

# Avaliação reológica de concretos refratários para projeção a úmido em aplicações siderúrgicas

## *(Rheological evaluation of steel-making wet-shotcrete refractory castables)*

**F. A. O. Valenzuela, T. L. Dong, V. C. Pandolfelli**

*Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais - GEMM  
Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de S. Carlos  
Rod. Washington Luiz, km 235, C.P. 676, S. Carlos, SP 13565-905  
valenzuela@iris.ufscar.br, vicpando@power.ufscar.br*

### Resumo

A crescente utilização de processos automatizados durante a etapa de bombeamento e na projeção de concretos refratários é o resultado do entendimento simultâneo das características microestruturais de empacotamento e da natureza reológica destes materiais. A projeção a úmido de concretos refratários desperta interesse tecnológico por não necessitar de moldes para o revestimento de equipamentos siderúrgicos. A técnica consiste em aplicar o material pulverizado sobre a superfície de instalação, onde a fluidez do concreto projetado é instantaneamente reduzida devido à ação de aditivos coagulantes, resultando em uma elevada taxa de deposição. O presente trabalho teve como objetivos identificar os fatores que influenciam o desempenho da projeção a úmido por meio da avaliação de concretos comerciais para canais de corrida, estabelecer critérios sistêmicos para formulação e aperfeiçoar uma técnica para caracterização reológica multi-estágios. Os resultados têm possibilitado o estabelecimento de critérios tecnológicos para a classificação de desempenho e para o desenvolvimento desta importante classe de materiais.

**Palavras-chave:** concreto refratário, projeção a úmido, empacotamento, propriedades reológicas, siderurgia.

### Abstract

*The growing utilization of automated systems for pumping and projection of refractories castables is the result of the simultaneous understanding of packing's microstructural characteristics and rheological nature of these materials. The wet-shotcrete of refractories castables presents a great technological interest because there is no need of molds for lining large areas. The process consist of applying the sprayed castable on the surface to be lined or repaired. As the material hits the surface to be coated the fluidity must be totally vanished by the action of setting additives, resulting in a high deposition rate. The present work has the objective to identify the factors that influence the performance of the wet-shotcrete through the evaluation of commercial castables for blast furnace trough. Additionally, a systemic criteria for rheological multi-characterization was established. The results obtained generated a technological path to classify the performance and the development of this important class of ceramic refractory materials.*

**Keywords:** refractory castable, wet-shotcrete, packing, rheologic properties, steel-making.

## INTRODUÇÃO

A contínua busca visando aumentar a produtividade e a qualidade dos processos siderúrgicos tem se intensificado nas últimas décadas. Um dos aspectos que mais contribuiu foi a redução do consumo específico de refratários, que passou de 30 kg por tonelada de aço produzido na década de 70 para cerca de 9 kg/ton nos dias atuais [1, 2].

Com o intuito de obter melhores resultados na siderurgia, os usuários estão, gradualmente, substituindo as peças conformadas (tijolos e pré-moldados) por concretos refratários

que possam ser bombeados e projetados [1, 3].

Os equipamentos utilizados, por serem imprescindíveis na cadeia produtiva do aço, não podem ficar sujeitos a paradas por longos períodos durante os reparos dos refratários [4, 5]. Por isto, uma alternativa é melhorar o desempenho dos concretos refratários por meio da otimização granulométrica e da aditivização [6, 7].

O ajuste de tais fatores pode resultar em superior desempenho em serviço (maior resistência aos fatores de desgaste), com possibilidade de automação da aplicação por projeção a úmido, reduzindo assim, o tempo de instalação e

o custo para aplicação [1, 4, 8].

A técnica de projeção de concretos a úmido consiste em bombear o concreto previamente misturado com a água até o local de aplicação. Na saída da tubulação é acoplado um dispositivo (bocal de projeção) que possui uma entrada para ar comprimido, responsável por gerar um *spray* de concreto sobre o local de recobrimento [9, 10].

A consolidação do material sobre a superfície é proporcionada por um aditivo coagulante injetado juntamente no bocal de projeção (cloretos, silicatos ou polímeros), responsável pela perda instantânea da fluidez do concreto.

Independentemente da simplicidade de seu conceito, a utilização da técnica de projeção a úmido é uma operação complexa que envolve as etapas de mistura, bombeamento e aplicação do concreto. Para permitir um melhor controle sobre as propriedades dos materiais que serão submetidos ao *wet-shotcrete* sem a necessidade do uso de grandes quantidades e com obtenção de parâmetros reprodutíveis e embasados cientificamente, pode ser utilizado um protocolo de caracterização reológica.

Desta forma, utilizando a técnica para caracterização multi-estágios proposta por Pileggi e Pandolfelli [9, 11] foram identificados neste trabalho os fatores que mais influenciam o desempenho da projeção a úmido, utilizando concretos comerciais cujas propriedades já são conhecidas por consumidores e fornecedores. Isto permitiu a aferição da confiabilidade dos ensaios.

Assim, foi possível estabelecer um critério sistêmico para formulação e classificação do desempenho reológico de concretos para projeção a úmido para aplicações siderúrgicas, podendo ser estendido para outras classes de concretos refratários projetáveis.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Usualmente, a avaliação do desempenho da engenharia da formulação dos concretos refratários (granulometria e aditivação) se restringe a testes de consolidação sobre uma superfície padrão (perda por rebote) [8, 12, 13]. Estas técnicas apresentam características empíricas, que além de envolverem elevados custos, requerem a aplicação de grandes quantidades de material, o que dificulta o seu estudo em laboratório [9-11].

Como alternativa para avaliações em escala laboratorial foi desenvolvido um reômetro específico para concretos refratários, a partir de trabalhos de Pileggi et al (Fig. 1) [14].

De forma simples, um reômetro pode ser descrito como um equipamento que avalia as propriedades dinâmicas dos fluidos. Devido a sua extensa distribuição granulométrica, concretos não podem ser definidos como fluidos monofásicos, homogêneos e contínuos [2, 6, 15]. Por isto, a relação de estado reológico para concretos refratários deve ter uma abordagem específica, relacionando o torque aplicado com a rotação de um elemento cisalhante.

O reômetro para concretos utilizado neste trabalho foi

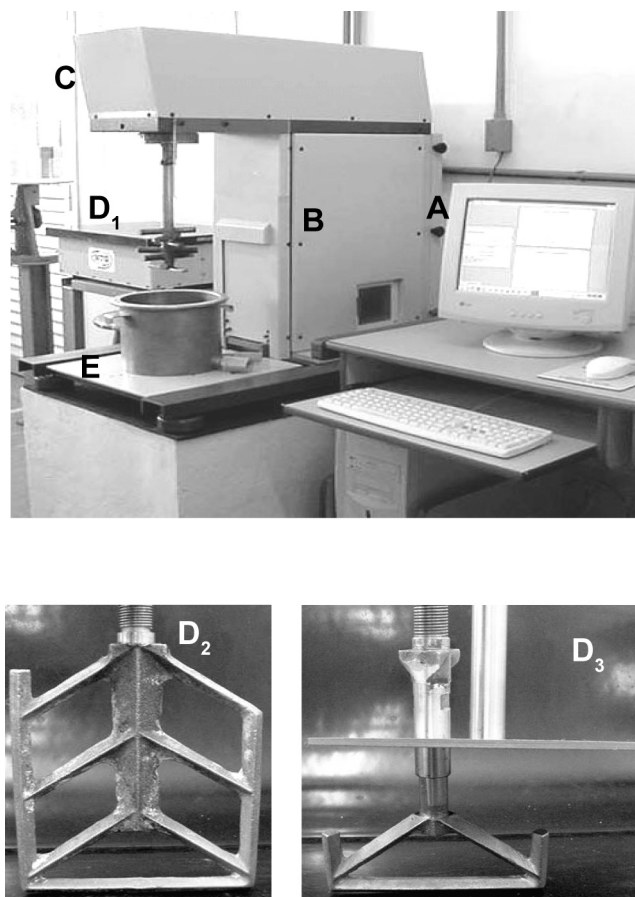


Figura 1: Reômetro para concretos desenvolvido pelo GEMM, o qual possibilita a realização do protocolo de caracterização reológica multi-estágios. Destacam-se: A) programa de controle Ragnar Solutions® em ambiente Linux; B) servo-controlador microprocessado WEG® de rotação e torque; C) servo-reductor SEW® com prolongamento para movimento planetário; D) 1-local de fixação dos elementos cisalhantes, 2-elemento de mistura, 3-sistema de cisalhamento com constrição de volume.

[Figure 1: Rheometer to refractory castables and its components.]

concebido em arquitetura planetária com controle digital microprocessado de rotação e torque, realizado por meio de um servo-controlador WEG® e de uma plataforma de programação em ambiente Linux, com maiores precisões de medida e aquisição de dados. A interface computacional, desenvolvida em parceria com a empresa Ragnar Solutions® possibilita a criação de protocolos de ensaios pré-programáveis, tornando a execução dos testes totalmente automatizada.

Com a grande versatilidade de recursos fornecida pelo reômetro para concretos, foram realizados diversos estudos buscando desenvolver uma técnica de caracterização reológica multi-estágios para concretos de *wet-shotcrete* que permitisse simular as várias solicitações encontradas durante a aplicação por projeção a úmido [9, 10, 12].

O protocolo experimental é constituído de quatro etapas principais: mistura do concreto, ensaios de fluidez em função do tempo, ciclo de cisalhamento com volume restrito e o teste de consolidação (Fig. 2).

### Mistura do concreto

Antes de ser iniciada a avaliação reológica, o concreto é homogeneizado a seco por dois minutos em um misturador duplo cone para evitar a possibilidade de segregação entre as matérias-primas.

Em seguida, o material é misturado no reômetro a uma rotação constante de 33 rpm. Após 30 s de mistura a seco, inicia-se a adição gradual de 75% do teor de água recomendado pelos fabricantes. Após aproximadamente 200 s de mistura inicia-se o processo de aglomeração, originado pela associação das forças atrativas capilares e secundárias, gerando uma máxima coesão indicativa do estágio de virada do concreto (Fig. 4). O torque máximo deve ser limitado em 12 Nm para evitar excessivo aquecimento. Após a adição do restante da água (25%-p), o concreto é homogeneizado por 60 s antes das demais etapas [15-17].

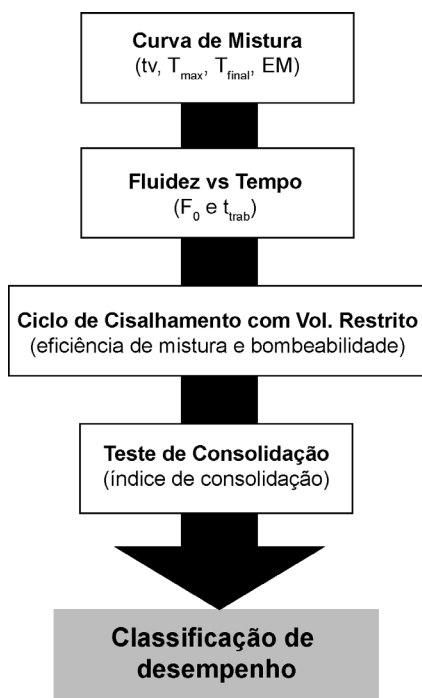


Figura 2: Fluxograma de execução do protocolo de caracterização reológica multi-estágios utilizada neste trabalho e baseada em estudos de Pileggi e Pandolfelli [9, 11].

[Figure 2: Rheological characterization procedure used in this work and based on studies of references [9, 11].]

### Medidas de fluidez livre em função do tempo

Após a mistura e homogeneização do concreto no reômetro, preenche-se com aproximadamente 500 g de material um tronco de cone não-maciço padronizado pela norma ASTM C860 (100 x 70 x 60 mm).

Em seguida, o cone é deslocado verticalmente, permitindo o escoamento do concreto. Passados 60s mede-se o diâmetro final do fluxo e se calcula a fluidez porcentual descontando-se do valor medido o diâmetro inicial (100 mm) do cone.

Repete-se este procedimento em intervalos de 15 min até a fluidez livre do concreto atingir 20%. Este ponto corresponde ao tempo de trabalhabilidade (início do endurecimento ou “pega”) do material.

O valor da fluidez livre inicial obtida logo após a mistura é utilizado, tradicionalmente, para classificar o método de instalação dos concretos. Uma fluidez livre inicial entre 0 e 40% caracteriza concretos socados, enquanto valores compreendidos entre 40 e 80% indicam concretos vibrados ou bombeáveis sobre pressão (Fig. 5).

Materiais com excessiva fluidez livre inicial, ou seja, superiores a 80%, apesar de serem classificados como auto-escoantes, podem apresentar segregação entre a matriz e os agregados durante o bombeamento [12, 18].

Em concretos para projeção, procura-se ajustar a fluidez inicial entre 40 e 80%, além de controlar o tempo de trabalhabilidade em valores maiores que 90 min [1, 12].

Apesar de sua aparente simplicidade, o ensaio de consistência baseado na fluidez dos concretos refratários possui grande complexidade de interpretação, pois é resultante de contribuições simultâneas da tensão de escoamento e da viscosidade da matriz, por isto deve sempre ser complementado com outros ensaios reológicos para permitir uma real avaliação do material [4, 6, 15].

### Ciclo de cisalhamento com restrição de volume

Após o concreto estar adequadamente misturado, troca-se o elemento cisalhante (“raquete”) do reômetro e acopla-se um dispositivo que permite restringir o volume do material em análise durante a realização do ciclo de cisalhamento. Esta constrição simula as condições encontradas pelo concreto no interior da tubulação de transporte durante o bombeamento. Em seguida, por meio de programações computacionais realizadas no reômetro, são feitas rampas de rotação ascendentes e descendentes, com patamares de 30 s, entre 5 e 80 rpm (Fig. 6). Com os dados coletados é possível determinar a relação de estado reológico entre a rotação (taxa de cisalhamento) e o torque (tensão de cisalhamento), indicando o comportamento reológico típico do concreto (pseudoplástico ou dilatante) [7, 14, 16]. Além deste parâmetro, também podem ser extraídos dos ciclos de cisalhamento duas outras importantes variáveis experimentais: o nível máximo de torque (esforço) durante o cisalhamento e a área de histerese. O primeiro está relacionado à potência dos equipamentos necessários para o bombeamento do material, enquanto a área de histerese, que é inversamente proporcional a eficiência de mistura, indica o nível de desaglomeração do concreto [7, 16].

A histerese é gerada durante a quebra dos aglomerados porosos da matriz que disponibilizam a água aprisionada em seu interior em virtude da energia adicional fornecida pelo intenso cisalhamento (Fig. 6) [1, 14, 17].

### Testes de consolidação

O último ensaio que compõe a caracterização reológica

multi-estágios proposta para avaliar e desenvolver concretos refratários avançados, tais como os aplicados por projeção a úmido em canais de corrida, é o de consolidação no cone de projeção [9, 11]. Este ensaio consiste em manter o concreto sob rotação de 33 rpm por 50 s após a mistura e, subitamente, elevar a rotação para 75 rpm no mesmo instante que se adiciona o aditivo coagulante (p.e. solução de cloreto de cálcio), mantendo-se esta elevada rotação por apenas 10 s. O pulso de rotação que o elemento cisalhante de geometria triangular é submetido projeta o concreto em fase de consolidação (consistência viscoelástica) contra as paredes de um dispositivo cônico com rugosidade superficial controlada (lixa grão 80) e, também, ancora o material em uma região de compactação (tela polimérica), situada na base do dispositivo. Após o ensaio, o sistema compreendido pela cuba de mistura do reômetro, pelo dispositivo cônico de adesão e pelo concreto consolidado é vertido por 120 s sobre uma balança digital que coleta a massa de concreto desprendida, ou seja, o material perdido por rebote [9]. A diferença entre a massa de concreto total utilizada para mistura e a quantidade de concreto desprendida, é considerada a porcentagem consolidada total. Este parâmetro pode ser subdividido, em casos mais específicos de análises, em consolidação por adesão e por compactação. Neste trabalho, foi apenas considerado o índice total de consolidação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho apresenta os resultados das avaliações dos concretos comerciais **A**, **B** e **C** para aplicação no revestimento de canais de corrida de ferro gusa em altos-fornos siderúrgicos.

Na Tabela I pode-se observar a análise química dos concretos avaliados. Todos são aluminosos ( $Al_2O_3 > 55\%$ -p) com elevado teor de carbeto de silício ( $SiC > 20\%$ -p), adicionado à composição para aumentar a resistência ao choque térmico do refratário [1]. Adicionalmente, o concreto **B** possui ultra-baixo teor de cimento de aluminato de cálcio ( $CaO < 0.6\%$ -p), favorável para o aumento da refratariedade, enquanto o **A** e o **C** têm teores de cimento um pouco mais elevados ( $0.6\%$ -p  $< CaO < 1.5\%$ -p), o que aumenta a probabilidade de geração de fases com menor ponto de fusão [1, 10]. Todas as composições contêm carbono, que atua como agente anti-molhante para escória e metal fundidos, e contribui para elevar a vida útil do revestimento refratário. Adicionalmente, a incorporação de carbono pode melhorar as propriedades termomecânicas, tais como energia de fratura e resistência ao dano por choque térmico. A sílica presente neste tipo de concreto é geralmente amorfa e ultra-fina (microssílica), possibilitando a multitzificação *in situ* devido as elevadas temperaturas dos processos [13, 19]. Os óxidos de ferro e titânio são impurezas oriundas do bauxito, utilizado como matéria-prima na eletrofusão dos agregados de alumina marrom, empregada na composição destes concretos.

Por meio do procedimento de análise reversa, que consiste no peneiramento do concreto comercial baseado na norma ASTM D6913 e posterior emprego de um programa

Tabela I - Análise química dos concretos comerciais.  
[Table I - Chemical analysis of commercial refractory castables.]

| (%-p)     | A    | B    | C    |
|-----------|------|------|------|
| $Al_2O_3$ | 63,7 | 69,0 | 65,6 |
| SiC       | 26,9 | 21,3 | 27,3 |
| $SiO_2$   | 4,6  | 6,1  | 2,0  |
| $TiO_2$   | 1,7  | 0,8  | 0,5  |
| $Fe_2O_3$ | 0,4  | 0,3  | 0,3  |
| C         | 1,4  | 2,0  | 3,5  |
| CaO       | 1,2  | 0,5  | 0,8  |

computacional de controle granulométrico (PSDesigner®, GEMM/ALCOA), foi possível determinar a distribuição do tamanho de partículas dos concretos avaliados (Fig. 3) [20].

É importante lembrar que a literatura estabelece, baseada em ensaios reológicos e termomecânicos, que concretos com coeficiente de empacotamento  $q = 0,26$  e diâmetro máximo de partículas entre 4,75 e 8,00 mm possuem a maior versatilidade de uso, sendo muitas vezes chamados de multifuncionais [9, 10, 18].

Sua multifuncionalidade decorre da fluidez livre facilmente variável que estes concretos podem assumir, quer sejam socados ( $F_{inicial} < 40\%$ ) ou auto-escoantes ( $F_{inicial} > 80\%$ ), apenas com uma pequena variação de água entre 4 e 5%-p. Isto ocorre pelo balanço adequado entre forças mássicas oriundas da fração grossa, com as forças de superfície geradas pela matriz [6, 12, 20].

Quando concretos com coeficientes de empacotamento baixos (0,21) ou elevados (0,31) são avaliados comparativamente aos multifuncionais, fica evidente que

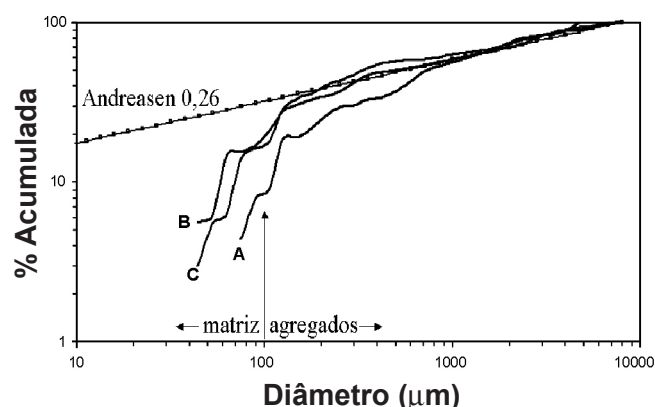


Figura 3: Distribuições granulométricas acumuladas dos concretos comerciais avaliados. É também apresentada a curva alvo Andreasen com coeficiente de empacotamento 0,26 e diâmetro máximo de partículas 8000 µm. Destacam-se na figura as regiões da matriz (<100 µm) e dos agregados (>100 µm).

[Figure 3: Particle size distributions of the analyzed commercial castables. Andreasen curve with packing coefficient 0.26 and maximum particle diameter 8000 µm are also presented. The particle size range for the matrix (<100 µm) and aggregates (>100 µm) is also highlighted.]

além das propriedades reológicas de concretos 0,26 serem mais adequadas ao bombeamento e à projeção a úmido, são também obtidos baixos níveis de porosidade, e retração a verde e após a sinterização [12, 17, 18].

A partir das distribuições granulométricas foi possível calcular alguns parâmetros teóricos de empacotamento (Tabela II), tais como o coeficiente de ajuste granulométrico acumulado ( $R^2$  Acum), o diâmetro máximo de partículas ( $D_{max}$ ), o coeficiente de empacotamento segundo modelo de Andreasen ( $q$ ) e a porosidade teórica da formulação ( $P_{ot}$ ).

Estes dados são importantes na correlação com os resultados reológicos experimentais, pois permitem uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos nas solicitações das diversas etapas da caracterização multi-estágios, possibilitando controlar a formulação e a reologia dos concretos.

No entanto, por melhor ajustadas que estejam as distribuições granulométricas teóricas (baixo  $R^2$ ), na prática as partículas irregulares, principalmente da fração grosseira, sempre geram uma porosidade intergranular residual maior que a esperada [2, 6, 20].

Por isto, um controle granulométrico adequado não apenas influencia a etapa de mistura, mas pode impor aos concretos refratários características reológicas desejadas para as diversas solicitações de instalação e uso [7, 16, 18].

#### Curvas de mistura

Resultados anteriores encontrados na literatura mostram que apesar das características granulométricas teóricas dos concretos refratários ( $q$ ,  $D_{max}$ ,  $R^2$ ) serem importantes, os procedimentos experimentais de processamento, tal como a homogeneização a seco, a adição de água na mistura e o tempo de homogeneização (“virada”) também possuem grande relevância para impor um maior nível de desempenho aos concretos durante a aplicação e o serviço [7, 16].

Tabela II - Parâmetros teóricos de empacotamento dos concretos comerciais obtidos no programa computacional de controle granulométrico PSDesigner®.

[Table II - Packing parameters of commercial castables obtained using the software PSDesigner®.]

|                             | A      | B      | C      |
|-----------------------------|--------|--------|--------|
| $R^2$ (acum)                | 0,0234 | 0,0103 | 0,0157 |
| $q$                         | 0,28   | 0,26   | 0,26   |
| $D_{max}$ ( $\mu\text{m}$ ) | 4750   | 4750   | 8000   |
| $P_{ot}$ (%-v)              | 22,74  | 20,18  | 22,02  |
| Matriz (%-p)                | 18,10  | 21,88  | 17,02  |

Com o uso do reômetro para concretos foram obtidas as curvas de mistura sob rotação constante de 33 rpm (Fig. 4) para os concretos refratários comerciais. O teor de água usado foi recomendado pelos fabricantes e o procedimento experimental baseado na norma ASTM C862.

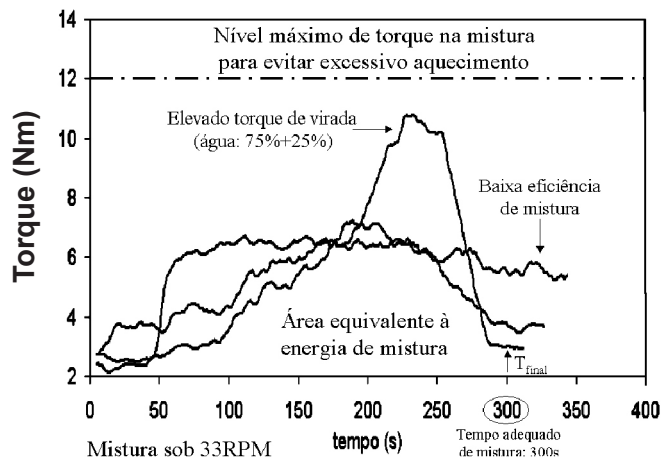


Figura 4: Curvas de mistura obtidas no reômetro para concretos com os diferentes materiais comerciais. São discriminados os teores de água recomendados pelos fabricantes para cada concreto. É indicada a rotação constante de mistura (33 rpm) e o nível adequado de torque máximo durante a mistura (12 Nm). O cálculo da energia de mistura (área sob as curvas) foi realizado no intervalo padronizado entre 30 s e o ponto de estabilização final do torque após a homogeneização com toda a água adicionada.

[Figure 4: Mixing curves obtained in the rheometer for refractory castables with different commercial materials. The percentage of water recommended for each castable by the manufacturer is described. The constant mixing rotation (33 rpm) and the appropriate level of maximum torque during mixing (12 Nm) are indicated. The evaluation of the mixing energy (area under the curves) was accomplished in the standardized interval between 30 s and the torque stabilization after the homogenization with all added water.]

Pode ser observado que os concretos **B** e **C** apresentam curvas de mistura com picos de virada caracterizados pela elevação do torque (esforço), como resultado associado das forças capilares e secundárias originadas pela saturação com água da porosidade interparticular [7, 20]. Este aumento de torque impõe um elevado cisalhamento sobre as partículas, promovendo uma melhor desaglomeração da matriz, gerando menor consumo de água e melhores propriedades reológicas, físicas e mecânicas.

Alguns parâmetros importantes de serem calculados a partir das curvas de mistura são a energia de mistura -  $E_M$  (área sob a curva), associada à potência e ao gasto energético dos equipamentos de mistura, e o nível de torque final após a mistura -  $T_p$  que pode ser relacionado com a fluidez livre do material e com o método mais indicado para instalação (vibração, auto-nivelamento e projeção). Estes dois parâmetros ( $E_M$  e  $T_p$ ) estão correlacionados com a porcentagem de matriz presente nos concretos, uma vez que é a responsável pelo distanciamento dos agregados (MPT), pelo empacotamento de partículas mais efetivo e pelos efeitos de superfície que podem gerar coagulação e maior demanda de água [6, 14, 18].

O concreto **B** apresenta 22%-p de partículas menores que 100  $\mu\text{m}$ , as quais são consideradas constituintes da matriz (Tabela II). Quando comparado ao A, que possui 18% de

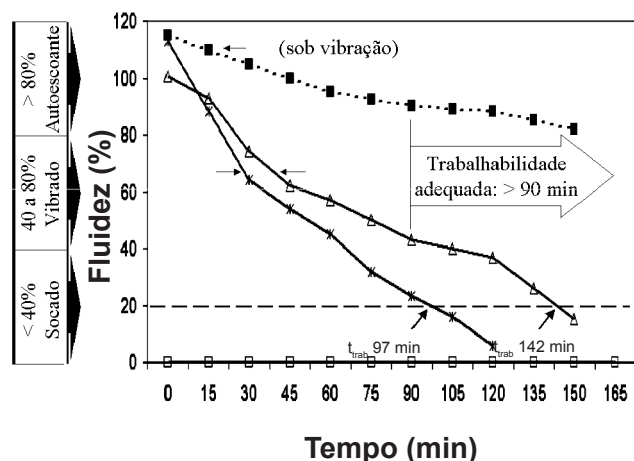


Figura 5: Valores de fluidez livre logo após a mistura ( $t=0$ ) e em intervalos de 15 min até que o valor alcance 20%. Neste ponto considera-se que o material atingiu seu limite de trabalhabilidade, iniciando o processo de endurecimento ou “pega”. Em concretos para projeção a úmido recomenda-se um tempo de trabalhabilidade superior a 90 min para garantir que todas as etapas de aplicação estejam cumpridas antes do endurecimento do material. Para cada faixa de fluidez livre inicial após a mistura pode ser associada uma técnica de aplicação dos concretos refratários que possibilitará melhores condições de instalação: socado, vibrado (ou bombeável sob pressão) e auto-escoante (ou bombeável com tendência a segregação).

[Figure 5: Free-flow values just after the mixture ( $t=0$ ) and at time intervals of 15 min up to 20% of fluidity. At this point the material reached its workability limit. For wet-shotcrete refractory castables it is suggested a time over 90 min to guarantee that all the application stages are accomplished before the hardening of the material. Each fluidity range after mixing can be associated to refractory application techniques that will provide better installation conditions: ramming, vibrated and free-flow.]

matriz, é possível notar que o maior teor de finos do B impõe uma maior coesão durante o processamento.

Apesar da energia de mistura ser elevada como consequência desta maior coesão do concreto, o cisalhamento intenso promove uma mistura mais eficiente. Isto gera uma maior desaglomeração (disponibiliza mais água para separação das partículas) que se reflete em um nível de torque final menor, indicando uma maior fluidez livre do B, em relação ao concreto A.

#### Ensaio de fluidez livre

A etapa subsequente da avaliação reológica multi-estágios é composta por ensaios de fluidez livre adaptados da norma ASTM C860.

Baseados nestes resultados foram obtidos dois parâmetros importantes: a fluidez inicial ( $F_0$ ), a qual define o comportamento reológico tradicional dos concretos (socado, vibrado e auto-escoante), e o intervalo de trabalhabilidade ( $t_{trab}$ ), que é o tempo para que a fluidez livre atinja 20%. Em concretos para projeção, o tempo de trabalhabilidade também é um fator de controle e deve ser maior que 90 min [1, 18].

Pode ser observado na Fig. 5 que os concretos B e

C apresentam fluidez livre elevada, que concorda com o menor nível de torque registrado pelo reômetro após a mistura. Tal resultado contrasta com o concreto A, o qual não apresenta pico de virada durante o processamento. Adicionalmente, o nível elevado de torque final indica a fluidez livre nula. O concreto A apenas flui sob a ação de intensa vibração caracterizando-se como um concreto vibrado. Por outro lado, o B e o C apresentam um comportamento típico de concretos para bombeamento e projeção, ou seja, fluidez livre elevada e tempo de trabalhabilidade maior que 90 min.

Para entender melhor os fatores que estão diferenciando as propriedades reológicas dos concretos A, B e C, pode-se correlacionar alguns parâmetros de empacotamento, tais como, coeficiente de ajuste granulométrico acumulado -  $R^2$  Acum, diâmetro máximo de partículas -  $D_{max}$  e coeficiente de empacotamento -  $q$ , com a fluidez livre inicial ( $F_0$ ) e o teor de água consumido durante a mistura dos concretos.

Por exemplo, os concretos B e C possuem coeficiente de empacotamento igual a 0,26, o qual facilita o bombeamento e é mais adequado às solicitações reológicas oriundas da projeção a úmido, em relação ao material A com  $q = 0,28$ , conforme já relatado [9, 12, 18].

Os concretos B e C também apresentam bons ajustes granulométricos (baixos valores de  $R^2$  Acum), o que pode reduzir o consumo de água e melhorar ainda mais a fluidez do concreto.

Adicionalmente, a distribuição do tamanho de partículas no C é mais aberta ( $D_{max} = 8$  mm) que nos materiais A e B ( $D_{max} = 4,75$  mm). A presença de agregados maiores aumenta o efeito cisalhante sobre a matriz durante a mistura e homogeneização do concreto, o que resulta em maiores níveis de fluidez livre considerando um mesmo teor de água.

#### Ciclos de cisalhamento

Dentre as principais características que um concreto para projeção deve apresentar podem ser destacadas uma baixa área de histerese, indicando boa eficiência de mistura, um comportamento pseudoplástico e um nível máximo de torque durante o cisalhamento com restrição de volume menor que 10 Nm [9].

Na Fig. 6 podem ser destacadas duas regiões citadas pela literatura como ótimas para bombeamento em baixas e altas taxas de cisalhamento (rotação). Na região referente a rotações baixas (1 a 5 rpm) podem ser identificadas eventuais tendências a segregação do concreto, caso não ocorra resposta de torque com o aumento da rotação [15, 17, 18].

A região delimitada para rotações elevadas (70 a 80 rpm) é importante para limitar o torque máximo em valores proporcionais àqueles fornecidos pelos equipamentos industriais de bombeamento. Acima de 10 Nm o excesso de atrito acelera o endurecimento do concreto, elevando a energia para bombeamento, além de gerar maior desgaste por abrasão na bomba, mangueira e bocal de projeção [10, 18].

Pode-se também observar (Fig. 6) que o concreto B

mesmo quando submetido ao ciclo de cisalhamento sob volume restrito não apresentou elevação significativa da área de histerese e do torque máximo, mantendo também, seu comportamento pseudoplástico.

Por outro lado, o A, que anteriormente já apresentava características não tão bem ajustadas para a aplicação por bombeamento e projeção a úmido (p.e. baixo teor de matriz e fluidez livre nula), quando submetido a limitação de volume exibe um perfil tipicamente dilatante em rotações elevadas resultando em um torque máximo (16 Nm) muito acima do adequado (10 Nm) para aplicações por projeção a úmido [9, 18].

### Testes de consolidação

O último ensaio que compõe a caracterização reológica multi-estágios proposta pela literatura [9, 11] para avaliar e desenvolver concretos refratários avançados aplicados por projeção a úmido em canais de corrida é o de consolidação no cone de projeção. Este ensaio foi desenvolvido a partir de aperfeiçoamentos baseados em estudos de Yauhiro para otimização de aditivos coagulantes utilizados em concretos para projeção [5].

Para ser possível correlacionar os aspectos granulo-

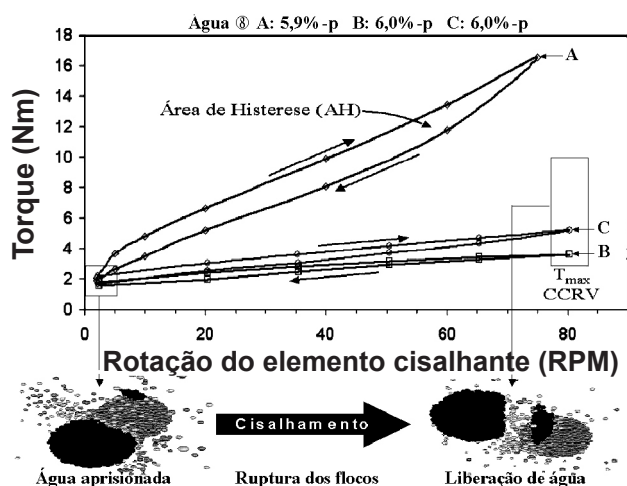


Figura 6: Ciclos de cisalhamento com restrição de volume aplicados aos concretos comerciais avaliados. Observa-se que é gerada uma histerese entre o ciclo ascendente e descendente de rotação, em virtude da liberação de água adicionada no interior dos aglomerados porosos que se rompem durante o cisalhamento intenso. A área de histerese é inversamente proporcional a eficiência de mistura. Também são indicadas as regiões adequadas de esforço (torque) para baixas (1 a 5 rpm) e altas (70 a 80 rpm) velocidades de cisalhamento.

[Figure 6: Shear cycles with volume restriction for the analyzed commercial castables. The hysteresis area enclosed between the ascending and descending cycle of rotation is due to the release of water trapped inside porous agglomerates that break up during the intense shearing. The hysteresis area is inversely proportional the mixing efficiency. It is also highlighted the torque regions for low (1 to 5 rpm) and fast (70 to 80 rpm) shear speeds.]

métricos e reológicos com as situações típicas que podem ocorrer com o concreto projetado foi utilizado um dispositivo cônico com rugosidade superficial controlada (lixa grão 80) e com uma região de compactação (tela polimérica), que simulam juntamente com o elemento cisalhante adequado, a etapa de pulverização e consolidação do concreto [9].

Apesar do teste de consolidação ser uma ferramenta importante para caracterizar e desenvolver concretos para projeção a úmido em laboratórios, ele apresenta apenas um caráter comparativo, e impõe condições de análise mais severas que a prática [11, 18].

Os principais fatores que levam as condições laboratoriais a serem mais rigorosas que na prática são: a pequena distância do ponto de projeção à superfície e o ângulo de projeção muito agudo [9, 11]. Apesar de parecer um ponto desfavorável à técnica, na verdade é positivo.

Um concreto que obtiver um elevado nível de consolidação nas adversas condições impostas pelo dispositivo cônico,

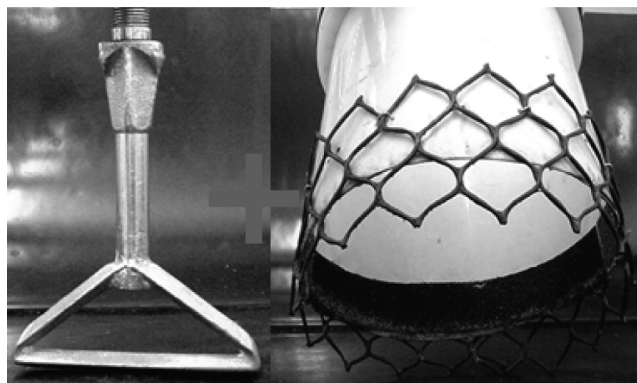
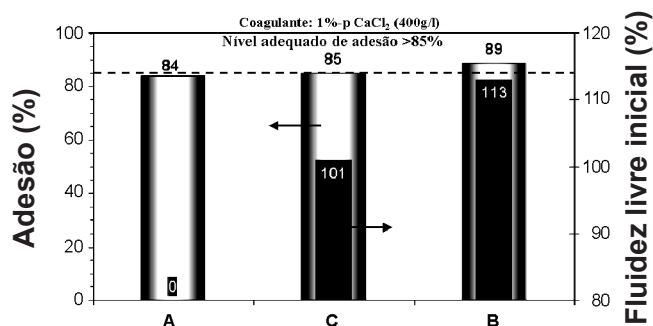


Figura 7: Comparação entre os valores de fluidez livre inicial e nível de adesão obtido no cone de projeção utilizando 1%-p de solução 400 g/L de CaCl<sub>2</sub>. É indicado no gráfico o índice percentual de consolidação considerado como o mínimo adequado (85%) para projeção a úmido. Destacam-se, também, o elemento cisalhante triangular (30°) e o cone de projeção com as áreas de adesão (lixa) e compactação (polimérica).

[Figure 7: Initial free-flow value and results obtained in the consolidation test using 1%-wt of 400 g/L solution of CaCl<sub>2</sub>. It is highlighted the percentage index of consolidation considered as the minimum required (85%) for wet-shotcrete. The triangular shearing element and the projection cone with the areas of adhesion (sandpaper) and compaction (polymeric grid) are also showed.]

passa a ter maior probabilidade de apresentar superior desempenho, quando for aplicado em condições industriais.

O ensaio de consolidação utiliza como aditivo coagulante 1%-p de solução de cloreto de cálcio com concentração de 400 g/L. Os resultados observados na Fig. 7 revelaram que o concreto **B**, que já vinha apresentando resultados coerentes com as especificações sugeridas para concretos projetáveis, tais como distribuição granulométrica ajustada e elevada fluidez livre, possui o maior nível de consolidação (89%), com praticamente o mesmo teor de água total (água de mistura + solução de  $\text{CaCl}_2$ ) dos outros concretos.

Este índice de 89% obtido no dispositivo cônico indica que em aplicações reais como em canais de corrida, o nível de adesão do concreto **B** tende a ser ainda mais elevado (praticamente sem nenhuma perda por rebote), principalmente considerando que a geometria do canal de corrida favorece uma maior consolidação [1].

Em outros equipamentos siderúrgicos, como o carro torpedo, já são esperadas menores taxas de deposição em virtude do acesso menos favorável dos bocais de projeção à superfície de consolidação [1, 2].

Este resultado comprova a grande dependência da etapa de projeção, em relação aos passos anteriores de processamento (mistura e bombeamento). Isto pode ser constatado no material **B**, o qual apresentou durante todas as etapas da avaliação multi-estágios propriedades adequadas

para atender às solicitações impostas pelas simulações de uma aplicação por bombeamento e projeção a úmido.

#### Classificação de desempenho

Após a execução de todas as etapas propostas pela caracterização reológica multi-estágios, realizou-se uma classificação de desempenho entre os três concretos comerciais avaliados com o intuito de verificar qual seria o resultado da correlação de todos os dados obtidos nas diversas etapas, e assim, comprovar a validade dos critérios granulométricos e reológicos propostos por este trabalho.

Foram selecionados 15 parâmetros considerados relevantes, sendo cinco teóricos relacionados ao empacotamento de partículas, e 10 baseados nos diversos resultados coletados durante as etapas experimentais da avaliação multi-estágios. Em cada parâmetro selecionado para comparação foram atribuídos pontos de 1 (pior conceito) a 3 (melhor conceito), sendo que a soma dos pontos acumulados nas 15 variáveis determina o material de maior desempenho global, ou seja, com melhor otimização granulométrica e com respostas reológicas dentro dos limites considerados adequados.

Na Tabela III são discriminados todos os parâmetros que são considerados para a classificação final de desempenho, assim como, os valores numéricos para cada

Tabela III - Resumo dos resultados obtidos divididos entre parâmetros teóricos e experimentais. Entre parênteses encontra-se a pontuação de desempenho dada entre 1 (pior) e 3 (melhor). Na parte inferior da tabela está situado o ranking classificatório baseado nos pontos totais obtidos pelos concretos comerciais para projeção a úmido.

[Table III - Summary of the obtained results including theoretical and practical parameters. In parentheses the marks classify as 1 (worse) to 3 (best) the castable performance. In the lower part of the table the ranking is placed based on the final marks of the analyzed commercial wet-shotcrete refractory castables.]

|              | Parâmetro              | unidade  | A      |   | B      |   | C      |   |
|--------------|------------------------|----------|--------|---|--------|---|--------|---|
| TEÓRICO      | $R^2$                  | acum     | 0,0234 | 1 | 0,0103 | 3 | 0,0157 | 2 |
|              | q                      |          | 0,28   | 2 | 0,26   | 3 | 0,26   | 3 |
|              | $D_{\max}$             | mm       | 4750   | 3 | 4750   | 3 | 8000   | 2 |
|              | $P_{\text{ot}}$        | %-v      | 22,74  | 1 | 20,18  | 3 | 22,02  | 2 |
|              | Matriz                 | %-p      | 17,0   | 1 | 21,9   | 3 | 19,1   | 2 |
| EXPERIMENTAL | Água                   | %-p      | 5,9    | 3 | 6,0    | 2 | 6,0    | 2 |
|              | $t_v$                  | (s)      | 350    | 1 | 225    | 2 | 221    | 3 |
|              | $T_{\max}$             | (Nm)     | 6,9    | 1 | 11,1   | 3 | 7,3    | 2 |
|              | $T_f$                  | (Nm)     | 5,8    | 1 | 3,0    | 3 | 4,0    | 2 |
|              | $E_M$                  | (Nm.s)   | 1951   | 2 | 2491   | 1 | 1357   | 3 |
|              | $F_{\text{inicial}}$   | (%)      | 0      | 1 | 113    | 2 | 101    | 3 |
|              | $t_{\text{trab}}$      | (min)    | 0      | 1 | 97     | 2 | 142    | 3 |
|              | $T_{\max} \text{ CRV}$ | (Nm)     | 16,5   | 1 | 2,6    | 3 | 4,2    | 2 |
|              | Histerese              | (Nm.rpm) | 101    | 1 | 18     | 3 | 31     | 2 |
|              | Adesão                 | (%)      | 84,0   | 1 | 89,0   | 3 | 85,0   | 2 |
|              | Pontuação final        |          |        |   | 21     |   | 39     |   |
| RANKING      |                        |          |        | 3 |        | 1 |        | 2 |



uma das variáveis que são consideradas na pontuação para determinação do concreto de maior desempenho. Utilizando este critério é possível observar que o concreto **B** apresenta a maior pontuação (39 pontos), resultando no concreto com melhor desempenho.

A segunda colocação foi alcançada pelo **C** (35 pontos), e em último lugar está o material **A** (21 pontos).

É importante lembrar que esta classificação se relaciona apenas aos aspectos de preparação, bombeamento e projeção. Uma avaliação completa do concreto necessitaria, adicionalmente, de testes como choque térmico, resistência a oxidação, ataque por escória, erosão e módulo de ruptura a quente.

## CONCLUSÕES

A crescente automação na aplicação de concretos refratários deve-se ao entendimento simultâneo das solicitações da técnica de instalação e da natureza reológica destes materiais. Contudo, procedimentos convencionais de análise como o ensaio de consistência ou testes pós-cura são insuficientes para avaliar todas as solicitações que os concretos são submetidos durante o bombeamento e a projeção.

Com o emprego de formulações comerciais, neste trabalho foi possível consolidar a técnica multi-estágios como ferramenta de caracterização e desenvolvimento de concretos refratários. Adicionalmente, constatou-se sua confiabilidade e eficiência na classificação de desempenho granulométrico e reológico de concretos refratários.

Quando um concreto é submetido aos protocolos classificatórios propostos neste trabalho, os quais consideram a somatória de todas as características, tanto granulométricas quanto reológicas, e ele culmina na melhor classificação frente aos outros avaliados, é um forte indicativo que as características práticas também serão superiores.

## AGRADECIMENTOS

Ao PIBIC/CNPq pelo suporte oferecido e às empresas que fornecem os materiais para o testes.

## REFERÊNCIAS

- [1] H. Jansen, Refractories for the production of steel, CN-Refractories, Germany, **6** (1999) 15-19.
- [2] R. Krebs, State of the art of the standardization of unshaped refractories in Europe, CN-Refractories, Germany, **6** (1999) 72-76.
- [3] C. E. Semler, Global trends and issues in refractories, CN-Refractories, Germany, **6** (1999) 78-79.
- [4] W. E. Lee, R. E. Moore, Evolution of in situ refractories in the 20<sup>th</sup> century, J. Am. Ceram. Soc. **81**, (1998) 1385-1410.
- [5] E. Yauhiro, T. Nobuyuki, K. Watanabe, Development of accelerators for refractory gunning mix, Proc. UNITECR'99 (Unified International Conference on Refractories), Germany, (1999) 102-104.
- [6] I. R. Oliveira, A. R. Studart, R. G. Pileggi, V. C. Pandolfelli, "Dispersão e empacotamento de partículas: princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico", Fazenda Arte Editorial (2000) 224 p.
- [7] R. G. Pileggi, A. R. Studart, J. Gallo, V. C. Pandolfelli, How mixing affects the rheology of refractory castables. Part 2, Am. Ceram. Soc. Bull. **80** (2001) 38-42.
- [8] I. L. Glassgol, Refractory shotcrete - the current state of art, Shotcrete Mag. (2002) 24-32.
- [9] R. G. Pileggi, Y. A. Marques, D. Vasques Filho, A. R. Studart, V. C. Pandolfelli, Wet-shotcrete for refractory castables, Am. Ceram. Soc. Bull. **81** (2002) 51-56.
- [10] P. Rütther, Refractory Materials in blast furnace plants, CN-Refractories, Germany, **6** (1999) 6-12.
- [11] R. G. Pileggi, A. R. Studart, M. D. M. Innocentini, V. C. Pandolfelli, High performance refractory castables, Am. Ceram. Soc. Bull. **81** (2002) 37-42.
- [12] R. G. Pileggi, F. T. Ramal, A. E. Paiva, V. C. Pandolfelli, High performance refractory castables: particle size design, Refractories Applications and News **8** (2003) 17-21.
- [13] K. Watanabe, M. Ishikawa, M. Wakamatsu, Rheology of castables refractories, Taikabutsu Overseas **9** (1989) 41-53.
- [14] R. G. Pileggi, A. R. Studart, J. Gallo, V. C. Pandolfelli, How mixing affects the rheology of refractory castables. Part 1, Am. Ceram. Soc. Bull. **80** (2001) 27-32.
- [15] A. K. Duarte, A. A. Torres, R. Travassos, P. R. H. M. Bittencourt, The Brazilian refractory industry: a market review, CN-Refractories, Germany, **6** (1999) 87-89.
- [16] A. R. Studart, R. G. Pileggi, J. Gallo, V. C. Pandolfelli, High alumina multifunctional refractories castables, Am. Ceram. Soc. Bull. **80** (2001) 34-40.
- [17] R. G. Pileggi, Y. A. Marques, D. Vasques Filho, V. C. Pandolfelli, Shotcrete performance of refractory castables, Refractories Applications and News **8** (2003) 15-19.
- [18] R. G. Pileggi, V. C. Pandolfelli, Rheology and particle-size distribution of pumpable refractory castables, Am. Ceram. Soc. Bull. **80** (2001) 52-57.
- [19] N. E. Bunt, Advanced techniques for measuring rheology of cement-based refractories, Am. Ceram. Soc. Bull. **73** (1994) 81-84.
- [20] R. G. Pileggi, A. E. Paiva, J. Gallo, V. C. Pandolfelli, Novel rheometer for refractory castables, Am. Ceram. Soc. Bull. **79** (2000) 54-58.

(Rec. 18/12/2006, Ac. 11/05/2007)