

## Medida da autoescoabilidade em concretos refratários de baixo e ultra-baixo teor de cimento

E.S. Octaviano<sup>1\*</sup>, C. L. Levada<sup>1</sup>, J.B. Baldo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Academia da Força Aérea –Divisão de Ensino - Campo Fontenelle – Pirassununga – 13630-000 – SP

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, DEMA-UFSCar, C.P. 676, São Carlos. - 13656-905 – SP

(Recebido em 17/02/2010; revisado em 31/05/2010; aceito em 13/08/2010)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

---

### Resumo:

Os materiais refratários estruturais monolíticos, notadamente os concretos refratários, quer sejam convencionais, de baixo teor de cimento (BTC) ou de ultra-baixo teor de cimento (UBTC), principalmente os com propriedades autoescoantes, cuja principal característica é a capacidade de fluir sem vibração externa, constituem uma classe cuja importância é evidente, considerando-se que atualmente a sua comercialização abrange cerca de 50% de todos os refratários estruturais produzidos no mundo. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um método, para avaliação do índice de autoescoabilidade, que é o parâmetro mais relevante na determinação das características deste tipo de concreto, baseado principalmente nas propriedades reológicas, e conseqüentemente a criação de um processo de controle de qualidade industrial que até atualmente não estava disponível para esta classe específica de materiais.

**Palavras-chave:** Concretos refratários; autoescoabilidade; controle de qualidade; BTC; UBTC.

---

### Abstract:

The monolithic structural refractory materials, mainly refractory concrete, can be conventional, low cement content (BTC) or ultra low cement content (UBTC). Some of these materials have self flowing properties, which are flow without external vibration. Materials with such properties are a class of great importance because they currently represent 50% of the market of all structural refractories produced in the world. Therefore, it should be noted that the aim of this paper is the development of an evaluating method for self flowability index based, mainly, on rheological properties of materials. Based on this, a process of industrial quality control that is not currently available for this specific class of materials is proposed.

**Keywords:** Refractory concrete; self flowing; quality control; BTC; UBT.

---

\* E-mail: [esoctaviano@if.sc.usp.br](mailto:esoctaviano@if.sc.usp.br) (E. S. Octaviano)

## 1. Introdução

Os concretos refratários são constituídos basicamente de agregados refratários distribuídos em uma matriz refratária. A matriz determina a maioria das propriedades, atuando como agente aglutinante, devido às reações com a fase cementante, sendo que é através dela que o desgaste estrutural acontece. Os agregados formam o esqueleto estrutural, sendo parcialmente responsáveis pelas propriedades dos concretos [1]. Os materiais refratários estruturais monolíticos, notadamente os concretos refratários, quer sejam convencionais, de baixo teor de cimento (BTC) ou de ultra-baixo teor de cimento (UBTC), constituem uma classe cuja importância é evidente, considerando-se que atualmente a sua comercialização abrange cerca de 50% de todos os refratários estruturais produzidos no mundo, e mesmo no Brasil.

Os concretos refratários do tipo BTC surgiram visando obter melhores propriedades termomecânicas e características de resistência a corrosão das obtidas com os concretos refratários convencionais [2-7]. No entanto, apesar das melhorias conseguidas nestes materiais, devido a formação de eutéticos de baixo ponto de fusão no sistema  $Al_2O_3 - SiO_2 - CaO$ , estes ainda não apresentavam módulo de ruptura a quente satisfatório. Surgiram, então com os concretos refratários do tipo UBTC, com teor de CaO de aproximadamente 0,3%. Foram então observadas melhorias significativas na estabilidade volumétrica dos concretos refratários, pois se eliminou quase que totalmente o problema da formação dos eutéticos com baixo ponto de fusão, apesar de alguns problemas produtivos persistirem, como por exemplo, a necessidade de equipamentos de vibração para uma instalação homogênea do concreto no formato desejado [8].

Esta dificuldade foi recentemente solucionada com o desenvolvimento de concretos refratários BTC e UBTC com propriedades autoescoantes (self flowing), cuja principal característica é a capacidade de fluir sem vibração externa. Essa propriedade foi alcançada com o emprego da distribuição granulométrica específica, além da inclusão de pós submicronizados e aditivos surfactantes (defloculantes), aceleradores e/ou retardadores, na composição dos concretos [1].

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um método formalmente embasado, principalmente nas características reológicas, para avaliação do índice de autoescoamento, que

é o parâmetro mais relevante desta classe específica de materiais, e conseqüentemente a criação de um processo de controle de qualidade industrial que até atualmente não estava disponível.

## 2. O Método do Cone Truncado - Bases Formais

A autoescoabilidade é um acontecimento recente no campo dos chamados monolíticos refratários (refratários com propriedades autoescoantes, moldados no local, em peças únicas). Sua importância é marcante, considerando-se que os revestimentos monolíticos apresentam uma tendência mundial de aumento de utilização, visto apresentarem vantagens no custo da relação instalação/desempenho quando comparado aos materiais refratários convencionais (formados).

A autoescoabilidade é, em princípio, controlada pela reologia da matriz, sendo que as propriedades reológicas são conseqüências de diversos parâmetros, tais como: distribuição granulométrica, formato das partículas, fração mássica da matriz, teor e forma de pós submicronizados, quantidade de água e de agentes surfactantes. Apesar da tecnologia de produção do material estar bastante avançada, ainda não existe um teste laboratorial de medida da autoescoabilidade, tanto para fins de projeto como para controle de qualidade, que seja formalmente embasado e de aceitação universal.

O método de maior uso atualmente é o do cone truncado [1,8], no qual um tronco de cone é preenchido com a massa a ser avaliada e, em seguida, retirado rapidamente, permitindo que o material escoe livremente sob a ação da gravidade. Nesse método, o próprio cone foi arbitrariamente definido, não sendo considerados as dimensões e o volume gerado, nem tampouco foi desenvolvida uma formulação teórica que explique, ao menos parcialmente, as principais características do processo de escoamento encontrado. O ensaio do tronco de cone se vale da ação da tensão normal (força peso) e da tensão de cisalhamento perpendicular à normal. A massa cessa de escoar quando se atinge o equilíbrio entre as forças.

O método do cone truncado, proposto originalmente por Masaryk, Steinke e Videtto (MSV) [8], consiste em um recipiente na forma de um tronco de cone, de material plástico ou metálico, com 100 mm de diâmetro da base

( $2b_0$ ), 70 mm de diâmetro superior ( $2a_0$ ), e de 50 mm de altura ( $h_0$ ). O tronco de cone é preenchido pelo concreto e colocado sobre uma superfície metálica ou polimérica (lisas). A seguir, o tronco de cone é retirado, de maneira que o concreto flua livremente sobre a superfície.

O cálculo da auto escoabilidade do concreto utilizado é dado pela Equação (1);

$$I = \frac{D_f - D_i}{D_i} \times 100 \quad (1)$$

sendo;  $I$  = porcentagem autoescoante,  $D_f$  = diâmetro final atingido após um tempo  $t$ , e  $D_i$  = diâmetro inicial

O diâmetro médio atingido pelo material, medido em mm, deve ser obtido pela média de três valores de diâmetro, medidos em posições diferentes.

Uma análise prévia feita por Watanabe [10], mostra que o raio de escoamento, após um tempo  $t$ , é dado pela Equação (2):

$$R = R_0 \left( \frac{w}{2s_y} \right)^{1/2} \quad (2)$$

sendo;  $R_0$  = raio da massa (base) a  $t = 0$ ;  $R$  = raio da massa (base) a  $t = t$ ;  $s_y$  = tensão de escoamento do concreto;  $t = w/(2hK^2)$ ;  $w$  = massa do concreto;  $h$  = viscosidade da massa; e  $K$  = índice de consistência do concreto.

Convencionou-se empiricamente que para tempos da ordem de 60s e de acordo com a Equação (1), índices de escoamento menores que 50% caracterizam nenhuma autoescoabilidade, ao passo que índices em torno de 100%, exprimem uma autoescoabilidade plena.

Uma análise física da Equação (2) é bastante complexa considerando-se a dificuldade em se medir a parâmetro  $K$ . Além disso, na sua dedução, somente a parte relativa a matriz do concreto (partículas menores que 150 mm) foi considerada; isto é, o atrito interno provocado pelos agregados da fração grossa não foram levados em conta.

## 2.1. O Refinamento do Método de Masaryk, Steinke e Videtto (MSV)

Nas equações obtidas através do método de MSV, além dos problemas citados acima, como a dificuldade de obtenção de alguns parâmetros experimentais, e sua conseqüente dificuldade de

aplicação, revela outras deficiências, como por exemplo, a falta da descrição do escoamento, ou seja, do valor do raio de escoamento em função do tempo, e a não consideração do atrito interno entre os vários constituintes do concreto.

O refinamento do método de MSV, agora proposto, apresenta de maneira original uma solução para esses problemas. A figura 1 mostra um tronco de cone típico, usado pó MSV. Em função dos valores utilizados para descrever o tronco de cone da fig. 1, tem-se que o volume gerado pelo mesmo, e sua área lateral são respectivamente dados pelas Equações (3) e (4);

$$V = 1/3 \pi h_0 (a_0^2 + a_0 b_0 + b_0^2) \quad (3)$$

$$A = \pi (a_0 + b_0) [h_0^2 + (b_0 - a_0)^2]^{1/2} \quad (4)$$

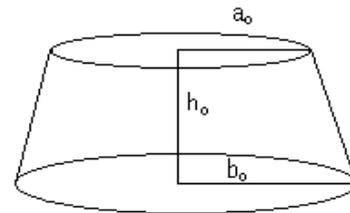


Figura 1 - Tronco de cone experimental.

Nos experimentos para a medida da auto escoabilidade, após o tronco de cone ser preenchido de concreto, o tronco de cone é colocado com a base maior em contato com uma superfície lisa e, a seguir, retirado para que a massa de concreto possa fluir. Observa-se então, que em um tempo muito rápido (em média um minuto), a massa de concreto escoando tomando a forma de uma “pizza“, que numa análise mais criteriosa, revela ser na verdade um outro tronco de cone, como o original, apenas com os valores das dimensões modificados, ou seja, os valores dos diâmetros das bases maior e menor aumentaram, e a altura diminuiu. Observações experimentais mostram que, após um intervalo de tempo muito curto (da ordem de minutos) gera-se a forma final do volume do experimento. Na verdade a massa de concreto continua fluindo indeterminadamente, no entanto o efeito predominante é encontrado nos primeiros minutos do experimento, sendo essa uma característica de um decaimento exponencial.

A suposição assumida é de que os valores das dimensões do volume inicial se propaguem de

forma exponencial, rigorosamente, um comportamento exponencial limitado, sendo que as formas sugeridas para as Equações de (5) a (7) são conhecidas de diversos experimentos e teorias matemáticas para a descrição de comportamentos exponenciais limitados [11,12], e descritos pelas relações abaixo:

$$a = a_0 \frac{N_1}{N_1 + (1 - N_1) \exp\left(-\frac{n_1 a_1}{t^{q_1}}\right)} \quad (5)$$

$$b = b_0 \frac{N_2}{N_2 + (1 - N_2) \exp\left(-\frac{n_2 a_2}{t^{q_2}}\right)} \quad (6)$$

$$h = h_0 \frac{N_3}{N_3 + (1 + N_3) \exp\left(-\frac{n_3 a_3}{t^{q_3}}\right)} \quad (7)$$

As condições iniciais e de contorno são dadas por ;

$$\begin{aligned} p/t = 0, & \quad a = a_0, \quad b = b_0 \text{ e } h = h_0 \\ p/t \rightarrow \infty, & \quad a = a_{\max}, \quad b = b_{\max} \text{ e } h = h_{\min} \\ V_0 = V_f = & \quad 1/3 \pi h (a^2 + ab + b^2) \end{aligned}$$

Considerando que as constantes  $n_1, n_2, n_3, N_1, N_2$  e  $N_3$  são dependentes dos parâmetros do teste (volume, formato do cone, formato do cone para um mesmo volume, etc), e dos parâmetros constitucionais do material, podendo as mesmas serem determinadas experimentalmente. Os coeficientes  $a_i$  e  $q_i$  são sempre positivos e diferentes de zero, e são constantes de ajuste da curva teórica com os dados experimentais.

Pode-se então comparar diretamente a Equação (2) com a Equação (6), pois ambas descrevem o comportamento do raio da base maior do tronco de cone;

$$b_0 \frac{N_2}{N_2 + (1 - N_2) \exp\left(-\frac{n_2 a_2}{t^{q_2}}\right)} = R_0 \frac{C}{2s} \frac{1}{y} \quad (8)$$

Neste caso, como  $b_0 = R_0$ ;

$$\frac{n_2 a_2}{t^{q_2}} = - \ln \frac{1}{\frac{1}{N_2} - 1} \quad (9)$$

Usando agora que  $t = w/(2hK^2)$  encontra-se;

$$\frac{n_2 a_2}{t^{q_2}} = - \ln \frac{1}{\frac{1}{N_2} - 1} \quad (10)$$

Isso nos mostra que o índice de consistência do concreto está relacionado com os parâmetros reológicos e de escoamento, por meio de uma série de constantes e de uma relação logarítmica. Baseados nisso será redefinido o índice de consistência por meio de uma relação logarítmica, de uma constante reológica (viscosidade  $h$ ) de uma condição de autoescoabilidade (o índice de autoescoabilidade), conforme definido por MSV [8], e dado na Equação (1), e uma constante de ajuste experimental  $C$ , ou seja, o novo índice, chamado agora de Índice de Consistência Redefinido,  $K^*$ , que será dado pela Equação (11);

$$K^* = \ln (C I / h) \quad (11)$$

Para a viscosidade  $h$  em poise, o índice de auto escoabilidade (ou fluidez)  $I$  em %, a constante  $C$  pode ser tomada apenas para dar um caráter adimensional a Equação (11), como  $C = 1\text{poise}/(\%)$ , sendo que é esperado ainda, que o Índice de Consistência Redefinido,  $K^*$ , tenha sua faixa de otimização obtida também em função do tipo de defloculante utilizado.

### 3. Experimental

Para verificar a adequação do modelo proposto, foram utilizados dois concretos refratários previamente desenvolvidos [4,9]. Um autoescoante de baixo teor de cimento e um outro com baixo índice de fluidez normalmente aplicado por vibração. Para a confecção de concretos refratários aluminosos dos tipos BTC e UBTC, foi utilizado um agregado refratário de alumina eletrofundida com teor de 90 a 91% de  $Al_2O_3$ , limitando-se a quantidade de cimento de tal maneira que o teor de CaO se mantenha em baixos níveis (1% para BTC e <0,3% para UBTC), com o objetivo de se evitar a formação de eutéticos de baixo ponto de fusão. Outros agregados eventualmente utilizados são: chamote sílicoaluminoso, alumina tabular, carbetto de silício etc.

Utilizou-se o cimento aluminato de cálcio como agente hidráulico e cujas fases componentes são de moderada a elevada refratariedade (dependendo do teor de alumina), as quais em reação com a água permitem que 80% de resistência mecânica final seja desenvolvida em um período de 24 a 48 horas. A microsilica (forma amorfa de  $SiO_2$ ), composta de esferas submicronizadas (0,1 a 0,2  $\mu m$ ) é um aditivo mineral, utilizada para a ocupação de espaços vazios entre os agregados grossos, não preenchidos pelo cimento aluminato de cálcio, facilitando a reologia e auxiliando na resistência mecânica do conjunto. A alumina calcinada reativa, na forma de um pó superfino, além de

propriedades refratárias, em contato com a microsilica parece contribuir para a fluidez do concreto, além de ocupar espaços vazios entre os agregados aumentando a resistência mecânica. Além desses produtos, utilizaram-se vários tipos de defloculantes, à base de hexametáfosfato de sódio, tripolifosfato de sódio, poliácridatos de sódio e amônio, sulfonatos ou combinações dos citados para a obtenção de propriedades autoescoantes. Eventualmente, agentes aceleradores e/ou retardadores de pega foram utilizados, incluindo-se carbonato de sódio ou lítio, ácido cítrico ou citrato tri-sódico, etc [9].

#### 3.1. Medidas da Auto Escoabilidade

Para verificar a adequação do modelo proposto, foram utilizados dois concretos refratários descritos anteriormente, um autoescoante de baixo teor de cimento e um outro com baixo índice de fluidez normalmente aplicado por vibração, bem como se utilizou dois tipos de cones, cujas dimensões são dadas abaixo, sendo que para o concreto autoescoante, tratado agora como Experimento 1, e o não escoante como Experimento 2.

O teste de autoescoabilidade (Tabela 1) foi realizado sobre uma placa lisa, e a evolução do diâmetro da base da massa foi gravada por meio de uma câmara de vídeo manual. Após um tempo de escoamento de  $t = 60$  s, foram encontrados os seguintes índices de auto escoabilidade para o Experimento 1, pela aplicação da equação (1).

**Tabela 1** – Teste de autoescoabilidade

	Cone 1	Cone 2
Diâmetro base (cm)	10	6
Diâmetro superior (cm)	5	5
Altura (cm)	7	7
Índice autoescoabilidade (%)	100	225

A Tabela 2 mostra os dados experimentais obtidos para cada cone utilizado, do diâmetro das bases em função do tempo, e os respectivos valores de  $n_2$  e  $N_2$ , e a Tabela 3 os valores teóricos obtidos pela aplicação da equação (6). As Figuras 2 e 3 mostram os resultados das Tabelas 2 e 3, ou seja, os diâmetros de escoamento da base em função do tempo. Para o cálculo dos valores teóricos, os coeficientes  $n_2$ ,  $a_2$  e  $q_2$  foram encontrados por regressão linear, através da análise dos resultados experimentais

obtidos, sendo os seguintes os valores encontrados:  $a_2 = 10$ ,  $q_2 = 1$ ,  $n_2 = 1$ , e  $N_2$  dado pelas respectivas Tabelas, resultando na Equação (12).

$$b = b_0 \frac{N_2}{N_2 + (1 - N_2) \exp\left(-\frac{1}{t} \frac{a_2}{q_2}\right)} \quad (12)$$

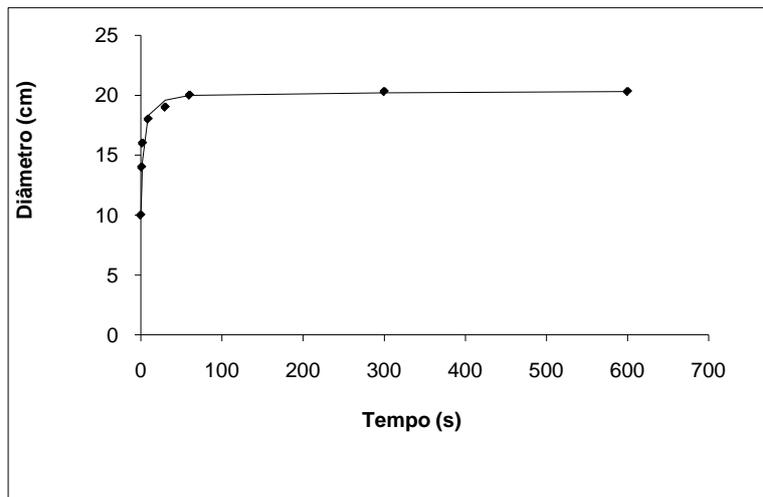
Fica claro pela observação da Figura 2 a correta adequação do modelo proposto, com os dados experimentais de autoescoabilidade.

**Tabela 2:** Dados experimentais da autoescoabilidade – Experimento 1

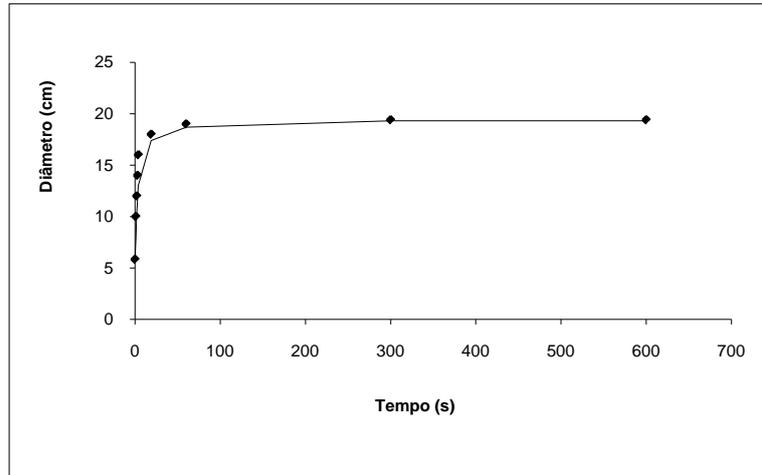
C O N E 1		C O N E 2	
$n_2 = 1$	$N_2 = 2.03$	$n_2 = 1$	$N_2 = 3.32$
D (cm)	Tempo (s)	D (cm)	Tempo (s)
10	0	5.84	0
14	1	10	1
16	2	12	2
18	9	14	3
19	30	16	4
20	60	18	19
20.3	300	19	60
20.3	600	19.4	300
-	-	19.4	600

**Tabela 3:** Dados teóricos da autoescoabilidade – Experimento 1

C O N E 1		C O N E 2	
$n_2 = 1$	$N_2 = 2.03$	$n_2 = 1$	$N_2 = 3.32$
D (cm)	Tempo (s)	D(cm)	Tempo (s)
10	0	5.84	0
12,3	1	8	1
14,5	2	10,2	2
18,3	9	11,7	3
19,6	30	13	4
20	60	17,4	19
20.2	300	18,7	60
20.3	600	19.3	300
-	-	19.3	600



**Figura 2:** Valores experimentais (○) e valores teóricos (△) para o Experimento 1 – Cone 1.



**Figura 3:** Valores experimentais ( " ) e valores teóricos ( % ) para o Experimento 1 - Cone 2

Para o Experimento 2, pela aplicação da Equação (1) obteve-se;

Cone 1 ,  $I_1 = 80\%$  Cone 2 ,  $I_2 = 157\%$

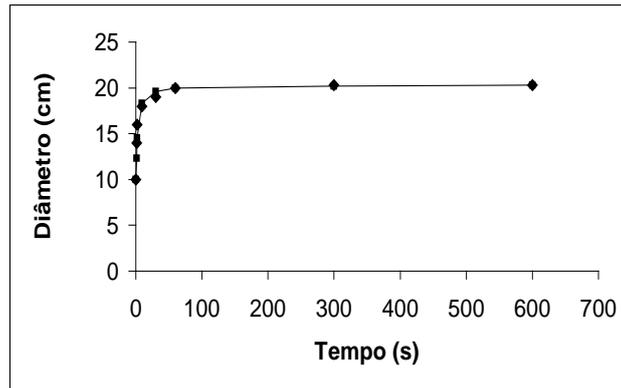
As Tabelas 4 e 5, mostram os dados obtidos (para cada cone utilizado), do diâmetro das bases em função do tempo. As Figuras 4 e 5 mostram os resultados das Tabelas 4 e 5, ou seja, os diâmetros de escoamento da base em função do tempo.

**Tabela 4:** Dados experimentais da autoescoabilidade - Experimento 2

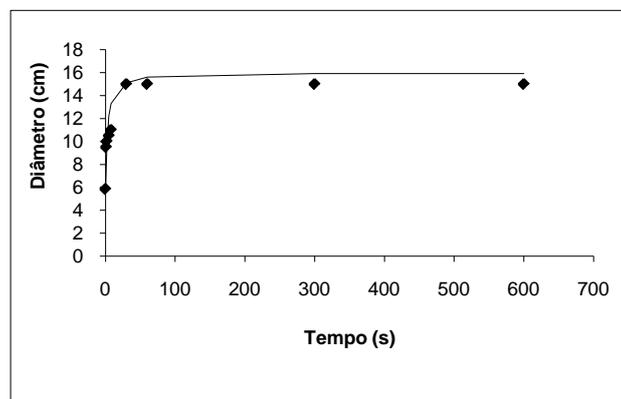
C O N E 1		C O N E 2	
$n_2 = 1$	$N_2 = 1,80$	$n_2 = 1$	$N_2 = 2,74$
D(cm)	Tempo (s)	D (cm)	Tempo (s)
10	0	5.84	0
14	1	9,5	1
15	3	10	2
16	8	10,5	5
17	30	11	8
18	60	15	30
18	300	15	60
18	600	15	300
-	-	15	600

**Tabela 5:** Dados teóricos da autoescoabilidade – Experimento 2

C O N E 1		C O N E 2	
$n_2 = 1$	$N_2 = 1,80$	$n_2 = 1$	$N_2 = 2,74$
D (cm)	Tempo (s)	D (cm)	Tempo (s)
10	0	5.84	0
12	1	7,7	1
14,7	3	9,5	2
16,5	8	12,2	5
17,6	30	13,3	8
17,8	60	15,1	30
18	300	15,6	60
18	600	15,9	300
-	-	15,9	600



**Figura 4:** Valores experimentais (●) e valores teóricos (—) para o Experimento 2 - Cone 1.



**Figura 5:** Valores experimentais (●) e valores teóricos (—) para o Experimento 2 - Cone 2.

### 3.2. Aplicação do Modelo a Outros Resultados Experimentais

A Equação 12 foi também aplicada aos resultados experimentais obtidos por Maestrelli [9], para as medidas de fluidez e viscosidade para vários tipos e quantidades de defloculantes e teor de água, para três casos distintos de tipo de defloração:

- Eletrostática, quando uma dupla camada elétrica é desenvolvida ao redor de cada partícula dispersa em um líquido polar, causando uma força repulsiva entre elas;
- Estérica, baseada na formação e adsorção de longas cadeias moleculares (poliméricas) ao redor de cada partícula, causando um impedimento espacial que mantém as partículas afastadas;

- Eletroestérica, quando os dois tipos de defloculantes estão presentes, causando ambos os efeitos.

Neste caso, foi calculado o Índice de Consistência Redefinido ( $K^*$ ), limitado segundo faixas otimizadas de autoescoamento para cada situação. Isto implica dizer que sempre que o índice de auto-escoamento medido estiver associado a um Índice de Consistência dentro da faixa otimizada estabelecida, o material vai apresentar autoescoabilidade com homogeneidade microestrutural (sem segregação).

Para os dados experimentais de Maestrelli [9], foi aferido que em função do tipo de defloração a auto escoabilidade é obtida quando  $K^*$  está compreendido nas faixas apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6:** Valores de  $K^*$  em relação ao tipo de defloculante

Caso 1	Defloração Eletrostática:	0,5 £ $K^*$ £ 1,7
Caso 2	Defloração Estérica:	0,7 £ $K^*$ £ 0,5
Caso 3	Defloração Eletroestérica:	0,7 £ $K^*$ £ 0,5

#### 4. Discussão e Conclusão

A análise dos resultados experimentais mostra que as suposições iniciais propostas para o escoamento (exponencial limitado), e para o comportamento do Índice de Consistência Redefinido  $K^*$ , estavam corretas, ou seja:

A descrição teórica do escoamento foi acertada, como pode ser observado pela análise das Figuras de 2 a 5, onde se encontra uma perfeita concordância entre a formulação teórica e os dados experimentais.

Os resultados obtidos pela aplicação da Equação (12), evidenciam agora claramente a definição de autoescoabilidade de um concreto refratário em relação aos parâmetros constitucionais e aos parâmetros experimentais.

O tipo de defloculante utilizado (parâmetro constitucional) também se mostra fundamental na definição da autoescoabilidade, pois tem-se experimentalmente que defloculantes eletrostáticos produzem concretos com viscosidade relativamente baixa, embora não apresentem qualquer tipo de segregação entre as fases presentes, originando então a necessidade de se classificar a autoescoabilidade em função do tipo de defloculante utilizado.

Em relação à segregação, deve-se salientar que todas as medidas experimentais baseiam-se também na observação da não ocorrência de segregação entre as fases presentes na composição do concreto, fenômeno que se ocorrendo invalida as definições de autoescoabilidade apresentadas, bem como a utilização prática do material em questão.

Com a descrição teórica formulada mostrou-se que qualquer alteração nos parâmetros experimentais é redefinida automaticamente por uma mudança na constante  $N$ , ou seja, para qualquer volume utilizado, como quando utilizou-se cones de tamanhos diferentes, obteve-se constantes  $N_2$  diferentes para um mesmo material, o que mostra que foram utilizados parâmetros experimentais também diferentes. Deve-se ainda citar que para um mesmo cone, por exemplo, o utilizado por MSV, leva a valores diferentes para a constante  $N$ , quando da utilização de materiais diferentes, ou seja, a constante  $N$  também está relacionada a parâmetros constitucionais e reológicos do experimento.

Outra constatação feita, é que o padrão de definição de autoescoabilidade, dado pela Equação (1), descrição de MSV[8], é aplicado

apenas para o cone truncado original, ou seja, o cone com as dimensões usadas por MSV[8], obtendo-se essa conclusão pela análise dos dados do índice de auto escoabilidade obtidos para os cones 1 e 2 do Experimento 1, cujos resultados foram , 100% e 225%, respectivamente, embora tratando-se do mesmo material, em experimentos realizados na mesma hora.

Não é necessário definir outras faixas de validade para o cone 2, visto que o cone proposto por MSV, é amplamente utilizado, e foi com resultados obtidos através de um cone deste tipo que Maestrelli [9] obteve seus resultados e que serviu para a definição da faixa ótima do índice  $K^*$  para cada tipo de concreto, permitindo o controle da qualidade do material em uso.

Conclue-se então com os resultados apresentado, que fica bem determinada teoricamente a descrição do autoescoamento, bem como ficam estabelecidos os parâmetros experimentais de um teste para o controle de qualidade desta classe de materiais.

#### Agradecimentos

A FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo), pelo apoio financeiro ao projeto.

#### Referências

- [1] Robson, T.D.. *Refractory Concretes: Past, Present and Future*. Publicação SP 57-1, Londres, ACI, 1978.
- [2] Octaviano, E.S. e outros. *A Model Analysis of Refractory Castables Self-Flow for Testing Optimization* – Proceedings of Unified International Technical Conference on Refractories – UNITECR 97 – and Fifth Biennial Worldwide Congress, New Orleans, EUA, Nov., vol. 2, 605-612, 1997.
- [3] Altun, A. *The Effect of Hydratable Alumina on the Properties of the SiC- High Alumina- and MgO-Based Self-Flowing Castables* – Proceedings of Unified International Technical Conference on Refractories – UNITECR 2005 – Worldwide Congress, 134-137, 2006.
- [4] Baldo, J.B. E Morelli, A.C. *New Development in Refractory Concretes*,

- Anais da UNITECR'95, Kyoto, Japão, 351-366, 1995.
- [5] Zhou, N. , Hu, S. E Zhang, S. *Advances in Modern Refractory Castables*. China's Refractories, vol.13, 3-12, 2004.
- [6] Lee, W. E. ,*Castables Refractory Concretes*, International Materials Reviews, vol.46, 145-167, 2001.
- [7] Karadeniz, E., *Properties of Alumina Based Low-Cement Self Flowing Castable Refractories*, Proceedings of IX Conference e Exhibition of the European Ceramic Society, 1849-1853, 2007.
- [8] Masaryk, J.S., Steinke, P.A. E Videtto, R.B. *Determination of Self Flowing in Refractories Concrete*, Anais da UNITECR'93, México, pgs.527-538, 1993.
- [9] Maestrelli, S.C. *Formulação de Concretos Refratários de Baixo e Ultra Baixo Teor de Concreto*, São Carlos, Dissertação de Mestrado, Depto. de Eng. de Materiais, UFSCar, 1996.
- [10] Watanabe, K. ,Ishikawa, M. E Wakimatsu, M. *Progress in Refractory Concrete*, Taikabutsu Overseas, vol. 1, 41-53, 1995.
- [11] Octaviano, E. S., Levada, C. L., Lautenschleguer, I. J., Maceti H., Andreetta J. P., Crescimento de Monocristais de  $\text{LiNbO}_3$  Puros e Dopados Pelo Método de Czochraslki com um Campo Elétrico Aplicado Durante o Processo de Crescimento – Análise da Segregação de Dopantes, Revista Eletrônica de Materiais e Processos, vol. 4, 72-78, 2009.
- [12] Octaviano, E.S. *Influência do Campo Elétrico na Segregação de Dopantes Durante o Crescimento de Cristais pelo Método de Czochralski*. São Carlos, Tese de Doutorado, Instituto de Física e Química da Universidade de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1991.