

Determination of rheological parameters of mortar and concrete by alternative techniques

Determinação de parâmetros reológicos de argamassas e concreto através de técnicas alternativas

M. P. BARBOSA ^a
mbarbosa@dec.feis.feis.unesp.br

G. F. MACIEL ^b
maciel@dec.feis.unesp.br

A. L. CASTRO ^c
alcastro@ipt.br

J. F. A. REIS ^d
j_feliper@yahoo.com.br

K. A. A. LEMOS ^e
kleberaal@hotmail.com

Abstract

Pastes, mortar and concrete are reactive suspensions whose consistency is modified over time, especially by cement performance. They present a non-Newtonian fluid behavior and exhibit viscosity that varies with the applied stress. Based on alternative techniques, the behavior and rheological properties of mortars and concretes were determined, analyzed and compared from the experimental measurements of slump, yield stress calculation, with and without addition of admixtures, and viscosity values. The alternative techniques used were the cylinder of Pashias and the modified slump test for mortars and concretes, respectively. The rheometric parameter values obtained by the alternative techniques for mortars and concretes were compared with the results from tests performed with a rheometer, indicating the alternative techniques' good acceptance and lower costs to determine the rheological parameters of cementitious materials. It could even be inferred that the Bingham rheological model, with two rheological parameters (yield stress and viscosity), proved to be a necessary and sufficient condition to represent the behavior of the mixtures tested in this paper.

Keywords: mortar; concrete; rheology; slump test; yield stress.

Resumo

As pastas, juntamente com as argamassas e os concretos, são suspensões reativas, cuja consistência é modificada ao longo do tempo, sobretudo pela atuação do cimento. Eles apresentam um comportamento de fluido não-newtoniano e exibem uma viscosidade que varia com a tensão aplicada. Com base em técnicas alternativas, foram determinados, analisados e comparados o comportamento e as propriedades reológicas de argamassas e de concretos a partir de medidas experimentais de abatimento, cálculo da tensão crítica ou de escoamento, com e sem adição de aditivos, assim como valores de viscosidade. As técnicas alternativas utilizadas foram o cilindro de Pashias e o ensaio de abatimento de tronco de cone modificado para as argamassas e os concretos, respectivamente. Os valores de parâmetros reométricos obtidos a partir das técnicas alternativas para as argamassas e concretos testados foram comparados com resultados de ensaios realizados em reômetro, apontando boa aceitação das técnicas alternativas e menos onerosas na determinação de parâmetros reológicos de materiais à base cimentícia. Pôde-se inferir ainda que o modelo reológico binghamiano, com dois parâmetros reológicos (tensão crítica ou de escoamento e viscosidade), mostrou-se como condição necessária e suficiente para representar o comportamento das misturas estudadas neste trabalho.

Palavras-chave: argamassa, concreto; reologia; ensaio de abatimento; tensão crítica.

^a Professora Associada do DEC-FEIS/UNESP - Ilha Solteira/SP, Brasil – mbarbosa@dec.feis.feis.unesp.br

^b Professor Titular do DEC-FEIS/UNESP - Ilha Solteira/SP, Brasil – maciel@dec.feis.unesp.br

^c Pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) - São Paulo/SP, Brasil – alcastro@ipt.br

^d Mestre em Eng. Mecânica FEIS/UNESP, Eng° da LEONARDI Construção Industrializada Ltda. – j_feliper@yahoo.com.br

^e Eng° Civil FEIS/UNESP - Ilha Solteira/SP e ex-bolsista IC-FAPESP – kleberaal@hotmail.com

1. Introdução

A Reologia enquanto ciência estuda as correlações entre solicitações e respostas que a matéria apresenta em seus estados sólido, líquido, gasoso e, ainda, em estados intermediários. As solicitações podem ser denominadas de campo de tensão e as respostas de taxas de deformação.

Acoplada à reologia (originada da palavra grega *rhein*: “escorrer”, *logos*: “estudo”), definida por E.C. Bingham em 1929, tem-se a reometria que trata das técnicas, procedimentos e uso de equipamentos que permitem verificar e aferir as correlações supracitadas em condições permanentes e não permanentes.

Segundo HU *et al.* [1], de LARRARD *et al.* [2] e ANTUNES [3] as argamassas no estado fluido (fresco) são suspensões reativas, cuja consistência é modificada ao longo do tempo, sobretudo pela atuação do cimento. As pastas, juntamente com as argamassas, apresentam um comportamento de fluido não-newtoniano (pseudoplástico), exibem uma viscosidade que varia com a tensão aplicada e só conferem deformação significativa a partir de uma tensão de escoamento ou crítica. As pastas de cimento apresentam propriedades reológicas bastante ajustáveis ao modelo reológico de Herschel-Bulkley, desde que respeitadas certos limites de proporção água/cimento. Para os ensaios experimentais realizados com a argamassa nesta pesquisa, os valores de tensão crítica foram ajustados para o modelo reológico de Herschel-Bulkley, por um tempo limitado após sua preparação e anterior ao tempo de início de pega.

O concreto pode ser considerado como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento e/ou aglomerantes), tornando sua trabalhabilidade dependente das características dos agregados e da matriz de pasta. Em uma escala macroscópica, o concreto fresco flui como um líquido [4]. Assim, o concreto pode ser considerado um líquido e, para se estudar seu comportamento à deformação no estado fresco, nada mais adequado do que buscar os conceitos de reologia considerada adequada para materiais “complexos” que não se enquadram numa simples classificação de sólido, líquido ou gás [5]. O comportamento reológico do concreto, em determinadas condições e composição, assim como aquelas apresentadas neste artigo, pode ser bem ajustado ao modelo reológico de Bingham.

A reologia dos materiais à base de cimento é, portanto, importante por diversas razões. O controle da qualidade de produção desses materiais pode ser feito simultaneamente à sua utilização, ao invés de esperar por resultados de ensaios realizados no estado endurecido: uma correta definição de suas propriedades reológicas permite que métodos de ensaio de controle simples, perfeitamente fundamentados e informativos sejam sugeridos e realizados. Uma consideração reológica das condições de utilização pode fornecer informações úteis àquelas envolvidas na dosagem dos concretos. Na prática, a reologia de uma mistura deve estar correta para sua aplicação; caso contrário, o trabalhador fará um trabalho incorreto: provavelmente o material poderá ser alterado pela adição de mais ou menos água, com conseqüentes mudanças no seu desempenho [6]. Sabe-se que o sucesso econômico de uma construção de concreto é determinado, acima de tudo, pela racionalização e a automatização dos estágios envolvidos no processo de mistura, transporte e lançamento do concreto fresco [7].

Se por um lado a determinação dos parâmetros reológicos/reométricos é de interesse ímpar à determinação e à boa aplicação do produto final, sabe-se que sua determinação de forma precisa requer cuidados que vão além de se dispor de equipamentos de precisão. Este tipo de investigação experimental depende, sobretudo, de cuidado no manuseio e operação com os materiais. Esse artigo traz à discussão, dentre outros, esses cuidados, além de propositura de uso de técnicas alternativas na busca desses parâmetros. Para se obter o valor da tensão crítica ou de escoamento, por exemplo, de um fluido, deve-se associá-lo à noção de que este apresenta efetivamente uma tensão crítica real abaixo da qual ele “não se deforma”, sendo considerado um sólido, e acima da qual ele se deforma como um líquido. Esta proposição tem sido objeto de várias discussões nos trabalhos de BARNES; WALTERS [8], ASTARITA [9], dentre outros. Na realidade, a discussão pode, inclusive, ser pautada sobre uma determinada propriedade do fluido de natureza viscoplástica que simplesmente exhibe uma viscosidade elevada quando submetido a baixas taxas de deformação. Misturas viscoplásticas apresentam uma propriedade que muda bruscamente no entorno da tensão crítica ou de escoamento: se $\tau < \tau_c$, a mistura tem uma viscosidade bem elevada ou, de certa forma, se “deforma de maneira elástica”; enquanto se $\tau > \tau_c$, a mistura escoou como um líquido. Contudo, vale ressaltar que a tensão crítica está relacionada à mínima tensão necessária para quebrar a rede de interação de partículas no seio da mistura.

2. Consideração sobre reologia/reometria

2.1 Modelos reológicos

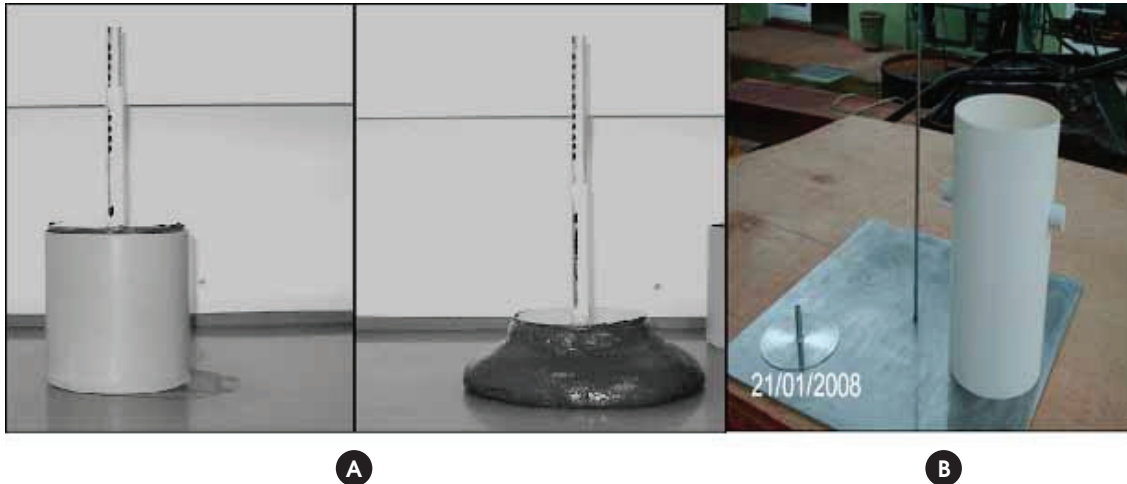
Muitos materiais podem ser modelados como fluidos não-newtonianos, notadamente os materiais à base de cimento. Ainda que ditos complexos em seu comportamento reológico, muitos comportamentos de pastas, argamassas e concretos podem exibir uma reometria binghamiana. Não obstante, alguns estudos [10] têm também apontado para comportamentos mais complexos e completos desses materiais a partir do modelo reológico de Herschel-Bulkley, em condições permanentes. A maioria destes materiais tem uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, o que repercute diretamente sobre a viscosidade.

As equações constitutivas mais comuns são representadas pelo modelo newtoniano generalizado, conforme a equação (1):

$$\tau = \tau_c \dot{\gamma} (-\dot{\gamma}_{II})^{-1/2} + f(\dot{\gamma}_{II}) \dot{\gamma} \quad (1)$$

onde $\dot{\gamma}$ representa o tensor taxa de deformação; τ o tensor tensão de cisalhamento; $\dot{\gamma}_{II}$ o segundo invariante do tensor taxa de deformação; τ_c tensão crítica e $f(\dot{\gamma}_{II})$ uma função contínua positiva que define o modelo reológico mais apropriado para o sistema. Neste trabalho são abordados fluidos ou materiais de natureza não-newtoniana e, conforme já justificado na literatura [5], tem-se um comportamento mais simplificado e validado para

Figura 1 - (a) Teste do abatimento modificado proposto por PASHIAS et al. (19) (Fonte (21)); (b) equipamento disponível na UNESP/Campus de Ilha Solteira/SP



pastas, argamassas e concretos a partir do modelo reológico de Bingham, onde $f(\dot{\gamma}_{II}) = 2\mu$, que em condições de cisalhamento simples, reduz-se à Equação (2):

$$\tau = \tau_c + \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

onde μ é viscosidade.

2.2 Reologia de Argamassas e Concretos

Segundo PILEGGI *et al.* [11] as argamassas podem ser consideradas suspensões concentradas compostas predominantemente por agregados miúdos (60% a 80% em massa de areias quartzosas, calcário britado, finos de britagem) misturados com finos reativos (cimento Portland, cal hidratada) e água em teor suficiente para que as mesmas sejam aplicadas no estado fluido.

Sabe-se que os desvios usualmente verificados no comportamento reológico de suspensões decorrem das interações físico-químicas ditadas pela proporção e natureza da fase líquida com as características individuais e o teor das partículas e outros constituintes que compõe a fase sólida [12]. No caso da adição de aditivos químicos, soma-se a esses desvios a alteração da interação fluido/partícula, além de modificações introduzidas pela presença de ar incorporado [11].

Assim sendo, o conceito subjetivo de trabalhabilidade é uma das propriedades mais importantes das argamassas e também do concreto no estado fresco, haja vista a necessidade de sua adequabilidade para a correta utilização. A trabalhabilidade é uma propriedade composta de pelo menos dois componentes principais: fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade das argamassas e também do concreto fresco; e a coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação [13]. As normas técnicas especificam diferentes métodos de ensaio para sua avaliação,

embora nenhum deles seja capaz de abranger a grande variação de trabalhabilidade utilizada na prática. Entre os métodos de ensaio existentes está o ensaio de abatimento de tronco de cone, especificado pela norma ABNT NBR NM 67:1998 [14].

Fazer uso da reologia para estudar trabalhabilidade do concreto não é usual. Geralmente, o abatimento é o único parâmetro medido e está relacionado com a tensão crítica. Raramente são fornecidas informações adicionais sobre o comportamento do escoamento da mistura, ou seja, sobre o comportamento do concreto sob elevadas taxas de cisalhamento.

No caso das argamassas, cita-se como ensaios tradicionais normalmente empregados no controle da consistência durante a aplicação em obras, o espalhamento na mesa de consistência, os ensaios de impacto (cone de penetração e o “dropping-ball” [15], “vane test” [16]), “squeeze flow” [17], entre outros. De uma maneira geral, estes ensaios caracterizam as argamassas em uma única condição de tensão ou taxa de cisalhamento. Segundo PILEGGI *et al.* [11], nos ensaios de espalhamento, a tensão aplicada é proporcional à densidade do material, enquanto nos ensaios de impacto, a taxa de cisalhamento aplicada é definida pela velocidade do elemento móvel. Por sua vez, o “vane test” é um ensaio que quantifica a tensão de escoamento das composições. Os resultados obtidos a partir destes métodos não fornecem, portanto, uma caracterização reológica completa das argamassas, podendo resultar em interpretações equivocadas sobre o comportamento das mesmas no estado fluido em diferentes condições de aplicação.

3. Métodos de determinação dos parâmetros reológicos das argamassas e dos concretos no estado fresco

No caso das argamassas as práticas reométricas vêm sendo incrementadas e trazendo resultados promissores quer seja por meio dos ensaios denominados de multipontos, que caracterizam reologicamente fluidos e suspensões sob diferentes

condições de tensão e taxa de cisalhamento, possibilitando a identificação simultânea dos parâmetros reológicos fundamentais (tensão de escoamento, viscosidade e perfil reológico), quer seja com o método de ensaio “squeeze flow” [11; 17; 18]. Entretanto, no caso dos concretos, a avaliação reológica tem encontrado alguns problemas, decorrentes da dificuldade em desenvolver ensaios capazes de medir diretamente os valores corretos dos parâmetros reológicos devido, sobretudo, à dimensão máxima característica do agregado graúdo, entre outros fatores [4]. Além disso, reômetros especiais para concretos têm seus preços bastante elevados o que, de certa forma, tem impossibilitado sua utilização na caracterização completa do comportamento desses materiais. Assim, algumas soluções alternativas têm sido propostas e utilizadas com resultados promissores. Dentre os métodos dos ensaios desenvolvidos, pode-se destacar o método proposto por PASHIAS *et al.* [19] para argamassas e o ensaio do tronco de cone modificado proposto por FERRARIS; de LARRARD [20] para concretos.

3.1 Método do abatimento modificado proposto por PASHIAS *et al.* [19]

O método de PASHIAS *et al.* [19], desenvolvido inicialmente para concretos frescos, fora posteriormente modificado para englobar um grande número de materiais. O teste consiste em medir a perda de altura do compósito alocado inicialmente dentro de um cilindro que, uma vez retirado, deixa o material fluir sobre uma superfície horizontal. Mede-se, então, a diferença entre a altura inicial e a altura final da amostra, associando-a à tensão crítica do material ensaiado. Ademais, a adoção de massas adicionais sobre a amostra nesta técnica tem como objetivo vencer as eventuais tensões críticas elevadas do material.

A vantagem da técnica do abatimento modificado proposto por PASHIAS *et al.* [19] é o pequeno volume de material necessário para a realização do ensaio que, a partir de um modelo analítico, permite estimar a tensão crítica do fluido. Os esquemas ilustrados na Figura 1 mostram os elementos utilizados no ensaio do abatimento modificado, com a presença de massas adicionais, assim como o equipamento construído e utilizado neste trabalho.

A tensão crítica é determinada indiretamente no método de PASHIAS *et al.* [19], a partir das Equações (3) a (8). A pressão exercida pela presença da massa adicionada no topo da amostra está apresentada na Equação (3):

$$\rho = \frac{m_o}{\pi R^2} g \quad (3)$$

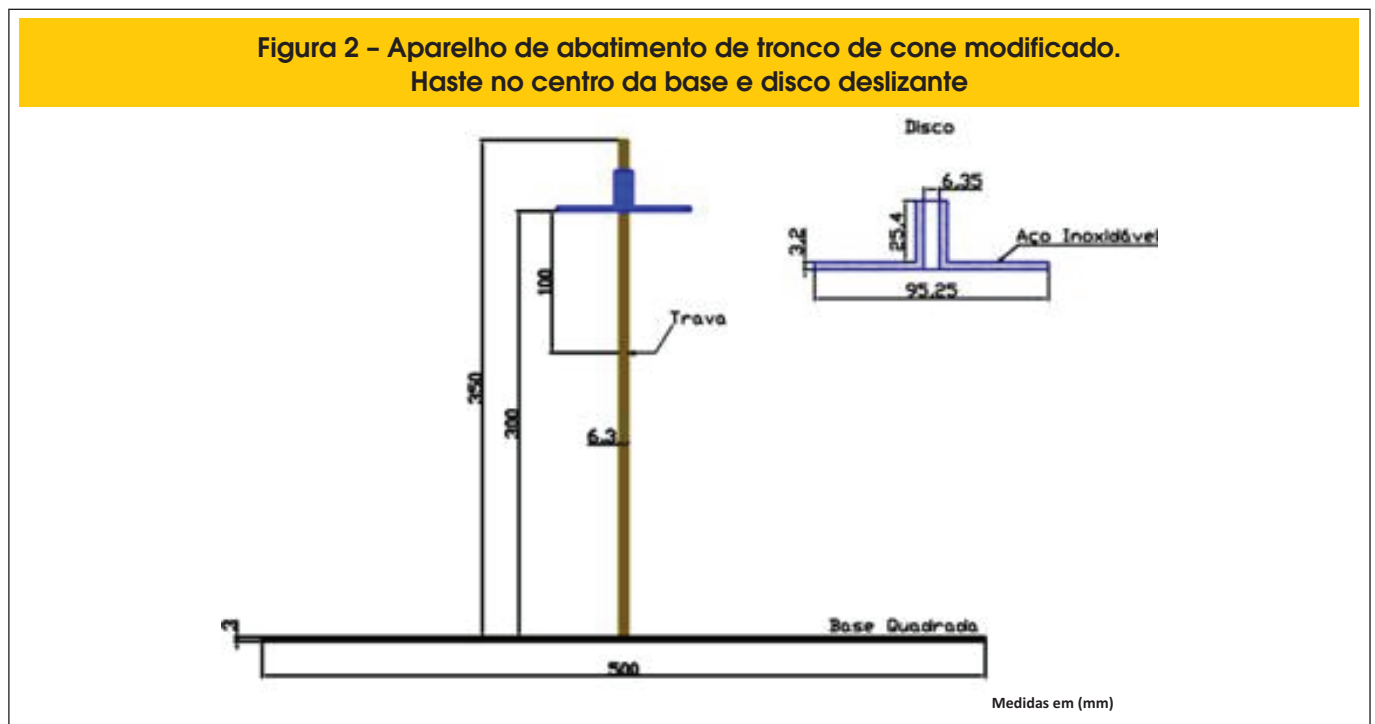
onde ρ_o é a massa específica da mistura; g é a gravidade; R é o raio do cilindro; e m_o a massa adicional.

A pressão total resultante (p) no material é caracterizada pela Equação (4):

$$p = \rho g z + p_o \quad (4)$$

sendo p_o a pressão devida à massa adicional e z uma altura qualquer. A adição da massa é equivalente a um “aumento do comprimento” da amostra, sendo z_o o desnível. Assim, a partir dos argumentos de PASHIAS *et al.* [19], para se determinar a tensão crítica, passa-se pelas Equações (5) e (6):

Figura 2 – Aparelho de abatimento de tronco de cone modificado. Haste no centro da base e disco deslizante



$$z_o = \frac{m_o}{\rho\pi R^2} \quad (5)$$

$$h_o = \frac{2\tau_c}{\rho g} - z_o \quad (6)$$

onde h_o é o comprimento não-deformado, z_o o desnível e τ_c a tensão crítica. Na pesquisa de PASHIAS *et al.* [19], observa-se que se a massa m_o for grande, a amostra é deformada sobre seu comprimento total, o que não é de interesse para a determinação da tensão crítica. A partir do comprimento h_1 da região deformada, usando o comprimento equivalente da amostra ($H+z_o$), deduz-se que:

$$h_1 = \frac{2\tau_c}{\rho g} \ln\left(\frac{\rho g}{2\tau_c}(H+z_o)\right) \quad (7)$$

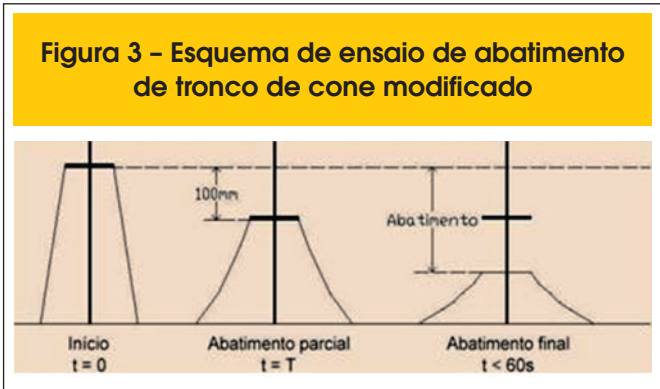
Assim, a partir das Equações (6) e (7) pode-se escrever o teste do abatimento modificado como na equação 8, a saber:

$$s = H - (h_o + h_1) = H + z_o - \frac{2\tau_c}{\rho g} \left(1 + \ln\left(\frac{\rho g(H+z_o)}{2\tau_c}\right)\right) \quad (8)$$

onde s é o abatimento.

3.2 Método do abatimento de tronco de cone modificado

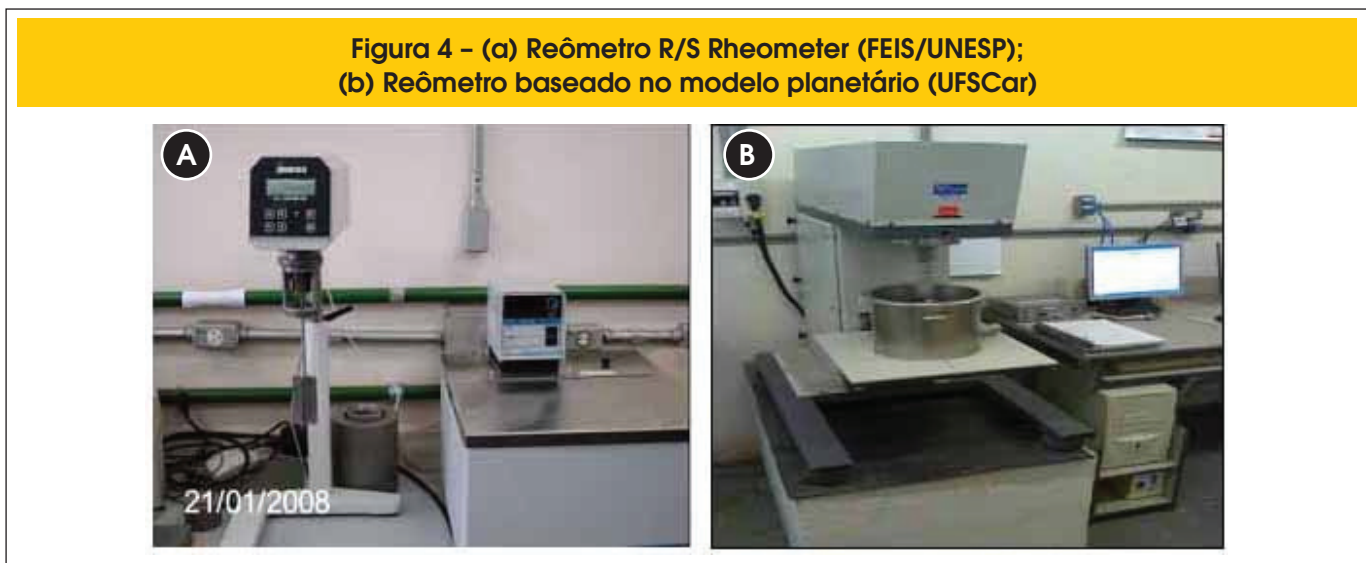
Buscando um equipamento que suprisse a necessidade de se fornecer



dois parâmetros reológicos que caracterizassem o comportamento de um concreto no estado fresco (propositura binghamiana), foi proposto por FERRARIS; de LARRARD [20] o ensaio de abatimento do tronco de cone modificado. Este método de ensaio tem sido usado em alguns centros de pesquisa como um método de ensaio alternativo capaz de determinar os dois parâmetros reológicos do concreto, a saber: viscosidade plástica e tensão de escoamento ou crítica. A viscosidade plástica é baseada em uma taxa média de abatimento durante o ensaio e a tensão crítica com o abatimento final propriamente dito. Dessa maneira, intervalos de tempo necessários para se alcançar uma altura intermediária entre os valores inicial e final de abatimento pareceram, a priori, uma boa maneira para descrever a viscosidade dos concretos [22].

Durante a escolha da altura intermediária de abatimento, dois problemas potenciais foram levados em consideração: primeiro, um abatimento parcial muito baixo poderia levar a tempos de abatimento muito pequenos e, assim, resultaria em baixa precisão nas medidas; e, um abatimento parcial que fosse muito alto poderia excluir todos os concretos com abatimentos finais menores. Assim, como a variação de abatimento dos concretos capazes de serem avaliados com reômetros é maior que 100 mm, este valor foi adotado para o abatimento parcial [20].

A tensão crítica do concreto é relacionada com o abatimento total, enquanto a viscosidade é relacionada com o tempo de abatimento parcial do material. A modificação ocorrida no dispositivo de abatimento



de tronco de cone padrão para o dispositivo de abatimento de tronco de cone modificado consiste na colocação de uma haste no centro da base metálica e no uso de um disco deslizante conforme Figura 2. Para a marcação do tempo, é utilizado um disco que desliza pela haste por uma altura de 100 mm. Quando o disco chega à altura de 100 mm ele é travado pela haste (Figura 3). O tempo é marcado por um operador que pode utilizar um cronômetro, captura de imagens, dispositivos eletrônicos, ou ainda, recursos de cinematografia da queda (captura e tratamento de imagens) associada a dispositivos eletrônicos, opção deste artigo. Para avaliar a tensão de escoamento ou crítica, FERRARIS; de LARRARD [20] propuseram a Equação (9) que é uma alteração das equações propostas por HU *et al.* [1]. Esta equação relaciona o abatimento do concreto com a tensão de escoamento ou crítica (τ_c).

$$\tau_c = \frac{\rho}{347} (300 - s) + 212 \quad (9)$$

onde ρ é a massa específica do material (kg/m^3), τ_c a tensão de escoamento ou crítica (Pa) e S é o abatimento (mm).

Para avaliar a viscosidade plástica, FERRARIS; de LARRARD [20] propuseram as Equações (10) e (11) para concretos com abatimento variando entre 100 mm e 260 mm.

$$\mu = 1,08 \times 10^{-3} (s - 175) \rho T \quad (10)$$

para $200 \text{ mm} < s < 260 \text{ mm}$

$$\mu = 25 \times 10^{-3} \rho T \quad (11)$$

para $s < 200 \text{ mm}$

onde μ é a viscosidade plástica (Pa.s) e T é o tempo do abatimento parcial (s).

Tabela 1 - Análise físico-química do cimento CPV ARI utilizado

Propriedade	Resultados	Especificações (ABNT NBR 5733:1991) (26)		
		mínimo	máximo	
Finura Peneira 200 (% retida)	0,33	-	6,0	
Finura Peneira 325 (% retida)	0,7	-	-	
Superfície específica Blaine (cm^2/g)	4526	3000	-	
Densidade aparente (g/cm^3)	0,93	-	-	
Densidade absoluta (g/cm^3)	3,15	-	-	
Resistência à compressão (MPa)	03 dias	45,4	24,0	
	07 dias	50,6	34,0	
	28 dias	52,3	-	
Perda do fogo (%)	3,12	-	4,5	
Resíduos insolúveis (%)	0,48	-	1,0	
Análise química (%)	SiO_2	18,91	-	-
	Fe_2O_3	2,72	-	-
	Al_2O_3	5,68	-	-
	CaO	65,15	-	-
	MgO	0,87	-	6,5
	SO_3	2,90	-	3,5
	Na_2O	0,15	-	-
	K_2O	0,87	-	-
Equivalente alcalino Na_2O	0,72	-	-	
Cal livre em CaO	1,35	-	-	

Tabela 2 – Granulometria das areias utilizadas (média peneirada e areia fina)

D _{máx} (mm)	Módulo de finura	Peneiras (mm)	% Retida acumulada					
			0,075	0,150	0,300	0,600	1,180	2,360
0,60	1,46	Areia peneirada	100	92	54	0	0	0
1,18	1,86	Areia fina	100	99	77	10	0	0

3.3 Reometria clássica: uso dos reômetros

O objetivo da reometria é determinar as características do fluido em estado de deformação, a partir de medições feitas em escoamentos simples e controlados. Nestes testes o fluido é tensionado de maneira simples, de tal forma que poucas componentes do seu tensor de tensões são diferentes de zero. Assim, a partir das componentes da tensão de cisalhamento e da taxa de cisalhamento, pode-se chegar a uma equação característica.

Os reômetros são equipamentos precisos não apenas para pesquisa, mas também para estudos práticos e medidas de controle de qualidade do material, direcionados à avaliação das propriedades reológicas de fluidos e suspensões. Segundo PILEGGI *et al.* [11], o princípio básico de operação dos reômetros está em avaliar a tensão de cisalhamento gerada pelo compósito à base de cimento em decorrência do seu cisalhamento por raquetes que, em movimento rotacional axial ou planetário, induzem-no a escoar. Eles fornecem um número maior de informações quando comparados aos ensaios empíricos convencionais, reduzindo os custos com material e mão-de-obra. Também, as informações obtidas são mais objetivas, uma vez que o ensaio é totalmente automatizado e controlado por computador [2].

As composições das argamassas deste trabalho foram testadas no reômetro R/S Brookfield (*shear rate x shear stress*). Este tipo de reômetro pode ser utilizado tanto controlando a deformação e medindo a tensão correspondente, como controlando a tensão e medindo a deformação resultante. As tensões críticas das argamassas medidas pelos dois métodos – Pashias e reometria – fo-

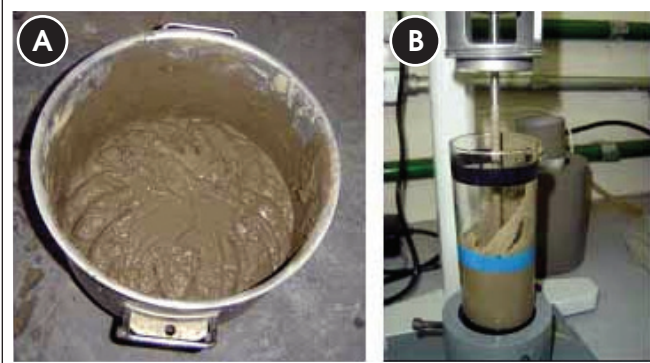
Tabela 3 – Composições das argamassas ensaiadas

Dosagens	Consumo dos materiais constituintes		
Cimento (kg/m ³)	425,0		
Areia (kg/m ³)	670,0		
Água (kg/m ³)	170,0	191,25	212,5
Fator a/c	0,40	0,45	0,50

ram analisadas e um estudo de validação da técnica pontuado. O reômetro e o banho térmico utilizados nos ensaios são mostrados na Figura 4a.

O primeiro reômetro de concreto foi criado por POWERS [23] no conceito de cilindros coaxiais. Com a evolução tecnológica dos reômetros, surgiram equipamentos que utilizam novos conceitos para o cisalhamento do material, dentre os quais se destaca o reômetro BTRHEOM desenvolvido pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), França [24]. O ensaio via reometria clássica desta pesquisa foi realizado no reômetro de concreto disponível no Laboratório de Cerâmicas Especiais e Refratários da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). O projeto deste reômetro foi baseado em um misturador planetário originalmente composto por um motor de corrente alternada, um câmbio de quatro velocidades e uma cuba cilíndrica com capacidade para misturar até 10 kg de concreto (Figura 4b). A vantagem da consideração do modelo planetário é que este permite que tanto concretos com alta fluidez quanto concretos com fluidez reduzida e sem coesão sejam avaliados [25].

Figura 5 – (a) Mistura da argamassa na argamassadeira; e (b) ensaio no reômetro



4. Procedimento Experimental

4.1 Dosagem da argamassa

As argamassas foram preparadas com o Cimento Portland CPV ARI e dois tipos de agregado miúdo, areia peneirada (peneira nº 30) com diâmetro máximo de 0,60 mm e areia fina com diâmetro máximo de 1,18 mm. A Tabela 1 apresenta alguns parâmetros físico-químicos do cimento CPV ARI e a Tabela 2 a granulometria dos dois tipos de agregado miúdo utilizados.

Na dosagem da argamassa utilizada nos ensaios, foram empregadas cinco relações água/cimento (a/c) diferentes, a saber:

Figura 6 – Fases do procedimento de ensaio utilizado para a técnica de Pashias: (a) cilindro pronto para ser elevado; (b) cilindro retirado e medida do abatimento



Tabela 4 – Caracterização dos agregados miúdo e graúdo utilizados (27; 28)

Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura	Massa específica (g/cm ³)	Absorção (%)
4,8	-	-	-
9,5	6,02	2,934	0,37
16	6,51	2,917	1,23

0,40, 0,43, 0,45, 0,47 e 0,50, adotado-se o seguinte procedimento de mistura:

- primeiramente o cimento e a água foram misturados durante trinta segundos na argamassadeira, sob velocidade baixa;
- em seguida, acrescentou-se o agregado miúdo até inteirar um minuto com a mistura em movimento;
- posteriormente a argamassa foi deixada em repouso durante dois minutos e, após esse tempo, foi reiniciando o processo de mistura por mais um minuto sob velocidade alta, totalizando dez minutos de mistura na argamassadeira.

Ao final desse processo, a mistura foi simultaneamente ensaiada pelo método de Pashias e no reômetro por três intervalos de tem-

Tabela 5 – Características físicas e químicas da sílica ativa utilizada

Massa específica	2.220 g/cm ³
Superfície específica	20.000 m ² /kg
Formato da partícula	esférico
Diâmetro médio	0,2 µm
Teor de SiO ₂	Min. 85%
Umidade	Máx. 3%
Equivalente alcalino em Na ₂ O	Máx. 0,5%

pos (t=0s, t=15s e t=30s), deixando a mesma amostra em repouso entre os sucessivos intervalos de tempo, conforme ilustrado na Figura 5.

A Tabela 3 apresenta a composição das argamassas utilizadas na pesquisa.

O aparato experimental de ensaio utilizado para a determinação da tensão crítica pelo método de Pashias, ilustrado na Figura 6, consta de um cilindro de PVC com 30 cm de altura e 150 mm de

Tabela 6 – Composição dos concretos utilizados (29)

Misturas de concreto	Relação a/c	Água (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Sílica (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
CAD1	0,30	160,1	466,7	51,8	1088,6	763,1	5,160
CAD2	0,30	160,1	466,7	51,8	1088,6	763,1	5,676
MCAD	0,30	160,1	466,7	51,8	957,1	848,7	5,676

Figura 7 – Aparato de filmagem



diâmetro, uma placa metálica horizontal (50 cm x 50 cm) em cujo centro se acopla um eixo vertical de 35 cm de altura e um disco metálico (massa adicional) de 142,61 g. O procedimento utilizado para o correto uso do equipamento é descrito a seguir:

- após a correta limpeza e umedecimento interno do cilindro de PVC, este deve ser colocado sobre a placa metálica de base, igualmente limpa e umedecida que, por sua vez, deve apoiar-se em uma superfície rígida, plana e horizontal;
- o molde cilíndrico é preenchido com determinado compósito

(concreto ou argamassa), em três camadas de volume aproximadamente iguais, sendo que na última camada, o compósito deve preenchê-lo completamente, sendo cada camada adensada com 25 golpes uniformemente distribuídos. Após o adensamento, remove-se o excesso de material respaldando sua superfície;

- na sequência, faz-se a limpeza da placa metálica de base em torno do molde e, em seguida, a desmoldagem levantando-se cuidadosamente o molde pelas alças na posição vertical, com velocidade constante e uniforme;
- mede-se o abatimento do molde cilíndrico, que corresponde à distância entre o plano da base superior do molde e o centro da base superior da amostra abatida, com o auxílio de uma régua metálica. Este procedimento de medida de abatimento do material alocado no cilindro é repetido em três tempos diferentes (0, 15 e 30 minutos) para a mesma amostra, que permanece em repouso entre as sucessivas medidas;
- em posse dos valores do abatimento da amostra, calcula-se a tensão crítica através da equação (8) e comparam-se os valores calculados com aqueles obtidos via reometria clássica (reômetro) para a mesma amostragem.

4.2 Dosagem do Concreto

As composições dos concretos foram elaboradas com cimento Portland CPV ARI, brita de origem basáltica com diâmetros máximos característicos de 16 mm e 9,5 mm, areia natural de rio com diâmetro máximo de 4,76 mm e módulo de finura de 2,4 e sílica ativa na proporção de 10% da massa em substituição ao cimento. As composições se diferenciaram apenas na quantidade de aditivo superplastificante: para o concreto elaborado com brita de 16 mm, o teor de aditivo variou entre 0,1% e 0,2%, enquanto para o con-

Figura 8 – Ensaio no reômetro de concreto



Figura 9 – Computador para aquisição dos dados obtidos pelo reômetro

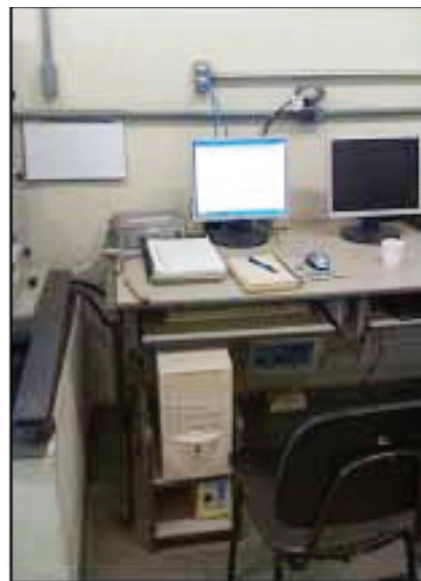


Tabela 7 – Técnica de Pashias: parâmetros necessários para o cálculo da tensão crítica das argamassas com relação a/c = 0,40

Ensaio	g (m/s ²)	Tempo (min)	a/c	H (cm)	Areia peneirada			Areia fina		
					Zo (m)	(kg/m ³) ^ρ	S (cm)	Zo(m)	(kg/m ³) ^ρ	S (cm)
1	9.81	T = 0	0.40	30.0	0,000963	2.096,00	10,80	0,000905	2.230,00	9,00
2					0,000963	2.095,00	11,00	0,000909	2.219,00	9,00
3					0,000964	2.093,00	11,30	0,000917	2.200,00	8,80
1	9.81	T = 15	0.40	30.0	0,000967	2.086,00	9,50	0,000965	2.090,00	6,00
2					0,000966	2.089,00	9,60	0,000913	2.210,00	6,70
3					0,000964	2.092,00	9,70	0,000938	2.150,00	6,50
1	9.81	T = 30	0.40	30.0	0,000965	2.090,00	8,50	0,000961	2.100,00	4,50
2					0,000964	2.093,00	9,00	0,000897	2.250,00	5,00
3					0,000966	2.088,00	8,80	0,000930	2.170,00	4,70

creto elaborado com brita de 9,5 mm, o teor de aditivo foi de 1,1% em relação à massa dos aglomerantes. O aditivo utilizado foi o de terceira geração à base de policarboxilato, apresentando peso específico de 1,087 g/cm³ e teor de sólidos de 30%. As características dos agregados e da sílica ativa utilizados são apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

As composições dos concretos CAD1 e CAD2 foram elaboradas com brita de diâmetro máximo característico de 16 mm e diferenciaram apenas na quantidade de superplastificante, que variou entre 0,1% e 0,2%. A Tabela 6 apresenta as composições dos concretos avaliados, salientando que o concreto elaborado com brita de diâmetro máximo característico de 9,5 mm, denominado de MCAD, serviu para efeito de comparação entre as propriedades reológicas obtidas pelo método do abatimento do tronco de cone modificado [20] com àquelas obtidas com o reômetro da UFSCar.

4.3 Ensaios dos concretos pelo método de FERRARIS; de LARRARD [20]

O comportamento reológico do concreto no estado fresco foi realizado através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado variando-se o tempo de repouso do concreto. O ensaio de abatimento de tronco de cone modificado, proposto por FERRARIS; de LARRARD [20] fornece os dois parâmetros reológicos, viscosidade e tensão crítica, necessários para a avaliação das propriedades reológicas do concreto fresco. Para fins de comparação dos resultados obtidos através deste método de ensaio foram realizados ensaios via reometria clássica, utilizando o reômetro disponível no Laboratório de Cerâmicas Especiais e Refratários do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar. Devido à limitação existente do reômetro utilizado, o qual permite ensaios com agregados graúdos de diâmetro característico de até 9,5 mm, foi neces-

sário desenvolver uma nova composição de concreto de alto desempenho apenas com agregados de diâmetro segundo a limitação permitida.

O procedimento de mistura influencia de maneira acentuada as propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido. No caso do CAD fez-se a adição do aditivo superplastificante ao final do período de repouso do concreto, diferentemente do procedimento padrão adotado nos concretos convencionais. Ambos tiveram um tempo total de mistura de 10 minutos. Já para o MCAD, o procedimento se diferenciou desde a seqüência de mistura dos materiais até o tempo total de produção do concreto que, neste caso, foi de 12 minutos. O procedimento de ensaio foi idêntico para todos os concretos.

Após o término da mistura do concreto, o material ficou em repouso por 5 minutos. Após este período, uma amostra de concreto foi ensaiada no aparelho de abatimento de tronco de cone modificado. Durante os ensaios o restante do concreto permaneceu dentro do misturador, sendo que a abertura do equipamento foi protegida com um pano úmido para se evitar a perda de água por evaporação.

Para a aquisição do tempo de abatimento parcial, foi utilizada uma filmadora de alta resolução. Esta filmadora foi montada de forma que fosse possível manter constante a visualização do disco desde o início até ao fim da sua queda de 100 mm, conforme Figura 7. Nota-se que a filmadora ficou devidamente posicionada acima do aparelho de abatimento modificado. Este posicionamento foi definido por ser o ponto em que se tem a melhor visualização da queda do disco. Para a edição das imagens capturadas pela filmadora digital profissional JVC DY-DV500 foi utilizado um software de computador específico para este tipo de trabalho. O software utilizado foi o *Ulead Video Studio 8*. Por meio dele foi possível a visualização com precisão do início e do fim do abatimento parcial do concreto, no qual foi possível a obtenção do tempo de duração da queda do disco.

Tabela 8 - Comparação da tensão crítica calculada pela técnica de Pashias e pela reometria clássica com seus respectivos erros para as argamassas com relação a/c = 0,40

Ensaio	Areia peneirada				Areia fina			
	Tempo (min)	Tensão crítica (Pa)			Tempo (min)	Tensão crítica (Pa)		
		Pashias	Reômetro	Erro (%)		Pashias	Reômetro	Erro (%)
1	T = 0	877.996	641.074	36,96	T = 0	1.101.310	722.278	52,48
2		861.381	620.180	38,89		1.081.667	689.027	56,98
3		836.732	601.336	39,15		1.106.451	687.996	60,82
1	T = 15	984.794	750.320	31,25	T = 15	1.355.440	808.869	67,57
2		977.253	733.220	33,28		1.344.055	802.320	67,52
3		969.757	713.271	35,96		1.331.783	775.068	71,83
1	T = 30	1,080.370	773.762	39,63	T = 30	1.567.754	1.127.525	39,04
2		1,034.026	798.772	29,45		1.593.905	1.096.364	45,38
3		1,050.436	760.131	38,19		1.601.009	1.131.626	41,48

O procedimento adotado para os ensaios reométricos foi feito de maneira a se ter a maior semelhança possível ao procedimento utilizado no ensaio de tronco de cone modificado, evitando-se, assim, grandes variações nos resultados a serem comparados. O equipamento utilizado é todo automatizado, o que vem a facilitar o seu manuseio e a realização do ensaio, permitindo menor interferência humana possível e, com isso, fornecendo um resultado confiável e próximo do comportamento real da amostra ensaiada. Para o funcionamento do reômetro foi elaborada uma programação dos torques aplicados e dos tempos de descanso do concreto, simulando

o realizado no tronco de cone modificado. A cuba do reômetro com o MCAD sendo ensaiado e o computador utilizado para a aquisição dos dados obtidos pelo equipamento são mostrados nas Figuras 8 e 9.

5. Resultados

5.1 Ensaios das Argamassas - método de PASHIAS et al. [19]

Os resultados experimentais aqui apresentados, massa específica

Figura 10 - Comparativo entre as tensões críticas obtidas para argamassas com a/c = 0,40

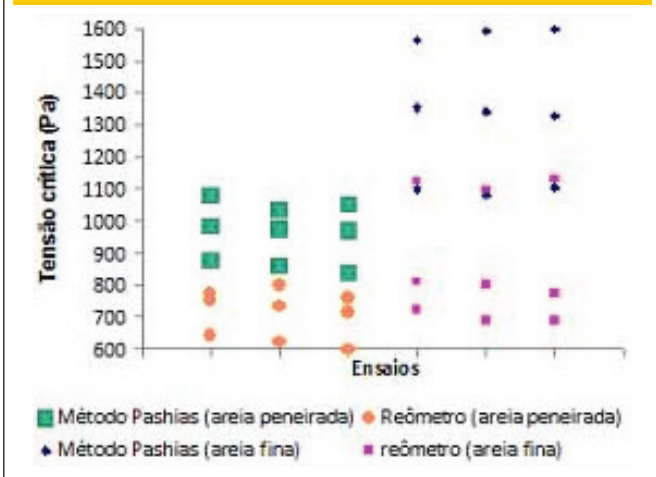
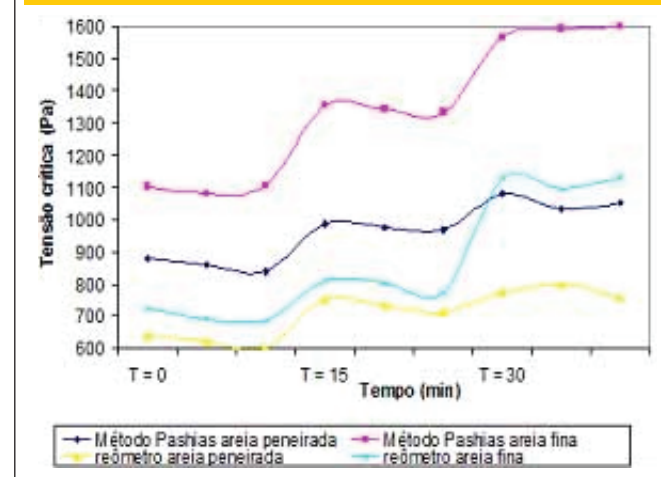


Figura 11 - Comportamento da tensão crítica em função do tempo para argamassa com a/c = 0,40



e variação do abatimento pelo ensaio do método de PASHIAS *et al.* [19], referem-se às argamassas cujas composições foram estabelecidas com diferentes relações água/cimento. Dois valores distintos de tensão crítica são apresentados:

- o primeiro é o valor da tensão crítica calculada a partir da equação 8;
- o segundo é o valor da tensão crítica dos ensaios realizados no reômetro.

Com esses dois valores, um oriundo da técnica de PASHIAS

et al. [19] e o outro de medidas mais aferidas e precisas (reômetro), foi possível comparar os resultados e avaliar a validade ou não do método alternativo de PASHIAS *et al.* [19] enquanto solução de baixo custo para a determinação do parâmetro reológico tensão crítica.

Os resultados apresentados no item 5.1.1 estão dispostos em função da variação de relação água/cimento (a/c), dos dois tipos de agregado miúdo, do cimento utilizado nas misturas e da variação do teor de aditivo superplastificante.

Tabela 9 - Técnica de Pashias: parâmetros necessários para o cálculo da tensão crítica das argamassas com relação a/c = 0,45

Ensaio	g (m/s ²)	Tempo (min)	a/c	H (cm)	Areia peneirada			Areia fina		
					Zo (m)	(kg/m ³) ^p	S (cm)	Zo(m)	(kg/m ³) ^p	S (cm)
1	9.81	T = 0	0.45	30.0	0,000985	2.048,00	17,50	0,000985	2.048,00	18,00
2					0,000984	2.050,00	17,00	0,000984	2.050,00	18,50
3					0,000983	2.053,00	17,50	0,000988	2.043,00	18,00
1	9.81	T = 15	0.45	30.0	0,001001	2.016,00	16,00	0,000979	2.060,00	15,00
2					0,000997	2.023,00	16,00	0,000980	2.058,00	14,70
3					0,000995	2.027,00	15,50	0,000978	2.063,00	15,00
1	9.81	T = 30	0.45	30.0	0,000996	2.026,00	14,50	0,000963	2.095,00	13,50
2					0,000994	2.030,00	14,50	0,000968	2.084,00	13,50
3					0,000990	2.037,00	14,00	0,000971	2.077,00	13,00

Tabela 10 - Comparação da tensão crítica calculada pela técnica de Pashias e pela reometria clássica com seus respectivos erros para as argamassas com relação a/c = 0,45

Ensaio	Tempo (min)	Areia peneirada			Areia fina		
		Tensão crítica (Pa)			Tensão crítica (Pa)		
		Pashias	Reômetro	Erro (%)	Pashias	Reômetro	Erro (%)
1	T = 0	428,489	279,055	53,55	403,175	309,494	30,27
2		455,033	300,795	51,28	378,990	298,814	26,83
3		429,522	297,453	44,40	402,199	314,277	27,98
1	T = 15	501,395	299,029	67,67	570,769	330,124	72,90
2		503,117	324,626	54,98	588,494	339,064	73,56
3		532,452	327,453	62,60	571,325	347,555	64,38
1	T = 30	591,607	352,175	67,99	677,074	373,810	81,13
2		592,765	351,080	68,84	673,545	378,154	78,11
3		626,115	357,840	74,97	705,398	391,332	80,26

Figura 12 – Comparativo entre as tensões críticas obtidas para as argamassas com a/c = 0,45

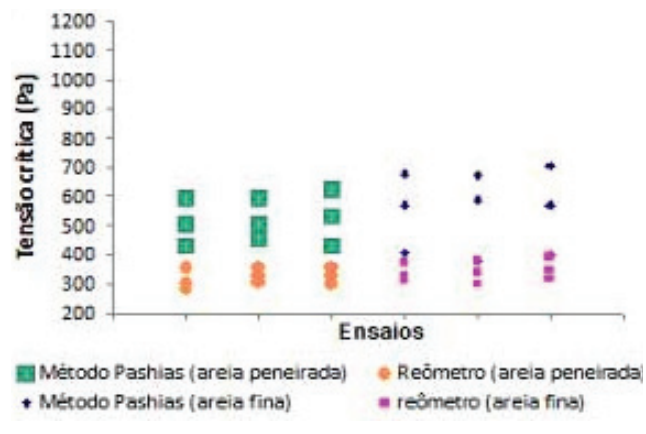


Figura 13 – Comportamento da tensão crítica em função do tempo para as argamassas com a/c = 0,45

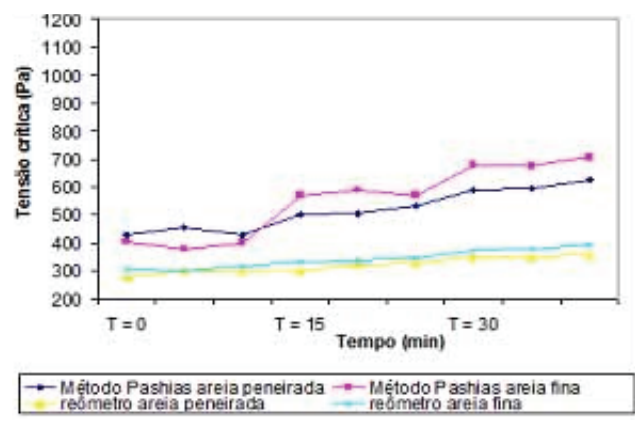


Tabela 11 – Técnica de Pashias: parâmetros necessários para o cálculo da tensão crítica das argamassas com relação a/c = 0,50

Ensaio	g (m/s ²)	Tempo (min)	a/c	H (cm)	Areia peneirada			Areia fina		
					Zo (m)	ρ (kg/m ³)	S (cm)	Zo(m)	ρ (kg/m ³)	S (cm)
1	9.81	T = 0	0.50	30.0	0,000987	2.045,00	26,00	0,000985	2.040,00	23,70
2					0,000984	2.050,00	26,00	0,000984	2.036,00	24,00
3					0,000981	2.057,00	25,50	0,000988	2.042,00	24,00
1	9.81	T = 15	0.40	30.0	0,001004	2.010,00	24,50	0,000979	2.090,00	23,00
2					0,001001	2.015,00	24,50	0,000980	2.085,00	23,30
3					0,001000	2.018,00	25,00	0,000978	2.093,00	23,00
1	9.81	T = 30	0.50	30.0	0,000975	2.070,00	24,50	0,000963	2.010,00	21,50
2					0,000977	2.065,00	24,00	0,000968	2.014,00	21,50
3					0,000980	2.059,00	24,50	0,000971	2.019,00	21,70

5.1.1 Argamassas com relação água/cimento 0,40 produzidas com o cimento CPV ARI

Os ensaios realizados para a determinação da tensão crítica pelo método de PASHIAS *et al.* [19] e pelo reômetro, para as argamassas produzidas com os dois tipos de agregados miúdos, são apresentados na Tabela 7 para a relação a/c igual a 0,40. Na Tabela 8 apresentam-se os dois valores para as tensões críticas obtidas, assim como o percentual de erro entre os dois resultados obtidos nos diferentes ensaios.

A comparação entre as tensões críticas obtidas no método de PASHIAS *et al.* [19] e aquelas obtidas com auxílio do reômetro em função do número de ensaios realizados, para a argamassa elaborada com os dois tipos de agregado miúdo, é representada

na Figura 10. Os comportamentos das tensões críticas em função do tempo de repouso do material são apresentados na Figura 11. Os valores médios encontrados para a tensão crítica foram superiores para as argamassas elaboradas com a areia fina tanto no ensaio pelo método de PASHIAS *et al.* [19] quanto no ensaio reométrico. Para estas mesmas argamassas verifica-se que os erros calculados, conforme Tabela 8, foram superiores aos das argamassas elaboradas com areia peneirada, o que também pode ser observado na Figura 10, onde pode-se notar uma maior dispersão de pontos para as argamassas elaboradas com areia fina, para os três tempos (T= 0min, T = 15min e T = 30min). A partir da figura 11 percebe-se que os comportamentos das tensões em função do tempo são bem parecidos, com um desvio apenas para a reometria da argamassa com areia fina, a partir de um tempo de repouso

Tabela 12 - Comparação da tensão crítica calculada pela técnica de Pashias e pela reometria clássica com seus respectivos erros para as argamassas com relação a/c = 0,50

Ensaio	Areia peneirada				Areia fina			
	Tempo (min)	Tensão crítica (Pa)			Tempo (min)	Tensão crítica (Pa)		
		Pashias	Reômetro	Erro (%)		Pashias	Reômetro	Erro (%)
1	T = 0	91,462	77,856	17,48	T = 0	163,704	153,328	6,77
2		91,680	73,095	25,43		153,213	150,454	1,83
3		106,728	78,002	36,83		153,655	153,078	0,38
1	T = 15	135,040	95,902	40,81	T = 15	192,893	165,975	16,22
2		135,366	108,814	24,40		181,490	162,186	11,90
3		119,855	101,548	18,03		193,167	163,742	17,97
1	T = 30	138,977	146,246	4,97	T = 30	241,792	181,163	33,47
2		155,347	144,507	7,50		242,266	179,246	35,16
3		138,254	135,815	1,80		235,009	195,834	20,00

Tabela 13 - Tratamento estatístico dos resultados de argamassas com a/c = 0,50 e areia peneirada

Areia peneirada	Método Pashias			Reômetro		
	T = 0 min	T = 15 min	T = 30 min	T = 0 min	T = 15 min	T = 30 min
Tensão média (Pa)	96,62	130,09	144,19	76,32	102,09	142,19
Desvio padrão	8,75	8,86	9,67	2,79	6,47	5,59
Tensão máxima (Pa)	106,73	135,37	155,35	78,00	108,81	146,25
Tensão mínima (Pa)	91,46	119,86	138,25	73,10	95,90	135,82
Coefficiente de variação (%)	9,06	6,81	6,70	3,66	6,34	3,93

Tabela 14 - Tratamento estatístico dos resultados de argamassas com a/c = 0,50 e areia fina

Areia peneirada	Método Pashias			Reômetro		
	T = 0 min	T = 15 min	T = 30 min	T = 0 min	T = 15 min	T = 30 min
Tensão média (Pa)	156,86	189,18	239,69	152,29	163,97	185,41
Desvio padrão	5,93	6,66	4,06	1,59	1,90	9,07
Tensão máxima (Pa)	163,70	193,17	242,27	153,33	165,98	195,83
Tensão mínima (Pa)	153,21	181,49	235,01	150,45	162,19	179,25
Coefficiente de variação (%)	3,78	3,52	1,69	1,05	1,16	4,89

de aproximadamente 20 minutos, chegando até mesmo a ultrapassar a curva das tensões calculadas pelo método de Pashias para as argamassas com areia peneirada após 30 minutos.

5.1.2 Argamassas com relação água/cimento 0,45 produzidas com o cimento CPV ARI

A Tabela 9 apresenta os dados obtidos nos ensaios realizados

Figura 14 - Comparativo entre as tensões críticas obtidas para as argamassas com a/c = 0,50

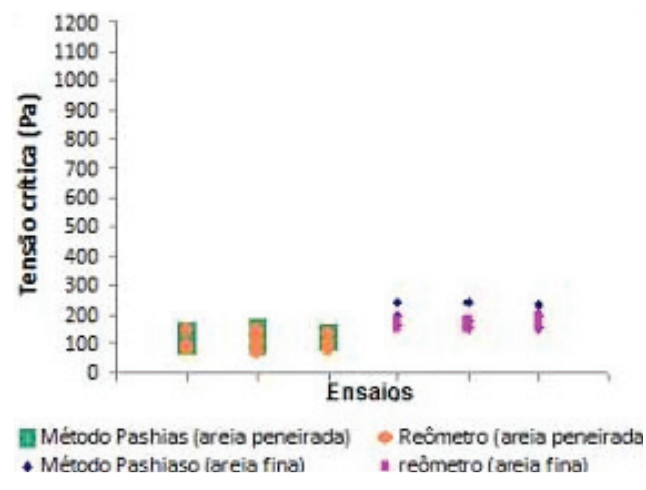


Figura 15 - Comportamento da tensão crítica em função do tempo para as argamassas com a/c = 0,50

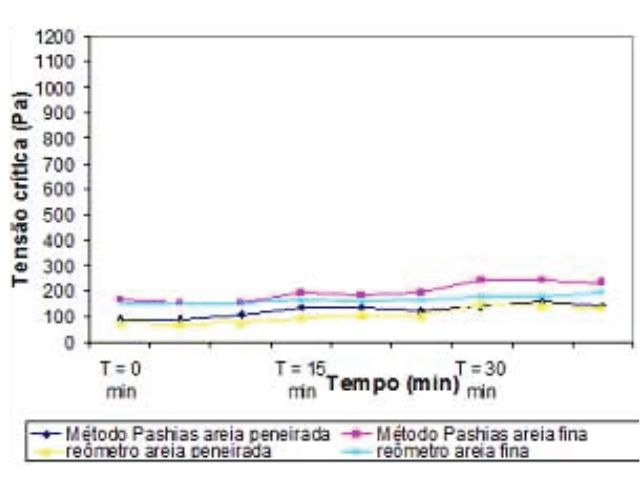


Figura 16 - Curvas reológicas para a argamassa produzida com CPV ARI, a/c = 0,50 e areia peneirada, sem aditivo superplastificante, para os tempos T = 0, 15 e 30 min

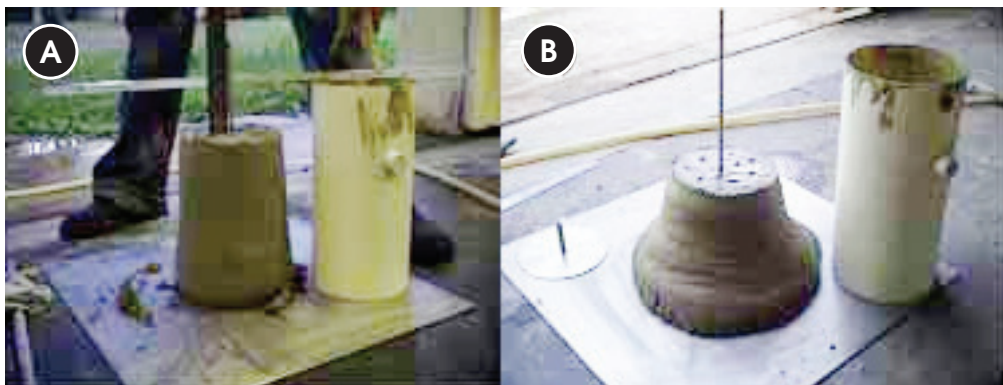
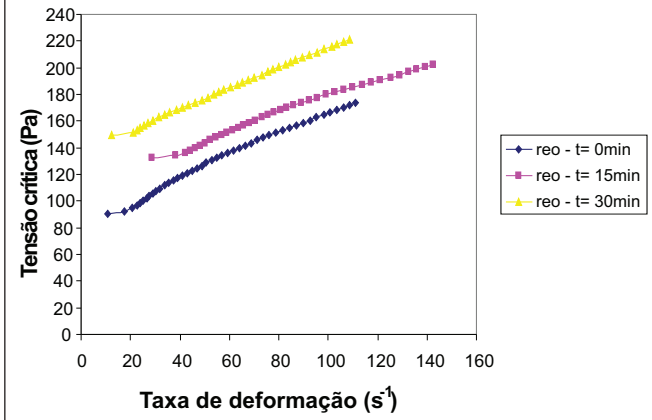


Tabela 15 - Comparação da tensão crítica calculada pela técnica de Pashias e pela reometria clássica com seus respectivos erros, para a argamassa produzida com CPV ARI, a/c = 0,50 e areia peneirada

Ensaio	Tempo (min)	a/c	S (cm)	Z ₀ (m)	ρ (kg/m ³)	Tensão crítica (Pa)		
						Pashias	Reômetro	Erro (%)
1	T = 0		26,50	0,000988	2.043,00	77,328	69,480	10,15
2	T = 15	0,50	25,00	0,001010	2.040,00	121,141	102,864	17,87
3	T = 30		24,30	0,000985	2.085,00	146,633	136,817	6,70

Figura 17 - Curvas do abatimento obtido pelo ensaio de abatimento de tronco de cone modificado em função do tempo para concretos ensaiados



para a determinação da tensão crítica pelo método de PASHIAS *et al.* [19] para a argamassa produzida com os dois tipos de agregado miúdo e relação a/c igual a 0,45.

Os valores das tensões críticas obtidas via reometria clássica são comparados com aqueles obtidos via método de PASHIAS *et al.* [19], assim como o percentual de erro presente na Tabela 10.

A comparação entre as tensões críticas obtidas no método de PASHIAS *et al.* [19] e a obtida com o auxílio do reômetro, considerando os dois tipos de agregado miúdo, é representada na Figura

12 e os comportamentos das tensões em função do tempo são apresentados na Figura 13.

Analisando a Figura 12, percebe-se que existe uma menor dispersão dos valores de tensão crítica obtidos via reometria clássica, sugerindo que esses valores apresentam-se na mesma faixa de grandeza. Novamente as argamassas elaboradas com areia fina, na maioria dos ensaios, apresentaram uma margem de erro superior. Ao observar as curvas da Figura 13, referentes aos valores de tensão crítica calculada pela técnica de Pashias, verifica-se que a curva pertencente às argamassas elaboradas com areia fina começa com valores menores aos da curva pertencente às argamassas elaboradas com areia peneirada para o tempo (T=0min), e com o passar do tempo (T = 15min e T = 30min), seus valores de tensão ficam maiores. O que fica bastante evidente na Figura 13 é o comportamento mais linear para os ensaios reométricos, enquanto que no método de Pashias percebe-se um comportamento mais instável das tensões em função do tempo.

5.1.3 Argamassas com relação água/cimento 0,50 produzidas com o cimento CPV ARI

Os ensaios realizados para a determinação da tensão crítica pelo método de PASHIAS *et al.* [19] para as argamassas produzidas com os dois tipos de agregado miúdo e relação a/c igual a 0,50 são apresentados na Tabela 11, enquanto na Tabela 12 são comparados os dois valores de tensão crítica obtidos pelo método de PASHIAS *et al.* [19] e com auxílio do reômetro, assim como o percentual de erro entre eles.

Para todas as misturas ensaiadas foram feitos os tratamentos estatísticos dos resultados obtidos. Para a mistura com relação a/c igual a 0,50, a média das tensões críticas, assim como o coeficiente de variação e o desvio padrão para os dois casos analisados

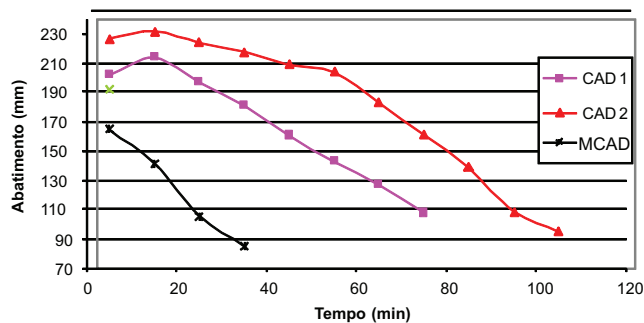
Tabela 16 - Parâmetros reológicos obtidos para as curvas reológicas da argamassa produzida com CPV ARI, a/c = 0,50 e areia peneirada, sem aditivo superplastificante

Tempo de medida (min)	τ_c	K (Pas ⁿ)	
		Índice de consistência	n
T = 0	69,480	2,498	0,684
T = 15	102,864	2,276	0,867
T = 30	136,817	1,749	0,905

Tabela 17 - Valores de abatimento obtidos pelo ensaio de abatimento de tronco de cone modificado ao longo do tempo para os concretos ensaiados

Concretos	Tempo de medida (minutos)										
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105
CAD 1	202	214	197	181	161	143	127	108	-	-	-
CAD 2	226	231	224	218	209	204	183	161	139	109	95
MCAD	165	142	105	85	-	-	-	-	-	-	-

Figura 18 – Curvas do abatimento obtido pelo ensaio de abatimento de tronco de cone modificado em função do tempo para concretos ensaiados



(Pashias e Reômetro) e para os dois tipos de agregados miúdos utilizados são apresentados nas Tabelas 13 e 14.

A comparação entre as tensões críticas obtidas no método de Pashias e a obtida com o auxílio do reômetro, considerando os dois tipos de agregado miúdo, para os ensaios realizados é representada na Figura 14. O comportamento das tensões em função do tempo é apresentado na Figura 15.

Observando as Tabelas 13 e 14 na linha referente à tensão média, verifica-se que os valores da tensão crítica média encontrada para as argamassas elaboradas com areia fina são superiores àquelas elaboradas com areia peneirada. Na Figura 15 observa-se que a ordem de grandeza entre os valores da tensão crítica calculada pelo método de Pashias e pelo reômetro para as argamassas elaboradas com areia peneirada para T = 30 min é praticamente a mesma. Isto também está evidente para as argamassas elaboradas com areia fina, porém para T = 0 min, como pode ser comprovado pela Tabela 14, verifica-se uma considerável diminuição do erro para este tempo.

5.2 Discussão dos resultados

5.2.1 Argamassas – Método de Pashias et al. [19]

Quando se compara os valores das tensões críticas das argamassas elaboradas com um único tipo de cimento, levando-se em considera-

Tabela 18 – Resultados da tensão crítica ao longo do tempo dos concretos ensaiados

Tempo de medida (min)	Tensão crítica (Pa)	Tipos de concretos		
		CAD1	CAD2	MCAD
5	5	872	709	1.121
15	15	791	675	1.278
25	25	906	726	1.525
35	35	1.013	768	1.660
45	45	1.148	827	-
55	55	1.269	860	-
65	65	1.377	1.003	-
75	75	1.505	1.146	-
85	85	-	1.298	-
95	95	-	1.500	-
105	105	-	1.593	-

ção apenas a variação da relação a/c, observa-se que quanto maior a relação água/cimento, menor o valor da tensão crítica obtida. Uma mistura, com maior relação a/c possui maior quantidade de água e, conseqüentemente, maior fluidez, o que garante maiores valores para o abatimento (S), sendo este valor um fator preponderante para o cálculo da tensão crítica pelo método de Pashias. Na figura 18 pode-se verificar este fato para duas das três relações a/c utilizadas. Analisando as figuras 11, 13 e 15, referentes às curvas do comportamento da tensão crítica em função do tempo, observa-se que a tensão aumenta com o aumento do tempo de repouso da amostra de argamassa. Isto pode ser justificado pelas diversas reações químicas envolvidas durante o processo de hidratação do cimento, quando ocorre a pega do material, fazendo com que esse perca a fluidez com o passar do tempo. As curvas reológicas foram determinadas para as argamassas elaboradas com o cimento CPV ARI, relação a/c igual a 0,50 e

Figura 19 – Perda de abatimento contínua e gradual durante o tempo de medida do ensaio



Figura 20 – Curva tensão crítica versus tempo para os concretos ensaiados

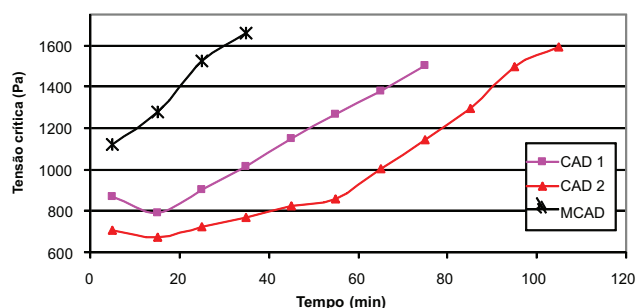


Figura 21 – Evolução dos tempos de abatimentos dos concretos ensaiados

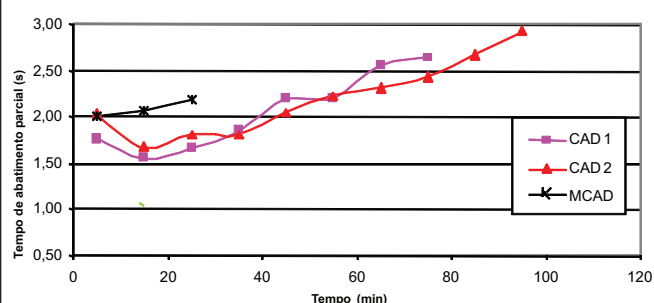


Tabela 19 – Tempos de abatimento parcial obtidos pelo ensaio de abatimento de tronco de cone modificado ao longo do tempo para os concretos ensaiados

Concretos	Tempo de medida (minutos)										
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105
CAD 1	1,77	1,56	1,66	1,86	2,19	2,20	2,56	2,64	-	-	-
CAD 2	2,03	1,68	1,81	1,81	2,05	2,23	2,32	2,43	2,68	2,93	-
MCAD	0,90	1,03	1,51	1,67	1,76	-	-	-	-	-	-

apenas com areia peneirada, sem o uso de aditivo superplastificante. A Tabela 15 apresenta os valores obtidos da tensão crítica calculada pela técnica de Pashias e pela reometria clássica com seus respectivos erros.

A Figura 16 apresenta a curva reológica obtida para a argamassa descrita anteriormente, com o reômetro R/S Brookfield dotado de geometria *vane*, controlando a tensão de cisalhamento e medindo a taxa de cisalhamento ou deformação resultante.

Os valores da tensão crítica e da taxa de deformação obtidos pelo reômetro foram filtrados retirando os valores da taxa de deformação abaixo de 10 s^{-1} e acima de 160 s^{-1} , a fim de se determinar valores mais confiáveis, *vis à vis* das limitações também do reômetro em baixas taxas de deformação. Ressalta-se o controle nos ensaios reométricos que descartam qualquer possibilidade de escorregamento nas paredes dos *spindels*. Pela observação da Figura 16 e pela Tabela 15, observa-se que os valores de tensão crescem gradativamente com o passar do tempo. Verificou-se uma boa adequação dos resultados ao modelo reológico de Herschel-Bulkley com uma concavidade pouco acentuada, pois os valores do coeficiente de escoamento n (equação 12) variaram praticamente entre 0,70 e 0,90, característico de materiais pseudoplásticos, chegando próximo a 1 (comportamento binghamiano, conforme elucidado no item 2.1). A Tabela 16 apresenta os valores dos parâmetros desta equação para cada curva obtida.

$$\tau = \tau_c + K\dot{\gamma}^n \quad (12)$$

onde K é o índice de consistência de escoamento.

5.2.2 Concretos – Método de Ferraris; de Larrard [20]

5.2.2.1 Determinação e avaliação da tensão crítica

Na Tabela 17 são apresentados os valores dos abatimentos obtidos para os três concretos (CAD1, CAD2 e MCAD) determinados através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado. A figura 17 apresenta a evolução do abatimento em função do tempo para os três concretos.

Observa-se, para todos os concretos, uma perda contínua e gradual de abatimento ao longo do tempo. Entretanto, nos primeiros quinze minutos de ensaio, com exceção do MCAD, percebe-se que o abatimento aumentou com o tempo e, a partir de então, houve uma queda gradual do mesmo em função do tempo. Este comportamento pode ser justificado pelo fato do procedimento de mistura empregado para a produção do CAD1 e do CAD2 não oferecer energia suficiente para a completa dispersão e reação do superplastificante com o cimento. As moléculas do superplastificante necessitam de um tempo maior para reagirem com o cimento, ocasionando este ganho inicial de abatimento. Para o caso do MCAD, o procedimento de mistura foi diferenciado oferecendo energia suficiente para a dispersão das moléculas do superplastificante, diferentemente do caso dos outros CAD's

Embora os concretos tenham níveis diferentes de perda de abatimento, as curvas obtidas são paralelas, ou seja, apresentaram o mesmo comportamento reológico. Não foi possível analisar a influência dos demais materiais no comportamento do CAD, uma

Tabela 20 – Resultados da viscosidade ao longo do tempo dos concretos ensaiados

Tempo de medida (min)	Viscosidade μ (Pa.s)	Concretos		
		CAD1	CAD2	MCAD
5	103	119	117	
15	91	98	120	
25	97	106	127	
35	109	106	-	
45	128	120	-	
55	129	130	-	
65	150	136	-	
75	154	142	-	
85	-	157	-	
95	-	171	-	

vez que se optou unicamente por variar a quantidade do teor de superplastificante utilizado.

A Figura 18 mostra essa perda de abatimento em três fases distintas: em um primeiro momento, logo após a mistura, o abatimento do concreto é alto devido à baixa tensão crítica necessária ao início do seu escoamento; num segundo momento, ao longo do tempo, nota-se que a tensão crítica do concreto aumentou diminuindo seu abatimento; e, no último momento, quando o concreto obteve abatimento muito baixo apresentando uma elevada tensão crítica. A perda de abatimento é considerada como um fenômeno normal nos concretos, pois é resultado do seu processo de pega e endurecimento. No caso dos CAD's e do MCAD analisados variou-se unicamente a quantidade de superplastificante utilizado. Assim sendo, nota-se que o concreto intitulado CAD2, que obteve a maior dosagem de superplastificante, foi o concreto de comportamento mais fluido, com o maior tempo de início de pega.

No caso do MCAD, a dosagem de superplastificante é a mesma adotada para o CAD2, porém, por se utilizar o agregado graúdo de diâmetro inferior ao do CAD, a superfície específica aumentou. A utilização da brita de 9,5 mm fez com que o abatimento do MCAD fosse inferior ao CAD 2.

As tensões críticas dos concretos avaliados estão apresentadas na Tabela 18. Na figura 19 são ilustrados os desenvolvimentos das tensões críticas em função do tempo para os concretos ensaiados. A tensão crítica do concreto é inversamente proporcional ao seu abatimento, conforme Equação 9 proposta por FERRARIS; de LARRARD [20]. As curvas de tensão dos dois concretos CAD1 e CAD2 são proporcionais, porém estão em níveis diferentes de tensão. Segundo TATTERSALL [30] esse fato está relacionado com a defloculação das partículas de cimento. Este comportamento também foi obtido por CASTRO [22]. A dosagem do superplastificante do MCAD foi idêntica à utilizada no CAD2, porém os níveis de tensão foram diferentes. Esta diferença ocorreu devido à mudança

do agregado graúdo utilizado no MCAD (brita de 9,5 mm). Esta modificação fez com se aumentasse a superfície específica dos agregados, ocasionando um concreto com tensão crítica superior. O comportamento do MCAD nos primeiros 15 minutos foi diferente do comportamento dos CAD's, isso porque o procedimento de mistura do concreto foi diferente, tendo sido empregado um procedimento mais eficiente para a dispersão das moléculas de superplastificante.

É bom observar que as perdas de trabalhabilidade do concreto associadas ao ganho da tensão crítica estão relacionados com o processo de pega do concreto. Com o passar do tempo, o concreto passa a se enrijecer devido às reações de hidratação do cimento.

5.2.2.2 Determinação e avaliação da viscosidade

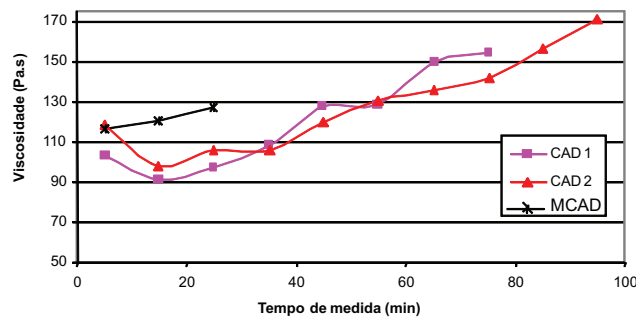
Na Tabela 19 são apresentados os tempos do abatimento parcial dos concretos de alto desempenho (CAD's e MCAD) obtidos pelo ensaio de abatimento de tronco de cone modificado. A Figura 20 mostra a evolução dos tempos de abatimentos parciais dos concretos ensaiados.

A viscosidade plástica do concreto com abatimento superior a 200 mm é unicamente proporcional ao tempo de abatimento parcial do concreto e, para abatimentos totais entre 200 mm e 260 mm, a viscosidade é proporcional à relação entre o abatimento total e o tempo de abatimento parcial, conforme as Equações 10 e 11 propostas por FERRARIS; de LARRARD [20].

Nota-se que na Equação 10 para abatimentos totais variando entre 200 mm e 260 mm, a viscosidade é superestimada. Esses valores não se adequaram à situação real da mistura de concreto ensaiada. CASTRO [22] constatou esta diferença nos seus concretos e concluiu que o valor da viscosidade calculada a partir desta equação foi superestimado com relação ao seu desenvolvimento ao longo do tempo. Como forma de correção, a autora adotou apenas a Equação 11 para todas as determinações, procedimento também adotado aqui. A Tabela 20 apresenta os valores da viscosidade dos concretos, para todas as amplitudes de abatimento totais. Na figura 21 é ilustrado o desenvolvimento da viscosidade versus tempo para esta nova relação.

Com base nos resultados da Figura 21, pode-se observar que a adição de superplastificante ao concreto pouco influenciou na sua viscosidade. A bibliografia consultada [20; 22; 29], ressalta que a

Figura 22 – Curva da viscosidade versus tempo para os concretos ensaiados



variação da viscosidade do concreto depende das proporções de materiais empregados na sua composição e também do seu tempo de pega. O concreto de alto desempenho é um concreto mais viscoso que o concreto convencional, sendo chamado de "pegajoso". Isto é devido à relação água/aglomerante e a proporção de aditivos adicionados ao mesmo.

6. Conclusões

No que diz respeito à determinação dos parâmetros reológicos de misturas à base de cimento, em particular para as argamassas e concretos testados nesta pesquisa, pôde-se concluir que os dispositivos ou técnicas alternativas (Pashias para argamassas e abatimento de tronco de cone modificado para concretos) puderam fornecer valores de tensão crítica e viscosidade aceitáveis quando do uso desse tipo de material em aplicações da construção civil. A reometria convencional, balizada pelo uso de reômetros, apontou valores de parâmetros reométricos de mesma ordem de grandeza que os dispositivos testados. Os erros ou distanciamentos detectados nos experimentos, para esse tipo de pesquisa e dentro das condições experimentais prescritas, são aceitáveis. Ademais, pôde-se inferir ainda que de forma indireta o modelo reológico binghamiano, com dois parâmetros reológicos (tensão crítica ou de escoamento e viscosidade), mostrou-se como condição necessária e suficiente para representar bem as composições de concreto tratadas neste trabalho.

Para as argamassas testadas, em particular o uso da areia fina na composição, eleva a tensão crítica quando comparada à areia peneirada, resultado consoante com a literatura [11; 20]. Seu comportamento reológico, para caso particular testado, pareceu adequar-se mais a um modelo de Herschel-Bulkely, com três parâmetros reológicos.

Para os concretos de alto desempenho testados o abatimento de tronco de cone variou proporcionalmente à quantidade de superplastificante utilizado, confirmando a influência da porcentagem de adição dos aditivos superplastificante na trabalhabilidade dos concretos. O microconcreto de alto desempenho (MCAD) obteve abatimento de grandeza inferior ao CAD2, embora as quantidades de superplastificantes de ambos sejam iguais. As possíveis causas para este fato é que MCAD apresenta agregado graúdo com superfície específica maior (diâmetro menor) o que faz com que a mistura apresente empacotamento dos materiais mais eficiente que os demais CAD's.

Um fato marcante em relação ao abatimento de tronco de cone foi que todos os concretos tiveram a curva de abatimento com a mesma inclinação, ou seja, a perda de abatimento em função do tempo de medida dos concretos está na mesma proporção. A perda e abatimento e o ganho de tensão de escoamento foi contínua e gradual para as composições de concreto testadas.

A viscosidade do concreto pouco variou durante a realização dos ensaios (mesma ordem de grandeza). Assim, nota-se que a influência do superplastificante na viscosidade do concreto é pouco significativa, quando comparado com a influência da tensão e torque de escoamento. Este fato observado está de acordo com o que se apresenta na literatura consultada [5; 6; 22].

O esquema de filmagem utilizado para captura do tempo de abatimento, no uso da técnica do tronco de cone modificado foi de grande valia, uma vez que as incertezas que foram mensuradas, ao final do levantamento de dados dos ensaios, foram minimizadas devido aos novos recursos utilizados.

O MCAD foi ensaiado com o reômetro de concreto (UFSCar) e feito os ajustes nas partes ascendentes e descendentes da curva de cisalhamento. Através destes dados foi identificado o comportamento reológico da mistura, o que mostrou que o MCAD se comporta como um fluido binghamiano. A parte da curva ascendente foi a que melhor se adequou por apresentar melhores coeficientes de ajuste da reta e também por ser o período em que a tensão de escoamento é vencida [29]. Observou-se também que a área de histerese para o concreto MCAD ensaiado apontava comportamento tixotrópico, conforme vem sendo observado por alguns autores estrangeiros (item não explorado neste artigo).

Por fim, o processo de perda da trabalhabilidade das misturas de alto desempenho (CAD's e MCAD), avaliado através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado, mediante a determinação dos parâmetros reológicos, foi representado por um aumento da tensão de escoamento, enquanto a viscosidade plástica pouco variou durante o ensaio. O aumento da tensão de escoamento do concreto indica perda de trabalhabilidade das misturas com o decorrer do tempo, ou seja, para iniciar o escoamento, a resistência a ser vencida aumenta e sua fluidez diminui com o decorrer do tempo. Este comportamento está de acordo com os resultados encontrados na literatura. Os resultados obtidos através do ensaio com o reômetro de concreto para avaliar a trabalhabilidade da mistura são: torque de escoamento e viscosidade de torque. Conforme Reis [29], o torque de escoamento do MCAD aumentou e a viscosidade de torque pouco se modificou, ambos ao longo do tempo, após o final da mistura do concreto. Isto mostra que o efeito da hidratação do cimento e os efeitos químicos dos aditivos e adições minerais fizeram com que a mistura perdesse trabalhabilidade ao longo do tempo, comportamento este também consoante com a literatura.

7. Referências bibliográficas

- [01] HU, C. *et al.*, Validation of BTRHEOM : The new rheometer of self-to-fluid concrete. *Materials and Structures*, V.29, n.194, p. 620-631, Dec.1996.
- [02] De LARRARD, F. *et al.*, Evolution of the workability of superplasticized concretes: Assesment with the BTRHEOM rheometer, In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE – PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, 1996, Pailey/Scotland. *Proceedings...* London: E&FN Spon, 1996. p.377-388.
- [03] ANTUNES, R.P.N., Influencia da Reologia e da Energia de Impacto na Resistência de Aderência de Revestimento de Argamassa, 2005, 162p, Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP.
- [04] FERRARIS, C.F., Measurement of Rheological properties of high performance concrete state of the art report, NISTIR 5869, July,1996.
- [05] TATTERSALL, G. H., BANFILL, P.F.G., The rheology of fresh concrete, London : Pitman, 1983, 347p.
- [06] BANFILL, P. F. G. A coaxial cylinders viscosimeter for mortar: design and experimental validation. In: RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE, 1990, London. *Proceedings...* London: E & FN Spon, 1991. p. 217-226.

- [07] BEITZEL, H. Automation of concrete construction site. In: international rilem workshop – special concretes: workability and mixing, 1993, Paisley/Scotland. *Proceedings...* London: E & FN Spon, 1994. p. 7-13.
- [08] BARNES H.A., WALTERS, K. The yield stress myth. *Rheol. Acta* 24:323-326, 1985.
- [09] ASTARITA, G. "Letter to the editor. The engineering reality of yield stress" *J. Rheol* 34:275-277, 1990.
- [10] De LARRARD, F., FERRARIS, C.F., SEDRAN, T., Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material. *Materials and Structures*, v. 31, p. 494-498, Aug.-Sep., 1998.
- [11] PILEGGI, R.G. *et al.*, Conceitos reológicos aplicados no desenvolvimento de argamassas. e-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil Vol. 3, n. 2, p. 62-76, Novembro 2006.
- [12] OLIVEIRA, I. R. *et al.* Dispersão e empacotamento de partículas: princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo, 2000. 224 p.
- [13] METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M., *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON, 2008. 573p.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR NM 67: concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8p.
- [15] CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração de cone. ANAIS, Florianópolis, VI SBTA, 2005, p. 83-94.
- [16] SANTOS, C. N.; BAUER, E. A influência do tempo de mistura e do teor de água na projetabilidade das argamassas industrializadas. ANAIS, São Paulo, V SBTA, 2003, p. 339-351.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 15839: argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos - caracterização reológica pelo método squeeze flow. Rio de Janeiro, 2010. 6p.
- [18] CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze flow. ANAIS, Florianópolis, VI SBTA, 2005, p. 121-143.
- [19] PASHIAS, N. *et al.*, A fifty cent rheometer for yield stress measurement, *J. Rheol.* 40, p. 1179-1189. 1996.
- [20] FERRARIS, C.F.; De LARRARD, F. Modified slump test to measure rheological parameters of fresh concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, v. 20, n. 2, p. 241-247, Dec. 1998.
- [21] BAUDEZ, J.C.; CHABOT, F.; COUSSOT, F.; Rheological Interpretation of the Slump Test, *Applied Rheology*, May /June 2002, pp 133-141.
- [22] CASTRO, A.L.; Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais). EESC-USP, São Carlos, 2007.
- [23] POWERS, T.C. *The properties of fresh Concrete*. New York : John Wiley & Sons, 1968, 664 p.
- [24] De LARRARD, F. *et al.*, A new rheometer for soft-to-fluid concrete, *ACI Materials Journal*, v.94, n.3, p. 234-243, May-June. 1997.
- [25] PILEGGI, R.G., Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários. 2001, 187 p. Tese(doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), UFSCar. Sao Carlos/SP, 2001.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 5733: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR NM 52: agregado miúdo - determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6p.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR NM 53: agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8p.
- [29] REIS, J. F. A.; Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone Modificado: Estudo de Caso., *Dissertação de mestrado*, UNESP/Ilha Solteira, dezembro 2008, 174p.
- [30] TATTERSALL, G. H. *Workability and quality control of concrete*. London: E & FN Spon, 1991. 262p.