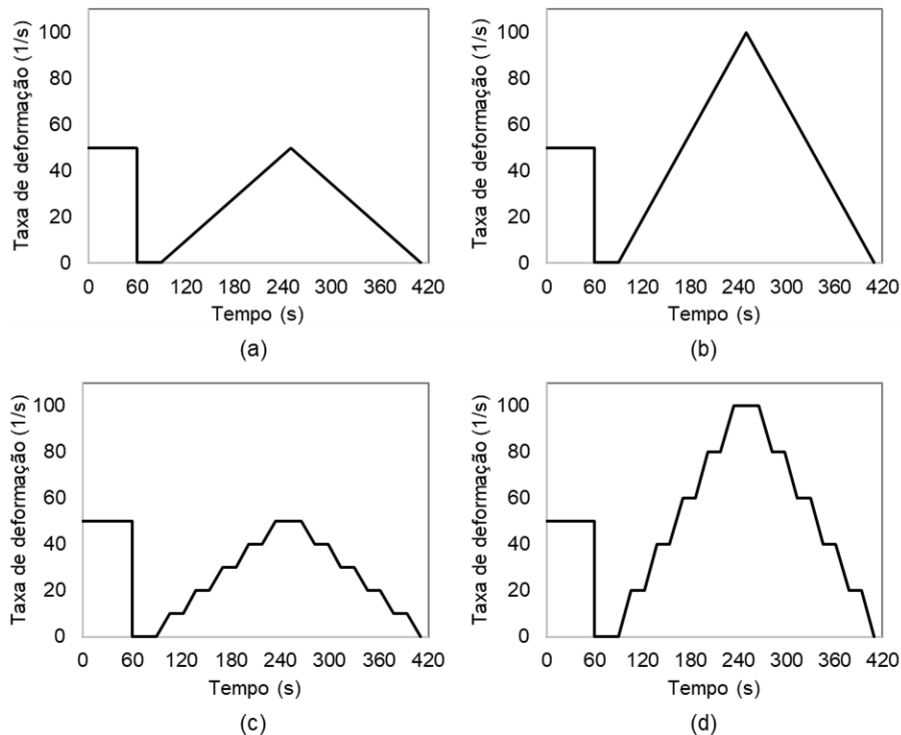


Figura 1. Representação esquemática dos protocolos de ensaio reométrico: (a) CD050; (b) CD100; (c) CP050 e (d) CP100.

Para fins de controle qualitativo, simultaneamente aos ensaios reométricos, foram avaliados o abatimento e espalhamento, por meio de mini tronco de cone, com dimensões iguais a 100x70x60 mm (diâmetro inferior x diâmetro superior x altura), conforme proposto por Okamura e Ouchi (2003). Todos os ensaios foram realizados em quadruplicata, em ambiente controlado, com temperatura de 26,5±0,8°C e umidade relativa de 48±5%, e após dez minutos do contato da água com o cimento.

2.3. Análise dos resultados

Os resultados obtidos foram analisados por meio de estatística descritiva e por análise de variância (ANOVA), com aplicação do teste de Tukey com nível de significância de 95%. As análises estatísticas foram executadas com auxílio do *software Minitab 17*.

3. Resultados e Discussão

O aspecto visual das pastas de cimento é representado na Figura 2, na qual pode-se notar que as pastas produzidas se apresentaram homogêneas, sem indícios visíveis de segregação/exsudação.

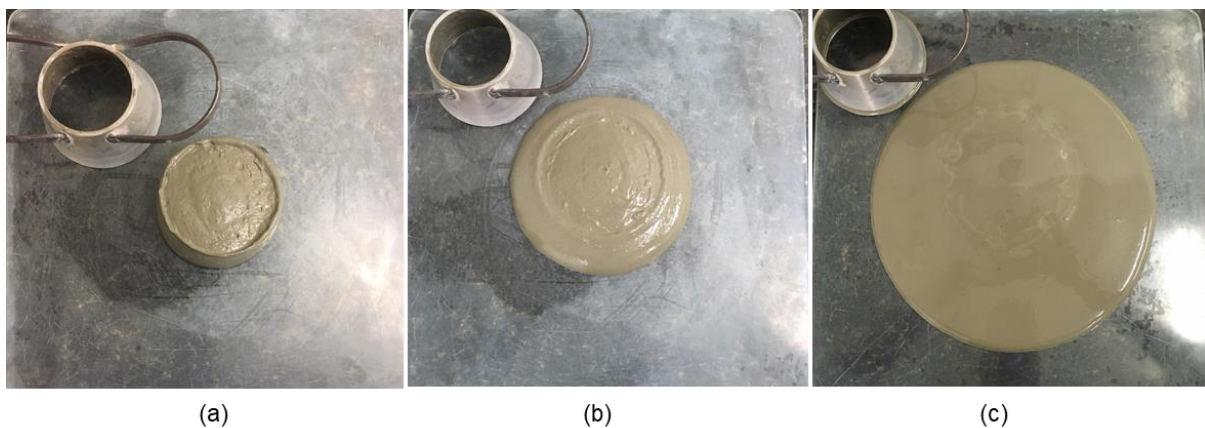


Figura 2. Aspecto visual das pastas de cimento com relação água/cimento igual a: (a) 0,40; (b) 0,50 e (c) 0,60.

Como esperado, o abatimento e o diâmetro de espalhamento aumentaram conforme o incremento na relação água/cimento, em função da maior quantidade de água livre na mistura. Os resultados obtidos nos ensaios de mini abatimento de tronco de cone são apresentados na Figura 3.

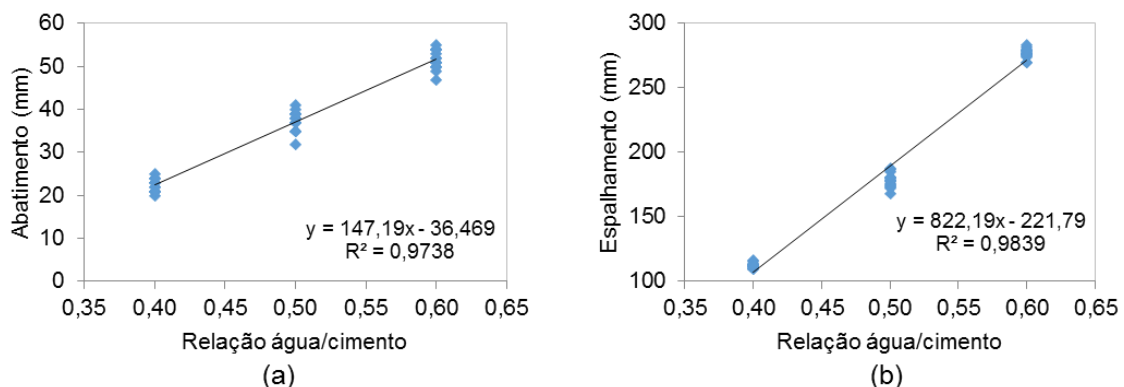


Figura 3. Ensaios empíricos: (a) abatimento e (b) espalhamento.

Por meio da análise dos dados da Figura 3 é possível verificar pouca variabilidade (em média, 5,7% para o abatimento e 2,0% para o espalhamento) nas misturas produzidas, sendo tais dados indicadores qualitativos no controle da produção das pastas de cimento.

As curvas de fluxo médias das pastas de cimento ensaiadas são apresentadas na Figura 4.

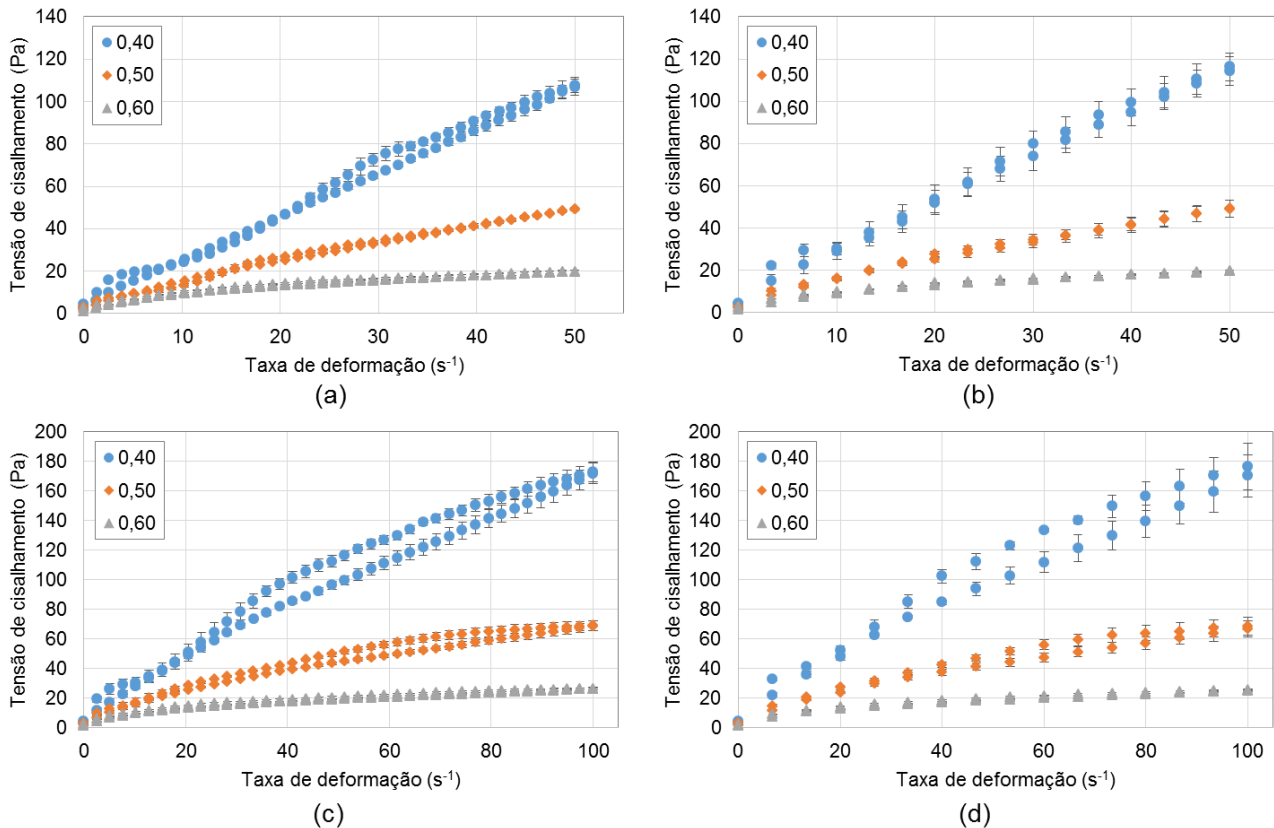


Figura 4. Curvas de fluxo médias para os protocolos: (a) CD050; (b) CP050; (c) CD100 e (d) CP100.

Ao analisar os dados constantes na Figura 4, verifica-se que as pastas de cimento se comportaram como fluidos não-Newtonianos com tensão limite de escoamento. Percebe-se também que não há linearidade entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento, deste modo, os dados experimentais foram ajustados conforme o modelo de Herschel-Bulkley. Nota-se também que as pastas de cimento exibiram comportamento tixotrópico, sendo as áreas de histerese apresentadas na Figura 5.

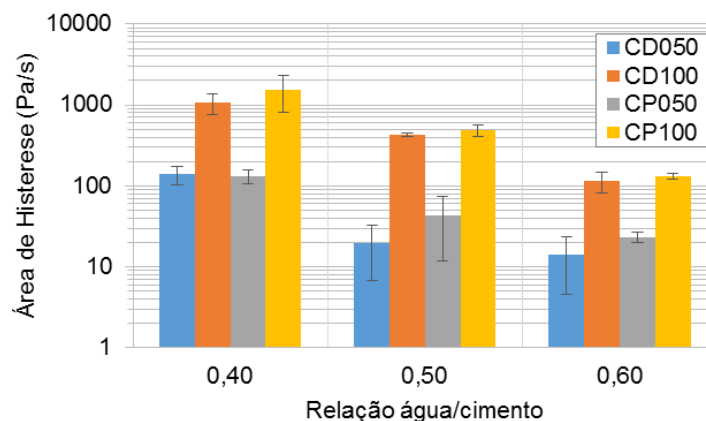


Figura 5. Área de histerese média das pastas analisadas.

Observa-se que o comportamento tixotrópico exibido pelas pastas de cimento está fortemente atrelado à relação água/cimento das misturas e a máxima taxa de deformação imposta ao material ensaiado. O modo de aplicação do cisalhamento pareceu não influenciar significativamente a área de histerese.

Os parâmetros reológicos das pastas de cimento, determinados a partir do ajuste dos dados experimentais das curvas de fluxo ao modelo reológico de Herschel-Bulkley, são apresentados nas Tabelas 1 e 2, para as curvas ascendente e descendente, respectivamente. Cabe mencionar que todos os coeficientes de determinação (R^2) obtidos foram superiores a 0,979, confirmando a adequação do modelo aos dados experimentais observados.

Tabela 1. Parâmetros reológicos médios das pastas de cimento – curva ascendente.

Relação a/c	Protocolo de ensaio	Parâmetros reológicos					
		$T_0 \pm DP^{(*)}$ (Pa)	CV ^(*) (%)	$K_n \pm DP$ (Pa.s ⁿ)	CV (%)	$n \pm DP$ -	CV (%)
0,40	CD050	5,845 ± 1,497	25,61	2,080 ± 0,688	33,06	1,015 ± 0,089	8,74
	CD100	0,232 ± 0,397	171,39	7,396 ± 1,994	26,96	0,699 ± 0,067	9,64
	CP050	7,180 ± 0,502	6,99	3,133 ± 1,015	32,40	0,923 ± 0,074	7,99
	CP100	5,432 ± 1,593	29,33	7,769 ± 3,529	45,43	0,702 ± 0,123	17,58
0,50	CD050	1,677 ± 0,433	25,82	2,306 ± 0,145	6,27	0,775 ± 0,014	1,79
	CD100	0,667 ± 0,849	127,30	5,059 ± 0,805	15,91	0,580 ± 0,050	8,63
	CP050	2,803 ± 0,309	11,03	2,740 ± 0,576	21,01	0,725 ± 0,067	9,27
	CP100	1,703 ± 0,226	13,25	4,526 ± 0,809	17,88	0,598 ± 0,056	9,30
0,60	CD050	1,545 ± 0,467	30,25	2,722 ± 0,207	7,61	0,491 ± 0,022	4,39
	CD100	1,838 ± 0,580	31,58	3,410 ± 0,798	23,40	0,440 ± 0,047	10,66
	CP050	2,325 ± 0,508	21,84	2,499 ± 0,186	7,44	0,497 ± 0,013	2,61
	CP100	2,027 ± 0,300	14,82	3,370 ± 0,206	6,10	0,428 ± 0,007	1,62

(*) Em que: DP = desvio-padrão e CV = coeficiente de variação.

Tabela 2. Parâmetros reológicos das pastas de cimento – curva descendente.

Relação a/c	Protocolo de ensaio	Parâmetros reológicos					
		$T_0 \pm SD$ (Pa)	CV (%)	$K_n \pm SD$ (Pa.s ⁿ)	CV (%)	$n \pm SD$ -	CV (%)
0,40	CD050	3,668 ± 0,921	25,10	2,262 ± 0,368	16,28	0,978 ± 0,046	4,67
	CD100	2,660 ± 1,582	59,47	4,146 ± 0,363	8,76	0,803 ± 0,031	3,84
	CP050	3,965 ± 1,607	40,53	3,396 ± 0,728	21,43	0,895 ± 0,042	4,71
	CP100	3,464 ± 0,301	8,70	4,516 ± 0,965	21,38	0,784 ± 0,068	8,68
0,50	CD050	1,578 ± 0,372	23,57	2,252 ± 0,128	5,67	0,779 ± 0,014	1,84
	CD100	1,719 ± 0,793	46,15	3,419 ± 0,168	4,90	0,645 ± 0,024	3,75
	CP050	2,259 ± 0,503	22,28	2,330 ± 0,073	3,12	0,765 ± 0,023	2,99
	CP100	1,788 ± 0,410	22,92	3,153 ± 0,225	7,13	0,656 ± 0,032	4,88
0,60	CD050	0,576 ± 0,241	41,95	2,807 ± 0,448	15,95	0,501 ± 0,044	8,72
	CD100	0,760 ± 0,248	32,58	3,202 ± 0,195	6,10	0,451 ± 0,015	3,34
	CP050	0,983 ± 0,120	12,16	2,535 ± 0,059	2,31	0,515 ± 0,011	2,15
	CP100	1,298 ± 0,182	14,06	2,914 ± 0,141	4,83	0,456 ± 0,007	1,63

Ao analisar os dados constantes na Tabelas 1 e 2, nota-se que os resultados médios dos parâmetros reológicos obtidos apresentaram variações de acordo com o protocolo de ensaio empregado. Em alguns casos, foram observados valores bastante discrepantes para a tensão limite de escoamento, sobretudo para o protocolo CD100 em comparação aos demais, sem um padrão claro. Por outro lado, os valores dos índices de consistência e de escoamento parecem ter sido influenciados pela máxima taxa de deformação aplicada, uma vez que os valores de índice de consistência foram superiores nos protocolos CD100 e CP100 e inferiores no caso do índice de escoamento.

Observa-se, também, disparidade entre os parâmetros reológicos determinados por meio da curva ascendente em comparação com a curva descendente. Na literatura, os modelos reológicos são ajustados, em geral, somente com dados da curva descendente, pois, de acordo com Kwan e Li (2012), os resultados nesta etapa seriam mais consistentes e reproduzíveis. De fato, ao analisar os dados apresentados nas Tabelas 1 e 2 é possível verificar maior variabilidade nos parâmetros reológicos obtidos por meio das curvas ascendentes, independentemente do protocolo de ensaio adotado. Nota-se, ainda, que a tensão limite de escoamento apresentou os maiores coeficientes de variação, e o índice de escoamento se mostrou o parâmetro mais estável. Cabe mencionar que não foi possível estabelecer uma relação entre a variabilidade dos parâmetros reológicos e a relação água/cimento. Isto posto, as análises seguintes se concentraram nos parâmetros reológicos obtidos por meio das curvas descendentes (Tabela 2).

No que tange à variação entre os protocolos de ensaio, verifica-se, que, em termos médios, os dados determinados pelos protocolos CP050 e CP100 exibiram menor variabilidade quando comparados aos protocolos CD050 e CD100. Cabe destacar que as propriedades reológicas avaliadas por meio do protocolo CP100 apresentaram os menores coeficientes de variação. Deste modo, pode-se inferir que a aplicação do cisalhamento em patamares permite a amostra maior tempo para alcançar um estado de equilíbrio em cada taxa de deformação analisada, resultando em medições mais acuradas da tensão de cisalhamento e, portanto, em curvas de fluxo mais estáveis.

Nesse sentido, foi efetuada análise de variância para averiguar se os parâmetros reológicos determinados por meio de cada protocolo de ensaio são estatisticamente iguais. O nível de significância especificado para o teste foi 0,05. Valores p (p -value) inferiores ao nível de significância especificado indicam que a hipótese nula (todas as médias são iguais) deve ser descartada, isto é, ao menos uma das médias difere das demais (hipótese alternativa). Os resultados de valor p para cada análise são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Análise de variância para os parâmetros reológicos - Valor p .

Parâmetro reológico	Relação água/cimento		
	0,40	0,50	0,60
Tensão limite de escoamento	0,502	0,360	0,002
Índice de consistência	0,002	0,000	0,022
Índice de escoamento	0,000	0,000	0,005

Por meio da análise dos dados constantes na Tabela 3, verifica-se que existem casos em que as médias obtidas para os parâmetros reológicos diferem de acordo com o protocolo de ensaio empregado. Tendo em vista a rejeição da hipótese nula, foi aplicado o teste de Tukey para determinar quais médias foram estatisticamente diferentes. Os resultados são sintetizados na Tabela 4, sendo os protocolos que compartilham a mesma letra são estatisticamente iguais. O nível de confiança do teste é 95%.

Tabela 4. Agrupamento dos resultados do teste de Tukey.

Parâmetro reológico	Protocolo de ensaio	Relação água/cimento		
		0,40	0,50	0,60
Tensão limite de escoamento	CD050	A	A	B
	CD100	A	A	B
	CP050	A	A	A B
	CP100	A	A	A
Índice de consistência	CD050	B	B	A B
	CD100	A	B	A
	CP050	A B	A	B
	CP100	A	A	A B
Índice de escoamento	CD050	A	A	A B
	CD100	B C	A	B
	CP050	A B	B	A
	CP100	C	B	B

Tendo em vista os dados expostos nas Tabelas 3 e 4, nota-se que os parâmetros reológicos determinados por meio dos protocolos de ensaio estabelecidos apresentaram diferenças estatisticamente significativas, principalmente no que se refere aos índices de consistência e de escoamento. A tensão limite de escoamento, por ser o parâmetro com maior variabilidade, foi estatisticamente igual na maior parte dos casos. Nos parâmetros reológicos com menor variabilidade (índices de consistência e de escoamento) verificam-se mais diferenças significativas entre os resultados exibidos pelos protocolos avaliados. Tais observações reforçam a ideia de que o protocolo de ensaio exerce influência na determinação dos parâmetros reológicos e, portanto, necessita de padronização.

4. Considerações Finais

O presente estudo teve por objetivo avaliar de que modo o protocolo de ensaio pode influenciar na determinação dos parâmetros reológicos das pastas de cimento. Tendo em vista o exposto, verificou-se que:

- os parâmetros reológicos obtidos por meio das curvas descendentes exibiram menor variabilidade do que aqueles provenientes das curvas ascendentes;
- a tensão limite de escoamento foi o parâmetro reológico que apresentou maior variabilidade, independentemente do protocolo de ensaio adotado;
- a aplicação do cisalhamento em patamares (protocolos de ensaio CP050 e CP100) levou a obtenção de parâmetros reológicos com menor variabilidade;



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

- existem diferenças estatisticamente significativas entre os parâmetros reológicos determinados pelos diversos protocolos de ensaio adotados, em especial para o índice de consistência e de escoamento.

Referências

AL-MARTINI, S., NEHDI, M. **Genetic algorithm rheological equations for cement paste.** Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers, v. 163, n. 2 , pp. 77-85, 2010.

ASSAAD, J. J.; HARB, J.; MAALOUF, Y. **Effect of vane configuration on yield stress measurements of cement pastes.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 230, p. 31-42, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.

BANFILL, P. F. G. **Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials.** Construction and Building Materials, v. 8, n. 1, p. 43-50, 1994.

BANFILL, P. F. G. **Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water reducing admixtures.** Construction and Building Materials, v. 25, n. 6, p. 2955-2960, 2011.

BESSAIES-BEY, H. *et al.* **Organic admixtures and cement particles: Competitive adsorption and its macroscopic rheological consequences.** Cement and Concrete Research, v. 80, p. 1-9, 2016.

CELIK, F.; CANAKCI, H. **An investigation of rheological properties of cement-based grout mixed with rice husk ash (RHA).** Construction and Building Materials, v. 91, p. 187-194, 2015.

CEPURITIS, R. *et al.* **Crushed sand in concrete—effect of particle shape in different fractions and filler properties on rheology.** Cement and Concrete Composites, v. 71, p. 26-41, 2016.

FERRARIS, C.F., OBLA, K.H., HILL, R. **The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete.** Cement and Concrete Research, v. 31, n. 2, pp. 245-255, 2001.

FEYS, D. *et al.* **Measuring rheological properties of cement pastes: most common techniques, procedures and challenges.** Rilem Technical Letters, v. 2, p. 129-135, 2017.



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

GEYER, A. L. B.; SÁ, R. R. **Importância do controle de qualidade do concreto no estado fresco.** Universidade Federal de Goiás (UFG) - Informativo Técnico - Tecnologia em Concreto Modernidade a serviço do Cliente, Goiânia, Ano 2 nº 2, julho, 2006.

GWON, S.; SHIN, M. **Rheological properties of modified sulfur polymer composites containing cement-fly ash blend at different temperatures.** Construction and Building Materials, v. 228, p. 116784, 2019.

HAFID, H. *et al.* **Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars.** Cement and Concrete Research, v. 80, p. 44-51, 2016.

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.

HAN, D.; FERRON, R. D. **Influence of high mixing intensity on rheology, hydration, and microstructure of fresh state cement paste.** Cement and Concrete Research, v. 84, p. 95-106, 2016.

KONG, X.; ZHANG, Y.; HOU, S. **Study on the rheological properties of Portland cement pastes with polycarboxylate superplasticizers.** Rheologica Acta, v. 52, n. 7, p. 707-718, 2013.

KWAN, A. K. H.; LI, L. G. **Combined effects of water film thickness and paste film thickness on rheology of mortar.** Materials and structures, v. 45, n. 9, p. 1359-1374, 2012.

LI, B. *et al.* **Investigation of the rheological properties of cement paste with different superplasticisers based on colour function and RDS methods.** Advances in Cement Research, v. 28, n. 6, p. 357-370, 2016

MACIEL, G. F.; BARBOSA, M. P.; PEREIRA, J. B. **Análise comparativa da tensão limite de escoamento de argamassas por meio da técnica de Pashias e reometria rotacional.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 21, n. 4, p. 866-879, 2016.

NG, S.; JUSTNES, H. **Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash.** Cement and concrete composites, v. 65, p. 41-54, 2015.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete.** Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.

PETIT, J.-Y.; WIRQUIN, E.; KHAYAT, K. H. **Effect of temperature on the rheology of flowable mortars.** Cement and Concrete Composites, v. 32, n. 1, p. 43-53, 2010.



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

ROUSSEL, N.; BESSAIES-BEY, H. **Steady state flows of fresh cement pastes and concretes: simplified underlying physics.** Advances in Applied Ceramics, v. 114, n. 7, p. 402-405, 2015.

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, n. 11, p. 1286-1296, 2008.

TOUTOU, Z.; ROUSSEL, N. **Multi scale experimental study of concrete rheology: from water scale to gravel scale.** Materials and Structures, v. 39, n. 2, p. 189-199, 2006.

VANCE, K.; SANT, G.; NEITHALATH, N. **The rheology of cementitious suspensions: a closer look at experimental parameters and property determination using common rheological models.** Cement and Concrete Composites, v. 59, p. 38-48, 2015.

YAHIA, A. **Effect of solid concentration and shear rate on shear-thickening response of high-performance cement suspensions.** Construction and Building Materials, v. 53, p. 517-521, 2014.