

Evaluation of fresh high performance concrete behavior by rheometer assistance

Avaliação do comportamento de concretos de alto desempenho no estado fresco com o auxílio de um reômetro



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

J. B. L. LIBORIO^b
liborioj@sc.usp.br

V. C. PANDOLFELLI^c
vicpando@power.ufscar.br

Abstract

To study the behavior of fresh concrete, nothing is more appropriate than applying the concepts of rheology. It is known that this material behaves as a Bingham fluid and two rheological parameters are needed to describe it: yield stress and plastic viscosity. In recent years, rheology of fresh concrete has been studied with the aid of the slump test or with rheometers. As the slump test does not seem to describe its rheological behavior correctly, this paper presents an evaluation of fresh high performance concrete behavior using a rheometer. Based on the flow curves, their rheological nature and parameters that describe their behavior can be observed. Moreover, the influence of composition and the mixing procedure can be observed as well as the workability evolution over time.

Keywords: *high performance concrete; workability; rheology; rheometer.*

Resumo

Para se estudar o comportamento do concreto no estado fresco, nada mais adequado do que aplicar os conceitos da reologia. Sabe-se que este material se comporta como um fluido binghamiano, sendo necessários dois parâmetros reológicos para sua caracterização: tensão de escoamento e viscosidade plástica. Nos últimos anos, a reologia do concreto fresco tem sido estudada tanto pelo ensaio de abatimento de tronco de cone quanto com reômetros. Como o ensaio de abatimento não parece caracterizar corretamente seu comportamento reológico, o presente trabalho apresenta a avaliação do comportamento de concretos de alto desempenho no estado fresco com o auxílio de um reômetro. A partir das curvas de cisalhamento é possível identificar sua natureza e parâmetros reológicos que caracterizam seu comportamento. Além disso, as influências da composição e do procedimento de mistura podem ser observadas, bem como a evolução da trabalhabilidade ao longo do tempo.

Palavras-chave: *concreto de alto desempenho; trabalhabilidade; reologia; reômetro.*

^a Engenheira Doutora, Pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, e-mail: alcastro@ipt.br, Av. Professor Almeida Prado, 532, Prédio 1, Cidade Universitária, CEP 05508-901, São Paulo/SP, Brasil;

^b Professor Doutor, Coordenador do Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, e-mail: liborioj@sc.usp.br, Av. Trabalhador Sancarlene, 400, Centro, CEP 13566-590, São Carlos/SP, Brasil;

^c Professor Doutor, Coordenador do Laboratório de Cerâmicas Especiais e Refratários/Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, e-mail: vicpando@power.ufscar.br, Rod. Washington Luiz, km 235, Monjolinho, CEP 13565-905, São Carlos/SP, Brasil.

1. Introdução

Termos como trabalhabilidade, consistência, capacidade de escoamento, mobilidade e capacidade de bombeamento têm sido usados para descrever o comportamento do concreto fresco. Porém, esses termos refletem principalmente pontos de vista pessoais do que precisão científica [1]. Assim, para se estudar o comportamento do concreto no estado fresco, nada mais adequado do que aplicar os conceitos da reologia, ciência voltada para o estudo da deformação e do escoamento de um fluido sob a influência de tensões.

1.1 Comportamento reológico do concreto fresco

A maioria das equações usadas para suspensões concentradas, tais como a pasta de cimento e o concreto, tenta relacionar a concentração da suspensão com a sua viscosidade ou a tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento, assumindo, assim, que existe apenas um valor de viscosidade para todo o sistema [2]. Normalmente as equações que relacionam a concentração com a viscosidade são usadas para descrever o comportamento de pastas de cimento, enquanto as equações que relacionam a tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento são comumente usadas para descrever o comportamento reológico do concreto fresco (tabela 1).

Na literatura, devido a uma vasta evidência experimental das propriedades do concreto no estado fresco, concluiu-se que o material se comporta como um fluido plástico ou binghamiano [2; 3;

4] para o intervalo das taxas de cisalhamento envolvidas no seu processo prático. Assim, a tensão necessária ao escoamento do material – tensão de cisalhamento (τ) – é igual à soma da tensão de escoamento (τ_o) e de outro termo proporcional à taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), denominado viscosidade plástica (μ) (equação 1).

$$\tau = \tau_o + \mu\dot{\gamma} \tag{1}$$

Como o concreto fresco é um material heterogêneo, com discontinuidades mecânicas internas extremas, a consideração de um meio contínuo torna-se inaceitável. Assim, os parâmetros reológicos são normalmente medidos como dependentes do equipamento utilizado no ensaio e expressos em unidades de torque, resultando em curvas de cisalhamento onde o torque (T) é apresentado como uma função da velocidade de rotação (N), cuja relação é dada segundo a equação 2.

$$T = g + b \cdot N \tag{2}$$

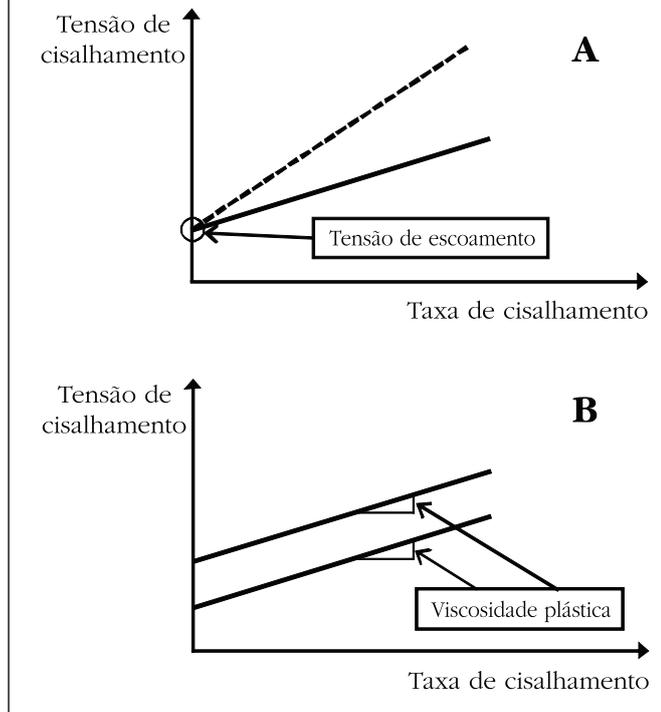
onde g – torque de escoamento, em [Nm] – é a intersecção com o eixo do torque e b – viscosidade de torque, em [Nm.s] – é a incli-

Tabela 1 – Equações que relacionam a tensão e a taxa de cisalhamento para descrever o comportamento de concretos no estado fresco (2)

Modelo reológico	Equação do modelo
Newton	$\tau = \mu\dot{\gamma}$
Bingham	$\tau = \tau_o + \mu\dot{\gamma}$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_o + K\dot{\gamma}^n$ $\tau = A\dot{\gamma}^n$
Lei das potências	$n=1$, para fluido newtoniano $n>1$, para fluido dilatante $n<1$, para fluido pseudoplástico
Vom Berg, Ostwald-de-Waele	$\tau = \tau_o + Bsen^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Robertson-Stiff	$\tau = a(\dot{\gamma} + C)^b$
Eyring	$\tau = \alpha\dot{\gamma} + Bsen^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Atzeni <i>et al.</i>	$\dot{\gamma} = \alpha\tau^2 + \beta\tau + \delta$

Obs.: τ =tensão de cisalhamento; τ_o =tensão de escoamento; μ =viscosidade; $\dot{\gamma}$ =taxa de cisalhamento; A, α , B, b, C, K, α , β , δ =constantes.

Figura 1 – Reologia do concreto: (A) mesma tensão de escoamento e diferentes viscosidades; (B) mesma viscosidade e diferentes tensões de escoamento (2)



nação da reta. Essas duas constantes são análogas à tensão de escoamento e à viscosidade plástica, respectivamente [5].

Assim, sendo o comportamento do concreto fresco semelhante ao de um fluido plástico ou binghamiano, o material deve ser avaliado em termos de dois parâmetros reológicos: tensão de escoamento e viscosidade plástica. O primeiro parâmetro está relacionado com o abatimento, enquanto o segundo faz a diferença entre um concreto facilmente trabalhável e um com comportamento “pegajoso”, difícil de ser bombeado e que apresenta vazios na superfície quando a fôrma for retirada [6]. Relacionando-as com as aplicações práticas, a tensão de escoamento indica a resistência ao escoamento para baixas velocidades de rotação, enquanto a viscosidade plástica indica como a resistência ao escoamento aumenta com o aumento da velocidade de rotação [7].

A relevância em se medir tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade plástica pode ser observada ao comparar os parâmetros reológicos de dois concretos quaisquer (figura 1): esses materiais podem ter um dos parâmetros reológicos idênticos, enquanto o outro pode ser totalmente distinto, o que implica no fato desses materiais apresentarem comportamentos reológicos muito diferentes [2].

Assim, a determinação de ambos os parâmetros reológicos permite a diferenciação imediata de concretos que poderiam ser erroneamente considerados idênticos pelos métodos de ensaio padrões existentes. Além disso, os vários fatores que compõem uma mistura de concreto e que interferem na sua trabalhabilidade

influenciam a tensão de escoamento e a viscosidade plástica de maneiras distintas. Sendo assim, o estudo da natureza das mudanças que ocorrem na mistura pode indicar o fator responsável pelas mesmas.

Normalmente o concreto de alto desempenho possui baixa tensão de escoamento e alta viscosidade plástica comparado a um concreto convencional [5]. Uma menor tensão de escoamento significa que esse material está apto a escoar sob seu peso próprio, enquanto uma maior viscosidade plástica é necessária para evitar a segregação dos agregados.

1.2 Avaliação das propriedades reológicas do concreto fresco

Quando as propriedades reológicas são determinadas em laboratório, diz-se que ensaios de reometria estão sendo realizados. Para isso, existem diversas técnicas experimentais disponíveis que variam de acordo com o material a ser ensaiado.

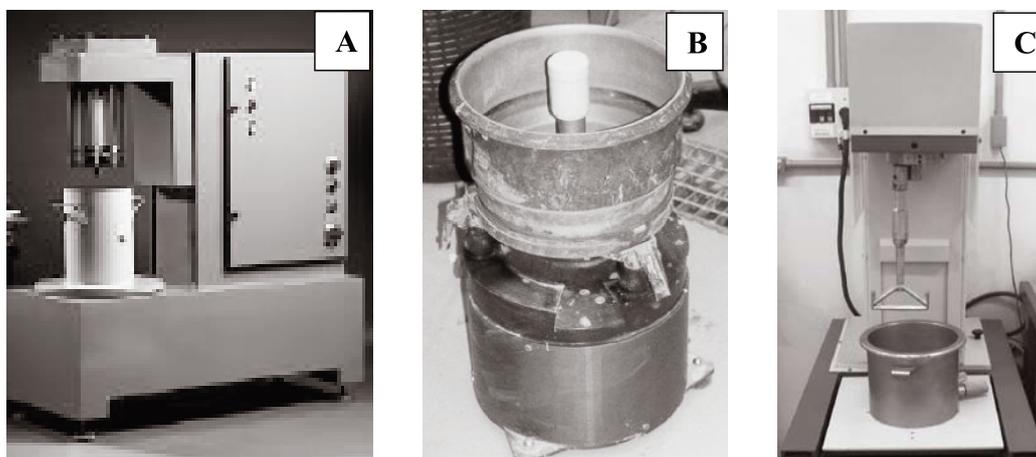
Para o concreto no estado fresco, os métodos de ensaio para determinação de suas propriedades reológicas são divididos em dois grupos, os quais são separados de acordo com os resultados fornecidos: um ou dois parâmetros reológicos. Os ensaios mais comuns medem apenas um parâmetro reológico e a relação entre o parâmetro medido e o segundo não é simples; na maioria das vezes, é impossível calcular o parâmetro fundamental a partir do resultado obtido, podendo apenas garantir uma correlação entre eles [2].

No caso particular do concreto de alto desempenho, suas propriedades no estado fresco são avaliadas por meio dos mesmos métodos de ensaio usados na avaliação de um concreto convencional, porém suas características específicas impedem uma correta interpretação dos resultados. Como exemplo, cita-se o ensaio de abatimento de tronco de cone amplamente utilizado na prática das construções. O ensaio é válido para concretos com abatimento variando entre 25 mm e 175 mm, o que corresponde a consistências variando entre os estágios de baixa e média plasticidade; como um concreto de alto desempenho normalmente apresenta abatimento maior que 200 mm, esse método de ensaio não parece caracterizar corretamente seu comportamento no estado fresco [5]. Além disso, sabe-se que, na prática, dois concretos com um mesmo valor de abatimento podem apresentar comportamentos reológicos diferentes. A partir desse ensaio pode-se demonstrar que a tensão de escoamento está dentro da variação desejada, mas a viscosidade plástica, que não é medida pelo ensaio, pode ser tão alta que a mistura é rotulada como “pegajosa” e considerada difícil de ser aplicada mesmo sob vibração [2].

Portanto, a necessidade pela descrição das propriedades reológicas em termos de quantidades físicas fundamentais tem sido amplamente discutida e qualquer ensaio que descreva o comportamento do concreto fresco deve medir tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade plástica do material.

Desde que Powers e Wiler introduziram seu “plasticímetro” em 1941, diversas tentativas têm sido feitas para se aplicar conceitos fundamentais ao estudo das propriedades do concreto fresco. Um grande avanço foi obtido em 1973, quando Tattersall introduziu o ensaio de dois pontos da trabalhabilidade e, desde então, a investigação do comportamento reológico do material tem sido realizada continuamente [8]. Nos últimos anos, a reologia dos concretos tem sido estudada com determinações que variam entre métodos de

Figura 2 - (A) Reômetro BML, baseado no conceito de cilindros coaxiais (12); (B) Reômetro BTRHEOM, baseado no conceito placa/placa (12); (C) Reômetro baseado no modelo planetário



ensaio simples e práticos, como o ensaio de abatimento de tronco de cone, até equipamentos mais sofisticados que determinam as curvas de cisalhamento do material, como os reômetros.

1.2.1 Reômetro

Reômetros são equipamentos direcionados à avaliação das propriedades reológicas de fluidos e suspensões que permitem estudar o comportamento da tensão de escoamento e da viscosidade plástica em função de outras variáveis, tais como tempo, temperatura etc. Além disso, esses equipamentos apresentam geometrias que são especialmente adequadas para a avaliação de formulações durante a mistura e o transporte, simulando condições de escoamento turbulento.

Dessa maneira, os reômetros são equipamentos precisos não apenas para pesquisa, mas também para estudos práticos e medidas de controle de qualidade do material. Eles fornecem muito mais informações do que os ensaios empíricos convencionais, reduzindo os custos com material e mão-de-obra. Além disso, as informações obtidas são mais objetivas, uma vez que o ensaio é totalmente automatizado e controlado por computador [9].

O primeiro reômetro desenvolvido especificamente para a caracterização de concretos foi concebido por Powers, em 1968, no conceito de cilindros coaxiais (figura 2a). Com a evolução tecnológica dos reômetros, surgiram equipamentos que utilizam novos conceitos para o cisalhamento do material, como o reômetro BTRHEOM (figura 2b) desenvolvido no Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), França [10], baseado no conceito placa/placa. No Brasil, um reômetro destinado à avaliação reológica de concretos refratários (figura 2c) foi desenvolvido pelo Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais (GEMM/UFSCar). O projeto é baseado em um misturador planetário, o que permite utilizá-lo na avaliação das propriedades reológicas tanto de concretos auto-adensáveis quanto em misturas com fluidez reduzida, o que possibilita ampliar

o campo de utilização do equipamento quando comparado aos reômetros de cilindros coaxiais, além de permitir o estudo da mistura e a simulação de diversas técnicas de aplicação dos concretos [11].

Os diversos reômetros comercialmente disponíveis se baseiam em apenas dois princípios básicos de funcionamento [11]: reômetro em que o torque aplicado ao fluido é controlado, sendo avaliada o cisalhamento resultante – indicado para avaliações em que a tensão de escoamento é a principal propriedade a ser determinada; e reômetro em que o cisalhamento aplicado ao material é controlado, sendo registrada a força necessária para tal – indicado para avaliações do comportamento da viscosidade do material sob diversas taxas de cisalhamento.

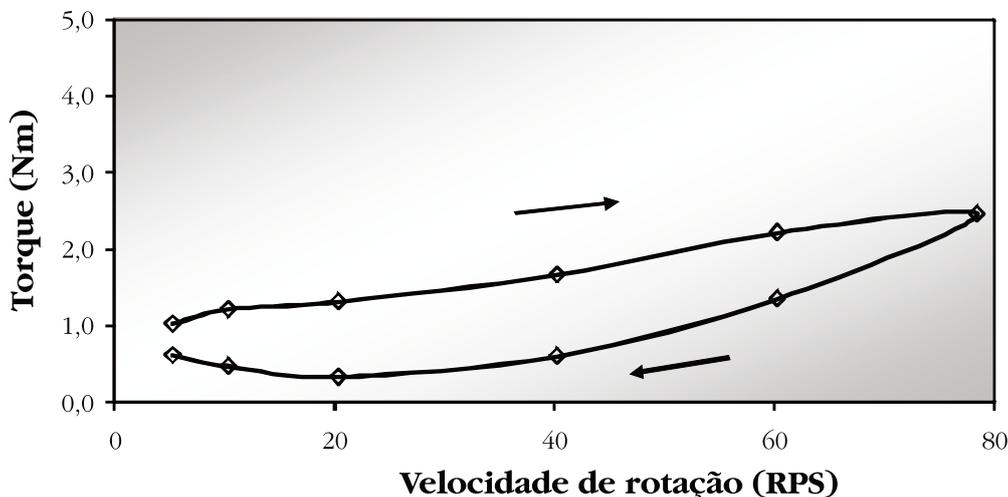
1.2.2 Curvas de cisalhamento

O comportamento reológico de um material depende das condições de ensaio consideradas, tais como taxa de cisalhamento, temperatura, energia de mistura etc. Assim, a avaliação das propriedades reológicas de concretos de alto desempenho necessita de considerações especiais: eles demandam métodos de ensaio que envolvem a avaliação da energia na mistura e, então, o quanto o material se deforma [13].

Normalmente, as propriedades reológicas do concreto fresco são determinadas a partir da construção de curvas de cisalhamento obtidas com o auxílio de um reômetro. Dessa maneira, é possível determinar a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento sob condições definidas fisicamente. A condição experimental (ciclo de cisalhamento) deve ser definida antes do cálculo dos parâmetros reológicos, lembrando que para materiais à base de cimento, onde certos fenômenos dependentes do tempo também estão envolvidos, a mudança na taxa de cisalhamento (velocidade de rotação) deve ser feita em escada e não continuamente [14].

As curvas de cisalhamento são necessárias para caracterizar adequadamente os materiais à base de cimento como fluidos não-

Figura 3 – Curva de cisalhamento de um concreto de alto desempenho (16)



Obs.: As setas indicam o sentido de aplicação da velocidade de cisalhamento

newtonianos, uma vez que sua viscosidade depende tanto da taxa de cisalhamento quanto da duração do cisalhamento [15].

Quando um concreto é submetido a uma taxa de cisalhamento gradualmente crescente e, posteriormente, essa taxa é uniformemente reduzida à zero, a curva de cisalhamento resultante poderá ou não ter suas partes – ascendente e descendente – coincidentes; a esse gráfico dá-se o nome de curva de histerese, obtida quando o material sofre uma quebra estrutural sob a ação de um cisalhamento (figura 3). Essa histerese, cuja área representa o trabalho relacionado com o volume de material cisalhado, permite uma análise qualitativa do cisalhamento, sendo possível, então, tirar conclusões quanto à estabilidade da estrutura do material [15].

As curvas de cisalhamento variam dependendo do tempo total do ciclo de cisalhamento, da taxa de acréscimo e de redução da taxa de cisalhamento e do “ponto de virada” dos ensaios (momento em que a taxa de cisalhamento começa a diminuir). Dentre os parâmetros que promovem variações nas curvas de cisalhamento das suspensões, a taxa de coagulação das partículas é o único fator relacionado com sua composição química. Como os outros parâmetros são simples condições experimentais, é importante observar que a variação da forma das curvas de cisalhamento nem sempre descrevem diferenças quanto à qualidade da amostra ensaiada [3; 17].

A curva de cisalhamento de materiais à base de cimento também depende das características do equipamento usado no ensaio. É difícil verificar todas as possíveis tendências do comportamento no escoamento usando apenas um único modelo reológico, podendo complicar ainda mais quando a geometria do escoamento, o espaçamento entre as superfícies de cisalhamento e sua capacidade de atrito também variam [18].

As curvas de cisalhamento são úteis como um indicador preliminar do comportamento, porém elas não fornecem uma boa base para a análise quantitativa do mesmo. Uma técnica alternativa é estudar a taxa de quebra estrutural com o tempo sob uma taxa de

cisalhamento contínua, ou mais precisamente, sob uma velocidade de rotação constante.

2. Materiais e programa experimental

Para a avaliação do comportamento de concretos de alto desempenho no estado fresco com o auxílio de um reômetro, foram estudadas misturas constituídas de cimento Portland e sílica ativa (comercialmente disponíveis), e de agregados da região de São Carlos/SP:

- cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI), cuja massa específica é de 3,12g/cm³;
- agregado miúdo: areia quartzosa de cava, com módulo de finura e diâmetro máximo característico de 2,34 e 4,8 mm, respectivamente;
- agregado graúdo: brita de origem basáltica, com diâmetro máximo característico de 9,5 mm (brita 0);
- adição mineral: sílica ativa resultante da produção de silício metálico ou ligas de Fe-Si, no teor de 10% em substituição volumétrica ao cimento;
- aditivo químico: superplastificante (SP) à base de poliacarboxilato, adicionado no teor de 0,61% (teor considerado ótimo para a mistura) [16];
- água de amassamento correspondendo a uma relação água/aglomerante constante e igual a 0,40.

As condições de ensaio foram mantidas constantes: umidade relativa do ar superior a 65% e temperatura ambiente de 23°C ± 3°C. Para um melhor aproveitamento dos materiais constituintes da mistura, realizou-se, inicialmente, um estudo das fases que compõem o concreto: matriz pasta de cimento e agregados. O estudo da matriz foi realizado para a avaliação da compatibilidade entre os materiais aglomerantes e o superplastificante, bem como para a determinação do ponto de saturação do aditivo. A fase agregado foi estudada a fim de se buscar o melhor empacotamento entre as partículas

Tabela 2 – Massa específica e consumo de materiais para os concretos estudados

Concreto	Massa específica (kg/dm ³)	Consumo de material (kg ³ por m de concreto)					
		Cimento	Sílica	Areia	Brita 0	Água	SP
CC	2,393	488	---	855	855	195	---
CSP	2,393	488	---	855	855	194	2,25
CAD	2,377	454	31	849	849	192	2,43

mediante a determinação da composição ideal entre elas. Depois de definidas as duas fases do concreto, a composição final do traço, bem como os ajustes necessários foram realizados [16].

Assim, para o traço adotado (1:m = 3,5; sendo m o total de agregados), o consumo dos materiais constituintes da mistura são apresentados na tabela 2, onde: CC corresponde a um concreto convencional, sem a incorporação de qualquer aditivo químico ou adição mineral; CSP corresponde ao traço do concreto convencional incorporado apenas com a quantidade ótima de superplastificante; e CAD corresponde à mistura de alto desempenho propriamente dita, composta tanto com aditivo químico quanto com adição mineral. Com isso, é possível verificar a influência da composição da mistura sobre o seu comportamento reológico.

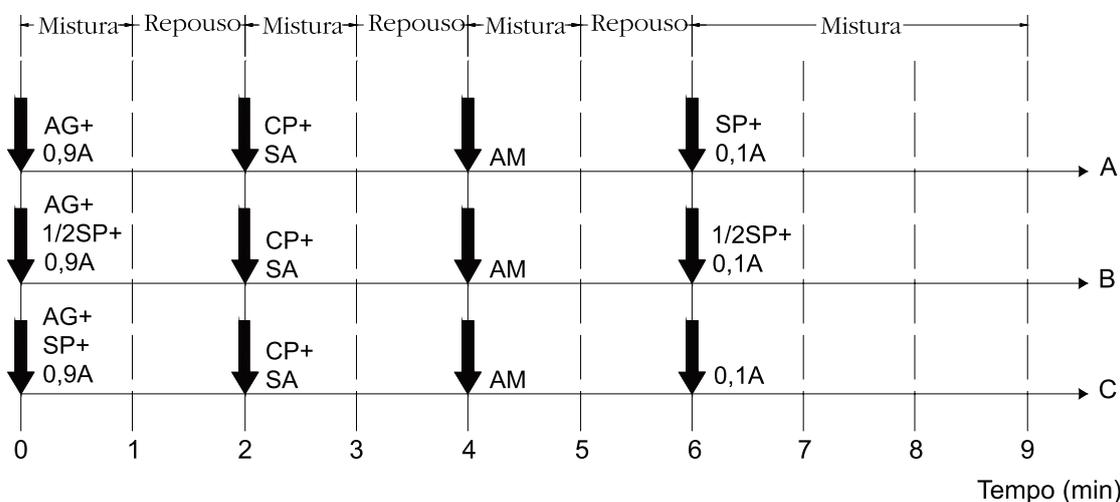
Para a observação da influência do procedimento de mistura sobre o comportamento do concreto fresco, três procedimentos diferentes foram empregados na produção da mistura de alto desempenho (CAD), cuja ordem de colocação dos materiais constituintes foi variada (figura 4). Eles foram baseados no processo de mistura amplamente utilizado na prática (procedimento A) e uma variação do tempo da adição do superplastificante foi considerada (procedimentos B e C). O tempo de mistura foi mantido constante para

todos os procedimentos adotados, sendo considerado um total de 9 minutos para a completa produção do concreto.

No presente trabalho, a avaliação do comportamento dos concretos no estado fresco foi realizada com o auxílio do reômetro desenvolvido pelo GEMM/UFSCar (figura 2c). O projeto do 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. O sistema de redução original foi mantido para transferir a rotação do motor para o planetário, porém algumas mudanças foram feitas no misturador original: a capacidade da cuba de mistura foi reduzida para 4 kg de material e foram instaladas entradas para sensores de pH e temperatura. Para o controle da rotação do equipamento e, conseqüentemente, aplicação do cisalhamento ao concreto, um servo-motor de corrente contínua substituiu o motor original e a velocidade de rotação tornou-se variável [11].

A introdução do novo servo-motor exigiu a construção de um painel de controle, no qual estão contidos um conversor de corrente alternada para contínua, um sistema de segurança que limita a corrente máxima que pode ser fornecida ao motor, um controlador de rotação do motor, além de pontos de conexão para a comunica-

Figura 4 – Procedimentos de mistura empregados na produção dos concretos de alto desempenho, onde: A=água, AM=agregado miúdo, AG=agregado graúdo, CP=cimento, SA=sílica ativa e SP=superplastificante



ção com um computador. O painel de controle foi conectado a um computador e um software específico também foi desenvolvido para controlar o reômetro e analisar os dados coletados [11].

Para a caracterização reológica dos concretos, as misturas foram submetidas a ciclos de cisalhamento em escada, com velocidade de rotação variando entre 5 RPM e 80 RPM após a mistura. Esse tipo de ensaio gera curvas de cisalhamento que permitem verificar a eficiência de dispersão das partículas (eficiência de mistura) e identificar a natureza reológica do material.

Para a identificação do comportamento reológico, as curvas de cisalhamento foram ajustadas por dois modelos reológicos – Bingham e Lei das potências. Tanto a parte ascendente quanto a parte descendente da curva de cisalhamento foram avaliadas. Assim, a natureza reológica foi identificada pelo modelo que melhor se ajustou à curva de cisalhamento, ou seja, pelo modelo que permitiu obter o maior coeficiente de correlação entre sua reta constitutiva e os dados obtidos pelo reômetro.

A influência da eficiência de mistura e a avaliação da tixotropia do concreto foram observadas a partir das curvas completas de cisalhamento. Esses fatores foram relacionados com a área de histerese formada em cada condição de estudo.

A influência da composição do concreto bem como do procedimento de mistura empregado na sua produção foi avaliada a partir da comparação entre os parâmetros reológicos determinados para cada situação.

Para os concretos de alto desempenho, um problema comum encontrado na prática das construções é sua rápida perda de trabalhabilidade. Assim, quando uma mistura desse material é dosada, não é necessário apenas encontrar as especificações para o seu comportamento inicial, mas também garantir que ele permaneça estável durante o tempo necessário para o seu lançamento [10]. Com o auxílio de um reômetro, é possível monitorar a evolução da trabalhabilidade dos concretos ao longo do tempo associando-a com a evolução dos parâmetros reológicos medidos. Assim, o comportamento das misturas estudadas foi acompanhado ao longo do tempo, fazendo-se leituras 10, 30 e 60 minutos após o contato inicial entre o cimento e a água de amassamento.

3. Resultados e discussões

3.1 Identificação da natureza reológica do concreto

O controle dos fatores que influenciam o comportamento reológico dos concretos de alto desempenho permite determinar suas características de aplicação. Assim, dependendo da composição da mistura, a técnica de moldagem empregada pode variar desde a aplicação de uma vibração até um auto-escoamento.

Porém, a utilização desses materiais não envolve apenas seu processo de adensamento, mas também os processos de mistura, transporte e lançamento. Diversos fatores, tais como a natureza reológica, a tendência à segregação, a coesão e o aquecimento da mistura – que influenciam o comportamento do concreto durante os processos de manipulação – não são medidos pelo ensaio de abatimento de tronco de cone amplamente utilizado na prática das construções em concreto.

Como exemplo, Pileggi [11] cita o concreto bombeável: um concreto dilatante, independente do seu nível de fluidez, apresenta dificuldades para escoar sob elevadas taxas de cisalhamento, dificultando ou impedindo seu bombeamento; por outro lado, uma mistura pseudoplástica, mesmo com baixa fluidez, poderia ser

bombeada, pois quanto maior a taxa de cisalhamento aplicada, menor sua resistência ao escoamento. Com isso pode-se observar uma diferença entre o nível de fluidez (que define a característica de moldagem) e o comportamento reológico de um concreto (que determina a técnica mais adequada para sua aplicação).

Para a identificação do comportamento reológico das misturas foram feitos ajustes tanto na parte ascendente quanto na parte descendente da curva de cisalhamento a dois modelos reológicos – Bingham e Lei das potências. A partir dos resultados obtidos (exemplos de ajuste apresentados na figura 5), a consideração da parte ascendente da curva de cisalhamento se mostrou mais adequada (maiores coeficientes de correlação), além de corresponder ao período em que a tensão de escoamento deve ser excedida para que o escoamento inicie.

Vale lembrar que, para a construção das curvas de cisalhamento, a velocidade foi considerada em rotação por segundo (RPS) para que o parâmetro relacionado com a viscosidade plástica (viscosidade de torque – h), expresso em Nm.s, fosse determinado diretamente. Caso contrário, ao desenhar as curvas de cisalhamento com a velocidade de rotação em rotação por minuto (RPM), esse parâmetro deveria ser corrigido na equação da reta.

Assim, as partes ascendentes das curvas de cisalhamento ajustadas para a identificação da natureza reológica dos concretos são apresentadas na figura 6. Na figura 6-A são mostrados os ajustes das curvas obtidas para as misturas com diferentes composições (CC, CSP e CAD), enquanto na figura 6-B são apresentadas as curvas resultantes para as misturas de mesma composição produzidas de acordo com diferentes procedimentos de mistura (procedimentos A, B e C).

A partir da figura 6, pode-se observar que todas as misturas, independente de sua composição e do procedimento de mistura empregado na sua produção, apresentam um comportamento semelhante ao de um fluido plástico ou binghamiano, o que está de acordo com o comportamento amplamente observado para concretos de alto desempenho estudados nos grandes centros de pesquisa da tecnologia dos concretos e encontrado na literatura [2; 3; 4; 19]. Assim, dois parâmetros reológicos são necessários para a caracterização do comportamento desses concretos no estado fresco: a tensão de escoamento e a viscosidade plástica.

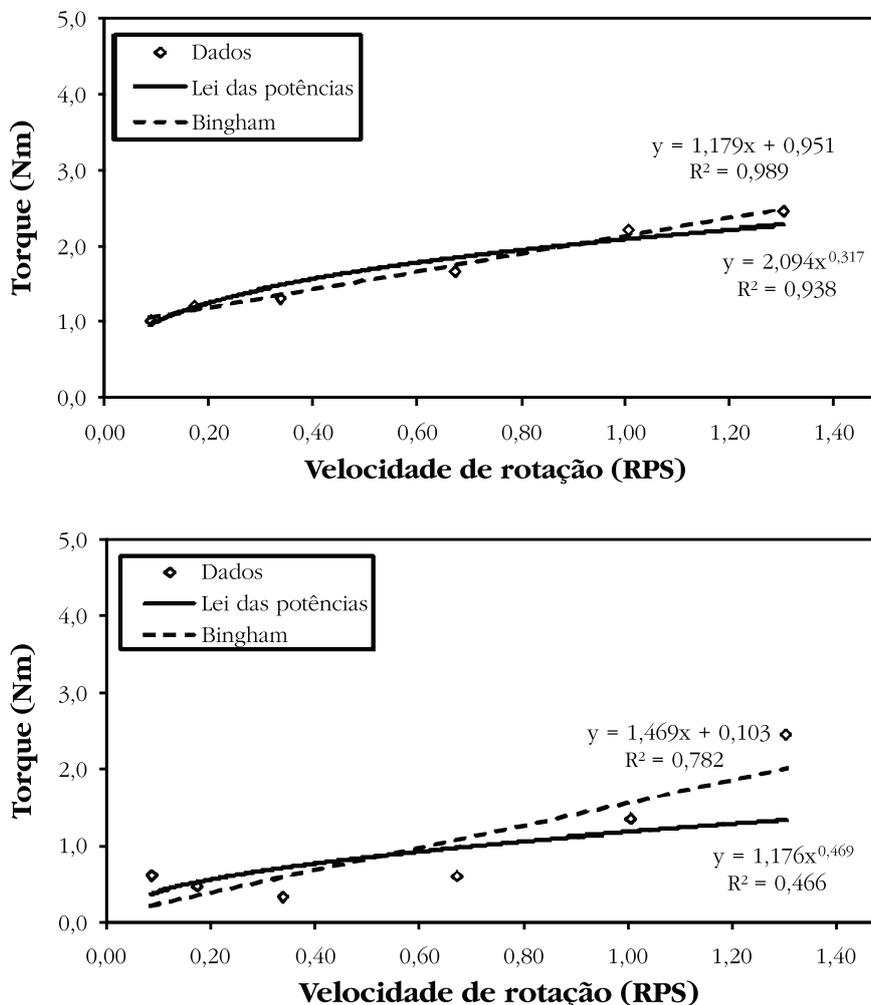
3.2 Influência da eficiência de mistura/tixotropia do concreto

As curvas de cisalhamento fornecem duas informações fundamentais [11]: primeiro, quanto menor a área de histerese, maior a eficiência da dispersão das partículas e, conseqüentemente, da mistura; e segundo, o perfil da curva indica a natureza reológica do material.

Na figura 7 são apresentadas as curvas completas de cisalhamento para os concretos estudados. Pode-se verificar que as partes ascendente e descendente das curvas não coincidem, gerando uma área de histerese. Inicialmente, esse comportamento indica que a mistura não foi capaz de fornecer energia suficiente para quebrar os aglomerados presentes no material; assim, um processo de mistura mais eficiente está relacionado com uma menor área de histerese. Em algumas situações, outros fatores também podem estar relacionados com a área de histerese, tais como as características da matriz e dos agregados que constituem uma mistura de concreto.

Os valores das áreas de histerese das curvas de cisalhamento dos concretos são apresentados na tabela 3. Verifica-se uma pequena

Figura 5 – Exemplo de ajuste das partes ascendente (A) e descendente (B) da curva de cisalhamento de um concreto aos modelos reológicos considerados



variação dessas áreas em função da composição do concreto e do procedimento de mistura empregado na sua produção.

Além disso, quando se observa uma área de histerese na curva completa de cisalhamento, considera-se que o material testado tem um significativo comportamento tixotrópico, isto é, quando tal material é submetido a uma taxa de cisalhamento constante, sua viscosidade aparente diminui ao longo do tempo. Esse comportamento deve-se à existência de uma estrutura instável no material, que pode ser rompida com a aplicação de uma determinada energia, lembrando-se que essa quebra estrutural é reversível e rapidamente recuperada.

Assim, pode-se observar que as curvas de cisalhamento obtidas para os concretos estudados possuem uma área de histerese, comprovando o comportamento tixotrópico desses materiais. Porém, a determinação da área de histerese não fornece um valor intrínseco de qualquer parâmetro reológico, sendo possível apenas obter correlações empíricas entre os resultados obtidos no estudo das consequências da tixotropia.

O cálculo da área de histerese de uma curva de cisalhamento parece ser uma maneira limitada de se obter uma classificação relativa dos concretos ou uma comparação qualitativa do efeito de diversas adições [20]. A avaliação do comportamento de concretos sob uma taxa de cisalhamento contínua ou, mais precisamente, sob uma velocidade de rotação constante, mediante o estudo da taxa de quebra estrutural do material em função do tempo, constitui uma técnica alternativa às curvas de cisalhamento [3].

3.3 Influência da composição e do procedimento de mistura

A influência da composição do concreto e do procedimento de mistura empregado em sua produção pode ser verificada, em termos mais fundamentais, a partir da análise dos parâmetros reológicos que caracterizam o comportamento de misturas de concreto quando no estado fresco. Os valores determinados para os parâmetros reológicos em cada condição de ensaio são apresentados na tabela 4.

A partir dos valores apresentados na tabela 4, pode-se verificar que os parâmetros reológicos variam tanto de acordo com a composição do concreto quanto com o procedimento de mistura adotado na sua produção. Com isso é possível observar comportamentos reológicos diferentes entre os concretos estudados, mesmo o valor do abatimento adotado sendo o mesmo.

3.4 Avaliação da trabalhabilidade a partir da evolução dos parâmetros reológicos

A evolução dos parâmetros reológicos está se tornando cada vez mais importante à medida que as novas gerações de concretos se mostram dependentes das condições vigentes durante a concretagem. Mudanças da resistência ao cisalhamento com o tempo, quando um material apresenta um comportamento plástico ou binghamiano, são conseqüências das mudanças da tensão de escoamento e da viscosidade plástica, as quais normalmente variam exponencialmente com o decorrer do tempo. Do ponto de vista tecnológico, é muito importante saber como a mudança desses parâmetros contribui com as mudanças da resistência ao cisalha-

mento [21; 22]. Sendo assim, os resultados da avaliação da trabalhabilidade medida ao longo do tempo, com base na evolução dos parâmetros reológicos, são apresentados na tabela 5.

A partir dos valores apresentados na tabela 5, verifica-se que o torque de escoamento aumenta com o decorrer do tempo, enquanto a viscosidade permanece praticamente constante. Isso quer dizer que, uma vez que a tensão de escoamento tenha sido excedida, sua resistência ao escoamento permanece praticamente a mesma para as taxas de cisalhamento aplicadas, dentro do intervalo de tempo avaliado. Independente da composição do concreto e do procedimento de mistura empregado na sua produção, a evolução dos parâmetros reológicos ao longo do tempo é semelhante para as misturas estudadas.

O aumento da tensão de escoamento de um concreto ao longo do tempo reflete o processo de endurecimento desse material; porém, não a evolução da viscosidade plástica. Como as amostras de concreto permanecem em repouso entre os consecutivos ensaios reológicos, a exigência de torque para as baixas velocidades de rotação aumenta mais do que para as velocidades mais altas, provavelmente devido à aglomeração das partículas, à geração

Figura 6 – Ajuste da parte ascendente das curvas de cisalhamento dos concretos (A) com diferentes composições e (B) de mesma composição produzidos de acordo com diferentes procedimentos de mistura

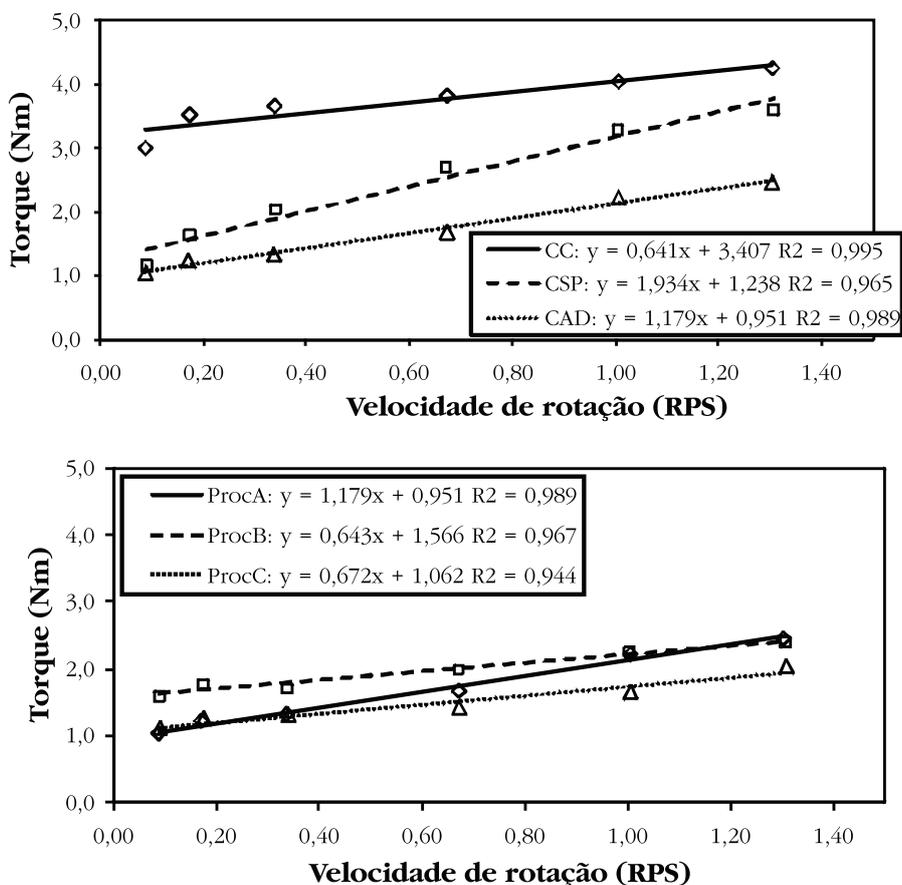
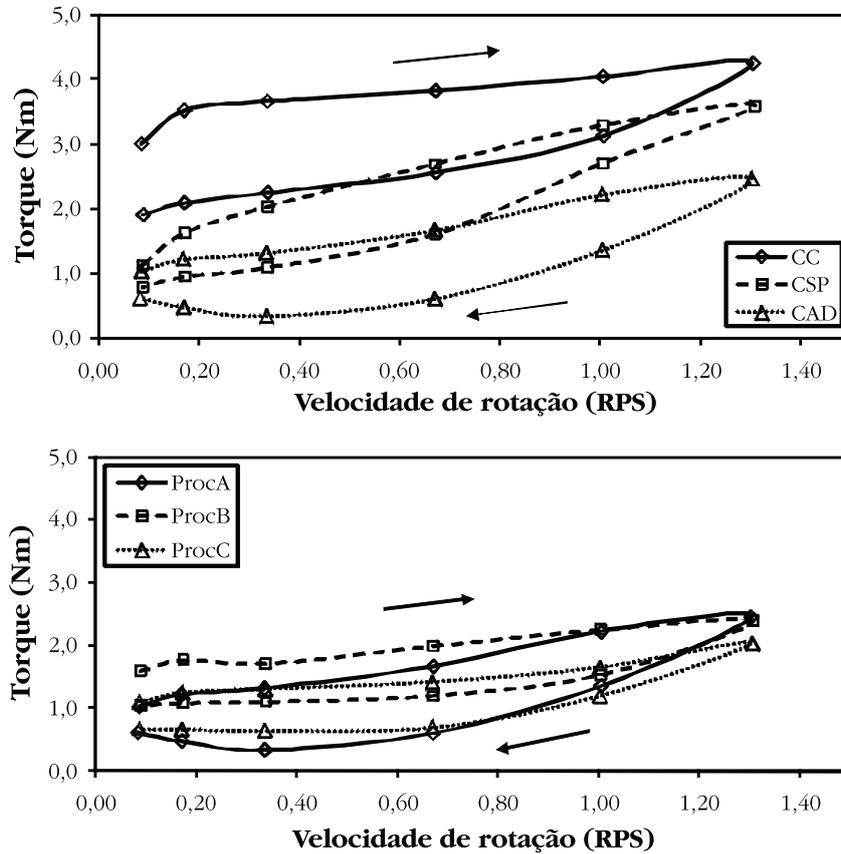


Figura 7 - Curvas de cisalhamento dos concretos (A) com diferentes composições e (B) de mesma composição produzidos de acordo com diferentes procedimentos de mistura



Obs.: As setas indicam o sentido de aplicação da velocidade de cisalhamento.

dos produtos da hidratação e ao esgotamento das moléculas de superplastificante no processo químico. Isso resulta em uma redução da inclinação da curva de cisalhamento, o que pode explicar porque a viscosidade plástica não aumenta com o tempo, tendendo a diminuir ligeiramente em alguns casos [23].

4. Conclusões

Independente da sua composição e do procedimento de mistura

empregado na sua produção, os concretos estudados apresentaram um comportamento semelhante ao de um fluido plástico ou binghamiano, indicando a necessidade de dois parâmetros reológicos – tensão de escoamento e viscosidade plástica – para a correta avaliação do seu comportamento quando no estado fresco. O comportamento observado nesse estudo está de acordo com o amplamente observado para as misturas de alto desempenho estudadas nos grandes centros de pesquisa da tecnologia dos concretos e encontrado na literatura.

Tabela 3 - Área de histerese das curvas de cisalhamento dos concretos estudados

	Concreto			Procedimento de mistura		
	CC	CSP	CAD	ProcA	ProcB	ProcC
Área de histerese (Nm.RPS)	1,325	1,119	1,095	1,095	1,023	0,804

Tabela 4 – Parâmetros reológicos dos concretos estudados, obtidos a partir do ajuste da parte ascendente da curva de cisalhamento ao modelo binghamiano

Parâmetros reológicos	Concreto			Procedimento de mistura		
	CC	CSP	CAD	ProcA	ProcB	ProcC
Torque de escoamento g(Nm)	3,41	1,24	0,95	0,95	1,57	1,06
Viscosidade de torque h(Nm.s)	0,641	1,934	1,179	1,179	0,643	0,672

Além disso, pode-se observar que as partes ascendente e descendente da curva de cisalhamento das misturas testadas não coincidem, formando uma área de histerese entre elas, indicando o comportamento tixotrópico desses materiais.

A partir das curvas de cisalhamento, com a determinação dos parâmetros reológicos, é possível verificar a influência da composição do concreto e do procedimento de mistura adotado na sua produção em termos de quantidades físicas mais fundamentais.

A avaliação da trabalhabilidade dos concretos ao longo do tempo a partir da evolução dos parâmetros reológicos mostra que o processo de perda da trabalhabilidade das misturas de alto desempenho foi representado por um aumento da tensão de escoamento, enquanto a viscosidade plástica permanece praticamente constante durante o ensaio. O comportamento observado está de acordo com os resultados divulgados na literatura.

Assim, o reômetro constitui uma ferramenta eficiente para a avaliação do comportamento do concreto no estado fresco. Ele permite obter informações precisas que vão além da avaliação da trabalhabilidade desse material, tais como a identificação de sua natureza reológica, a verificação da eficiência de mistura e da tixotropia, a verificação da influência da composição da mistura e do procedimento adotado na sua produção. No caso da utilização de um reômetro de cisalhamento planetário, como no presente

trabalho, foi possível avaliar as propriedades reológicas tanto de concretos com fluidez reduzida (concreto convencional) quanto de misturas com alta plasticidade (concreto de alto desempenho).

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de estudo e apoios concedidos. O apoio do Eng. Fernando Valenzuela na parte experimental também é reconhecido pelos autores.

6. Referências bibliográficas

- [01] WALLEVIK, J.E. Relationship between the Bingham parameters and slump. *Cement and Concrete Research*, v.36, n.7, 2006; p.1214-1221.
- [02] FERRARIS, C.F. Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, v.104, n.5, 1999; p.461-478.
- [03] TATTERSALL, G.H.; BANFILL, P.F.G. The rheology of

Tabela 5 – Valores dos parâmetros reológicos considerando-se a parte ascendente da curva de cisalhamento e comportamento binghamiano

	Torque de escoamento (g(Nm))			Viscosidade de torque (h(Nm.s))		
	Tempo de medida (min)			Tempo de medida (min)		
	10	30	60	10	30	60
Concreto						
CC	3,41	3,92	4,48	0,641	0,574	0,976
CSP	1,24	1,41	1,87	1,934	1,969	1,807
CAD	0,95	1,13	1,48	1,179	1,121	1,189
Procedimento de mistura						
ProcA	0,95	1,13	1,48	1,179	1,121	1,189
ProcB	1,57	1,86	2,31	0,643	0,688	0,663
ProcC	1,06	1,44	1,54	0,672	0,673	0,800

- fresh concrete, London: Pitman, 1983, 347 p.
- [04] TATTERSALL, G.H. Workability and quality control of concrete, London: E & FN Spon, 1991, 262 p.
- [05] YEN, T. *et al.* Flow behavior of high strength high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, v.21, n.5-6, 1999; p.413-424.
- [06] De LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, v.32, n.11, 2002; p.1699-1704.
- [07] CLAISSE, P.A.; LORIMER, O.; AL OMARI, M. Workability of cement pastes. *ACI Materials Journal*, v.98, n.6, 2001; p.476-482.
- [08] WALLEVIK, O.H.; GJØRV, O.E. Modification of the two-point workability apparatus. *Magazine of Concrete Research*, v.42, n.152, 1990; p.135-142.
- [09] De LARRARD, F. *et al.* Evolution of the workability of superplasticized concretes: assessment with the BTRHEOM rheometer. In: *Production Methods and Workability of Concrete*, Paisley/Scotland, 1996, Anais, London, 1996, p.377-388.
- [10] De LARRARD, F. *et al.* A new rheometer for soft-to-fluid concrete. *ACI Materials Journal*, v.94, n.3, 1997; p.234-243.
- [11] PILEGGI, R.G. Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários, São Carlos/SP, 2001, Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, 187 p.
- [12] BANFILL, P. *et al.* Comparison of concrete rheometers: international tests at LCPC (Nantes, France) in October, 2000. NISTIR 6819, 2001.
- [13] ZAIN, M.F.M.; SAFIUDDIN, M.; YUSOF, K.M. A study on the properties of freshly mixed high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, v.29, n.9, 1999; p.1427-1432.
- [14] WALLEVIK, O.H.; GJØRV, O.E. Development of a coaxial cylinders viscometer for fresh concrete. In: *Properties of Fresh Concrete*, Hanover/Germany, 1990, Anais, London, 1990, p.213-224.
- [15] SUHR, S. Interactions between sulphates minerals and C3A in cement paste rheology. In: *Rheology of Fresh Cement and Concrete*, Liverpool, 1990, Anais, London, 1991, p.37-46.
- [16] CASTRO, A.L. Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho, São Carlos/SP, 2007, Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 302p.
- [17] HATTORI, K.; IZUMI, K. A new viscosity equation for non-Newtonian suspensions and its application. In: *Rheology of Fresh Cement and Concrete*, Liverpool, 1990, Anais, London, 1991, p.83-92.
- [18] NEHDI, M.; RAHMAN, M.-A. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. *Cement and Concrete Research*, v.34, n.11, 2004; p.1993-2007.
- [19] TOUTOU, Z.; ROUSSEL, N. Multiscale experimental study of concrete rheology: from water scale to gravel scale. *Materials and Structures*, v.39, n.2, 2006; p.189-199.
- [20] ROUSSEL, N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*, v.36, n.10, 2006; p.1797-1806.
- [21] GOLASZEWSKI, J.; SZWABOWSKI, J. Influence of superplasticizers on rheological behavior of fresh cement mortars. *Cement and Concrete Research*, v.34, n.2, 2004; p.235-248.
- [22] PETIT, J.-Y. *et al.* Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Research*, v.37, n.5, 2007; p.655-670.
- [23] NEHDI, M.; MINDESS, S.; AİTCIN, P.-C. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. *Cement and Concrete Research*, v.28, n.5, 1998; p.687-697.