

Caracterização reológica de concretos refratários bombeáveis

(Rheological characterization of pumpable refractory castables)

R. G. Pileggi¹, A. R. Studart¹, C. Pagliosa Neto², V. C. Pandolfelli¹

¹Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa

Universidade Federal de S. Carlos – UFSCar

Rod. Washington Luiz, km 235, S. Carlos, SP, 13565-905

tel: 0XX-16-260-8250 ramal 2067, fax: 0XX-16-261-5404

prgp@iris.ufscar.br, vicpando@power.ufscar.br

²Cerâmica Saffran S.A., Betim, MG

Resumo

A evolução tecnológica dos concretos refratários tem propiciado materiais que aliam elevado desempenho a comportamentos reológicos distintos, permitindo que sejam moldados conforme as diferentes técnicas de aplicação existentes. Atualmente, são comuns os concretos para bombeamento, para projeção, os auto-escoantes, além dos tradicionais vibráveis. Entretanto, apesar do acentuado grau de evolução tecnológica alcançado por estes materiais, sua caracterização reológica tem sido usualmente restrita ao tradicional e limitado ensaio de fluidez, incapaz de adequadamente distinguir as características dos concretos de diferentes classes. Neste trabalho será apresentada a caracterização reológica de um concreto refratário bombeável, auto-escoante, com baixo teor de cimento, realizada em um reômetro especialmente desenvolvido para estas avaliações. Foram verificadas influências de fatores como o teor de água e a hidratação do cimento na reologia do concreto, tanto em função do tempo como sob aplicação de altas taxas de cisalhamento (simulação do bombeamento). Os resultados obtidos atestam a acentuada eficiência do reômetro como ferramenta para projeto da composição e detecção dos diversos fenômenos que ocorrem nos concretos.

Palavras-chave: concreto bombeável, reômetro, reologia, refratário, cimento.

Abstract

The technological evolution of refractory castables generated novel materials associating high performance with distinct rheological behavior. Nowadays, a large variety of castables are available, including pumpable, shotcreting, self-flowing and vibrated compositions. However, despite the high technology involved in these materials, their rheological characterization has been restricted to the limited measurement of flow value, which is unable to properly distinguish the different classes of castables. The present work presents the rheological characterization of a pumpable self-flow refractory castable carried out by a rheometer specially developed for this kind of material. The influence of the water content and cement hydration on castable rheology was evaluated as a function of time and shear history, in order to simulate pumping conditions. The results show the importance of the rheometer as a tool for the design and analysis of the rheological behavior of refractory castables.

Keywords: pumpable castable, rheometer rheology, refractory, cement.

INTRODUÇÃO

A constante evolução tecnológica na indústria de refratários tem gerado, além de produtos com superior desempenho, materiais que possam ser aplicados de maneira simples, eficiente e econômica.

Como resultado dessa tendência, tem-se observado um crescimento em importância e na utilização dos concretos refratários. Isto porque, além de apresentarem uma acentuada evolução em seu desempenho, os concretos possuem grande versatilidade de aplicação por serem moldados no estado fluido.

O controle das variáveis que afetam o comportamento reológico

dos concretos permite determinar suas características de aplicação. Dependendo da composição e do teor de água, os concretos podem ser moldados por técnicas que envolvam vibração de alta energia ou até mesmo se comportarem como fluidos auto-escoantes que preenchem os moldes por ação do próprio peso.

Entretanto, a aplicação dos concretos não envolve apenas sua moldagem, mas também a forma de transporte do material até o local onde será aplicado. Diversas técnicas com este fim podem ser citadas, como por exemplo, o transporte manual, a projeção, o vertimento e o bombeamento.

A técnica de bombeamento tem crescido em importância

tecnológica na aplicação de concretos devido principalmente à possibilidade de se moldar peças que se encontram distantes do local de mistura, de maneira rápida, eficiente, sem desperdícios e com menor custo. Neste processo, o concreto é bombeado a altas taxas de cisalhamento através de uma tubulação, diretamente do misturador até o local de aplicação.

Todavia, para que as vantagens tecnológicas do bombeamento sejam exploradas de maneira ótima, é necessário que o comportamento reológico e as características de endurecimento (tempo de pega) do concreto sejam compatíveis com o processo.

Tradicionalmente, assume-se que apenas concretos com alta fluidez sejam bombeáveis. Contudo, este conceito não é totalmente adequado, uma vez que alguns fatores que influenciam o processo de bombeamento, não são mensuráveis pela fluidez, como por exemplo, a tendência à segregação que uma massa pode apresentar durante o bombeamento [1], por possuir uma elevada fluidez decorrente de um excesso de água. Adicionalmente, um concreto pode ser dilatante em taxas de cisalhamento elevadas independentemente de seu nível de fluidez, ou ao contrário, uma massa pseudoplástica pode ter uma fluidez baixa, mas capaz de fluir com facilidade sob cisalhamento.

Portanto, pode-se fazer uma distinção entre o nível de fluidez de um concreto, o qual ditará sua característica de moldagem (vibrável até auto-escoante), e seu comportamento reológico, que será responsável por sua técnica de aplicação, definindo se o mesmo é, por exemplo, indicado para bombeamento.

A concepção reológica de um concreto bombeável inicia-se com a necessidade do material apresentar um comportamento pseudoplástico e/ou tixotrópico [2]. Desta maneira, quanto maior for o cisalhamento aplicado durante o bombeamento, menor sua resistência ao escoamento.

Além do comportamento reológico adequado, um concreto bombeável deve ser homogêneo e coeso para que o bombeamento ocorra de maneira uniforme. Na hipótese da massa possuir excesso de água, sua matriz apresentará baixa viscosidade e será incapaz de suportar os agregados durante o cisalhamento. Desta forma, haverá perda de coesão no bombeamento e apenas a matriz será transportada, deixando os agregados em repouso na tubulação. No entanto, caso o concreto não possua água suficiente para formar uma massa coesa, ou que o teor de agregados seja elevado, dificultando a coesão em qualquer teor de água, o bombeamento é dificultado pela ausência de um veículo de transporte (matriz) para estas partículas maiores.

Outro fator a ser considerado em uma massa para bombeamento está relacionado à velocidade em que ocorrem as reações de hidratação do cimento, as quais determinam a trabalhabilidade do concreto. No caso de um endurecimento rápido, o transporte do material em uma tubulação fica limitado, aumentando o risco de entupimento.

O tempo de pega possui ainda correlação com uma outra característica destes materiais, que é a tendência de aquecimento da massa quando submetida a um alto cisalhamento. Nesta condição, a fricção entre as partículas é extrema provocando aquecimento no concreto e por consequência acelerando o seu endurecimento.

A discussão até aqui apresentada, permite concluir que o desenvolvimento de um concreto bombeável requer uma criteriosa caracterização de suas propriedades reológicas, assim como o seu tempo de pega e a tendência ao aquecimento, que também influenciam sua reologia.

Para tanto, apresenta-se neste trabalho os resultados da caracterização reológica de um concreto refratário auto-escoante bombeável, realizada com auxílio de um reômetro para concretos [3]. Tal equipamento permite simular o bombeamento, uma vez que, além de avaliar a relação entre as forças (torque) necessárias para cisalhar o concreto em diferentes condições, acompanha as variações pH e temperatura que ocorrem durante este cisalhamento.

EXPERIMENTAL

O estudo do comportamento reológico foi realizado em um concreto refratário ($\approx 70\%$ Al_2O_3) bombeável auto-escoante, de baixo teor de cimento (4% em peso), produzido pela indústria Cerâmica Saffran S.A.

As caracterizações reológicas foram efetuadas no reômetro para concretos desenvolvido pelo Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais (GEMM) da Universidade Federal de São Carlos e a Alcoa Alumínio S. A. [3].

O processamento dos concretos se deu de maneira convencional, sendo que sua mistura ocorreu no próprio reômetro, permitindo que fossem controlados, a energia e o tempo envolvidos nesta etapa [4].

Os ensaios reológicos foram realizados nas composições previamente misturadas com teores de água distintos (5,2; 5,45; 5,7; 6,2 e 6,7% em peso), sendo subdivididos em duas categorias:

Ensaios Cíclicos

Os concretos foram submetidos a diversos ciclos sucessivos de rotação (rotação variando entre 17 e 127 rpm) em função do tempo, sendo o intervalo entre os mesmos de 15 minutos. Imediatamente após cada ciclo, a rotação do reômetro foi temporariamente reduzida a zero, para que se efetuasse a medida da fluidez de cada composição, segundo a norma ASTM C-860 adaptada para concretos auto-escoantes. Foram assim obtidos, os comportamentos das massas frente a altas taxas de cisalhamento, e a mudança na fluidez à medida que o processo de endurecimento ocorria. Também foram acompanhados a variação de pH e temperatura em cada composição.

Ensaios Contínuos

Neste tipo de ensaio, os concretos, processados em teores de água diversos, foram submetidos a uma rotação constante (28 rpm) por um período longo, definido pelo tempo de pega de cada massa. O resultado obtido fornece o perfil de endurecimento do concreto ao longo do tempo, podendo-se identificar sua velocidade de reação, e/ou a presença de comportamentos anômalos anteriores à pega.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios cíclicos são apresentados na Fig. 1. A Fig. 1a contém as curvas de torque em função da rotação (ciclos de histerese) para o concreto processado com 5,7% peso de água, realizadas em ciclos sucessivos com intervalos de 15 minutos. A Fig. 1b apresenta os resultados do primeiro ciclo de histerese para os diversos teores de água.

A Fig. 1a ressalta o efeito dos ciclos sucessivos sobre o comportamento reológico do concreto. Os resultados mostram que o

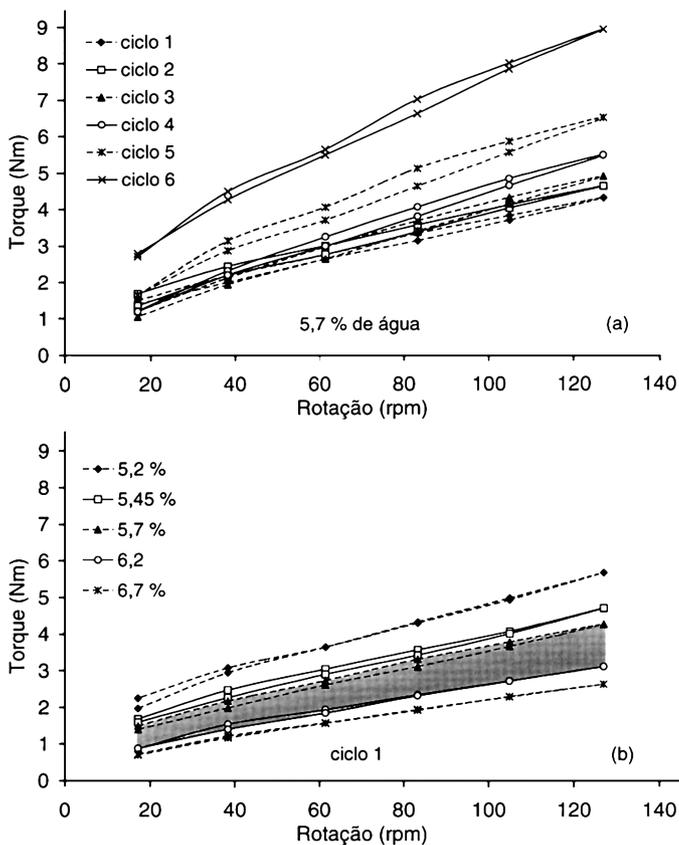


Figura 1: Ciclos de histerese (entre 17 e 127 rpm): (a) seqüência de ciclos repetidos em intervalos de 15 minutos para o concreto com 5,7% em peso de água; (b) ciclos iniciais para os concretos processados nos diversos teores de água (5,2; 5,45; 5,7; 6,2 e 6,7% em peso).

[Figure 1: Hysteresis cycles (range: 17 - 127 rpm): (a) successive cycles applied at 15 minutes intervals (water content = 5.7 - wt%); (b) primary cycles for the castables with different water content (5.2, 5.45, 5.7, 6.2 and 6.7 - wt%).]

material sempre apresenta um comportamento tixotrópico com pequenas áreas de histerese, podendo ser definido como pseudoplástico. Independentemente do tempo decorrido até o ensaio este comportamento se mantém, elevando apenas o torque necessário para manutenção de uma rotação (efeito da pega). Este comportamento é adequado para uma massa bombeável, pois indica que o material encontra-se disperso e que se a aplicação ocorrer após um intervalo de tempo relativamente longo em relação a mistura, o bombeamento continua reologicamente possível, desde que a bomba possua potência compatível.

O efeito do teor de água sobre a reologia do concreto é ilustrado na Fig. 1b. Observa-se que o aumento da quantidade de água provoca a redução nos níveis de torque para uma mesma rotação sem alterar o caráter pseudoplástico das composições. Contudo, para os teores mais elevados de água, os valores de torque para uma determinada rotação são tão baixos, que esta excessiva facilidade de movimentação entre as partículas do material pode ocasionar segregação durante o bombeamento pela perda de coesão no material.

Na prática, o concreto estudado é bombeado com o mínimo de 5,7% de água, uma vez que teores inferiores demandam a potência limite das bombas e o máximo de 6,2% de água para que não ocorra a segregação. Estabelece-se assim uma região ótima (em cinza

na Fig. 1b) na relação entre torque e rotação que permite o bombeamento adequado. Tal região permite concluir, por exemplo, que o concreto com teor de 5,7% de água deveria ser bombeado rapidamente, pois atinge com maior velocidade (já no segundo ciclo) níveis de torque acima da região ótima. Em contrapartida, o concreto com 6,2% possui um maior tempo de trabalho dentro da faixa ótima.

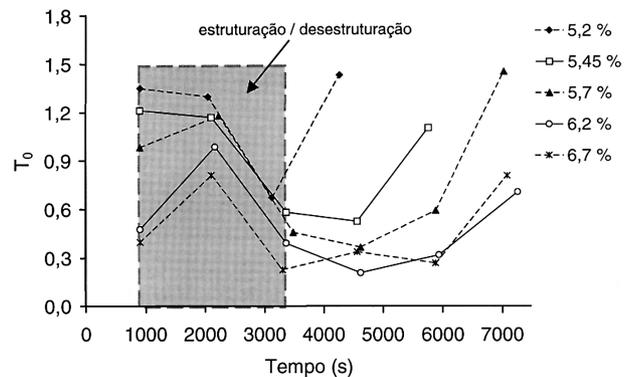


Figura 2: Valores de torque para rotação igual (T_0) a zero para as composições processadas com diferentes teores de água e em função do tempo.

[Figure 2: Torque values (T_0) at zero rpm rotation speed measured along the time for castables with different water content.]

A Fig. 2 apresenta os valores de torque para a rotação igual a zero (T_0) para as composições processadas nos diferentes teores de água e em função do tempo. Estes valores foram obtidos por extrapolação a partir dos resultados dos ensaios cíclicos de torque versus rotação.

A medida do torque na rotação zero é um indicativo do grau de estruturação que ocorre no material, conceito equivalente ao da tensão de escoamento em uma suspensão. Como se verifica na Fig. 2, as composições com maior teor de água (5,7 a 6,7%) apresentam primeiro um aumento em T_0 , seguido de uma grande redução em seu valor, para posteriormente aumentar em definitivo. As composições com menor teor de água (5,2 e 5,45%), se diferenciam quanto ao nível inicial de T_0 , que é bastante elevado e mantêm-se praticamente constante no período inicial. A variação de T_0 indica por-

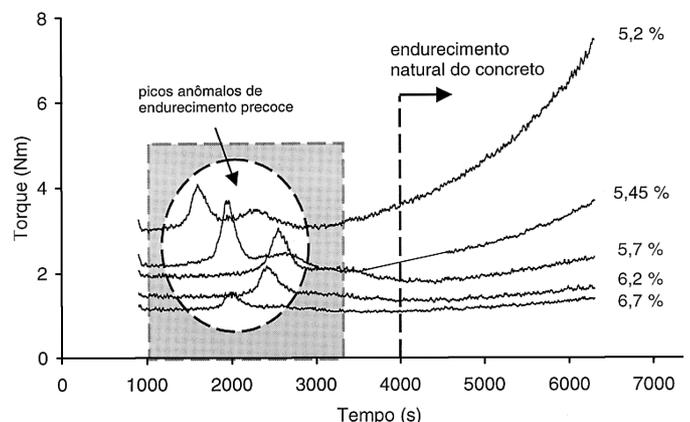


Figura 3: Curvas de torque em função do tempo para composições processadas em diversos teores de água (5,2; 5,45; 5,7; 6,2 e 6,7% em peso). A rotação foi mantida constante e igual a 28 rpm.

[Figure 3: Torque values measured along the time at constant rotation speed (28 rpm) for castables with different water content (5.2, 5.45, 5.7, 6.2 and 6.7 - wt%).]

tanto, que estes concretos apresentam nos instantes iniciais uma tendência à estruturação, para posteriormente desestruturarem-se, conforme destacado na região em destaque.

O mesmo comportamento é verificado nas curvas de torque em função do tempo sob rotação constante (28 rpm), para as composições processadas com diferentes teores de água (Fig. 3). As curvas iniciam-se exatamente após o término da etapa de mistura.

As curvas de torque, independentemente do teor de água, apresentam um pico anômalo de endurecimento precoce em torno de 30 a 40 minutos após a mistura, mas que rapidamente se dissipa (Fig. 3), comprovando a tendência inicial de estruturação / desestruturação do material que ocorre neste período, conforme verificado na Fig. 2. Somente após este fenômeno é que o processo de endurecimento ocorre de maneira natural. Além disso, imediatamente após os picos, os níveis de torque são os menores em todo o tempo de trabalho dos concretos. Convém ressaltar que picos semelhantes de endurecimento precoce também foram identificados por Yang e Jennings [6].

Pode-se observar ainda que o aumento no teor de água reduz o torque necessário para a movimentação do concreto. Além disso, esse aumento na água provoca a extensão do tempo de pega. A composição com 6,2% de água manteve praticamente constante o nível de torque no intervalo de aproximadamente 1,5 hora, enquanto que com 5,2% o endurecimento se manifestou em menos de 1 hora.

O comportamento esperado para os valores de fluidez dos concretos deve apresentar tendência exatamente oposta à observada para T_0 . Ou seja, quanto maior for T_0 , maior o grau de estruturação do material e menor deve ser a fluidez. Por outro lado, quanto menor for T_0 , menor a estruturação e maior a fluidez. De fato, este é o comportamento verificado na Fig. 4, a qual apresenta os valores de fluidez para os diversos teores de água e em função do tempo.

Um concreto auto-escoante é caracterizado por apresentar fluência livre entre 80% e 110% [5]. Abaixo de 80%, o concreto é vibrável e acima de 110% tende a segregar. A composição estudada atingiu níveis de fluidez na faixa de valores dos concretos auto-escoante em teores de água entre 5,7% e 6,2%. No entanto, devido à ocorrência dos picos de endurecimento, tal fluidez somente ocorreu após 75 minutos (4500 s).

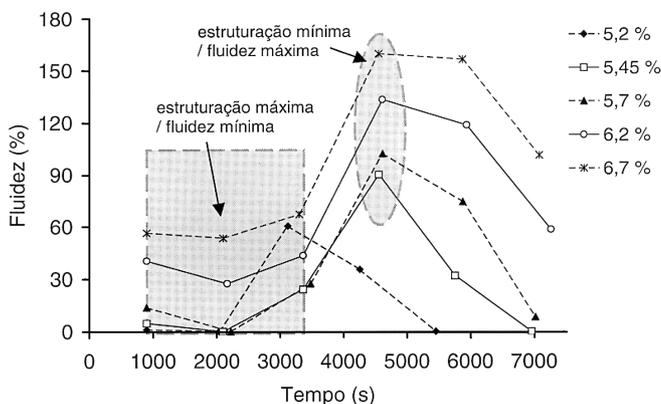


Figura 4: Variação da fluidez (free-flow) em função do tempo para os concretos processados nos diversos teores de água.
[Figure 4: Flow value (free-flow) measured along the time for castables with different water content.]

Uma vez que esta é a mesma faixa de água indicada para o bombeamento, conforme apresentado na Fig. 1b, pode-se afirmar que nestes teores de água, o concreto estudado é tanto bombeável, como auto-escoante.

Entretanto, o perfil de variação de fluidez ao longo do tempo pode ter implicações tecnológicas na aplicação deste concreto. Se o mesmo for bombeado antes que ocorra a queda inicial de fluidez representada pelo pico de torque, este aumento de resistência pode ocorrer dentro da tubulação. Tal fato pode, inclusive, bloquear o fluxo de concreto, caso o nível deste endurecimento preliminar seja elevado.

Assim, este material, que aparentemente possui as características necessárias para um bombeável, pode ser considerado não adequado, caso seja aplicado antes do período de transição inicial. Ou seja, o concreto somente poderia ser aplicado 30 a 40 minutos após ser misturado, que é um tempo relativamente longo dependendo da quantidade de concreto a ser aplicada.

Para entender a razão deste endurecimento inicial, são apresentadas na Fig. 5 as curvas de variação de pH em função do tempo para os concretos processados com diversos teores de água.

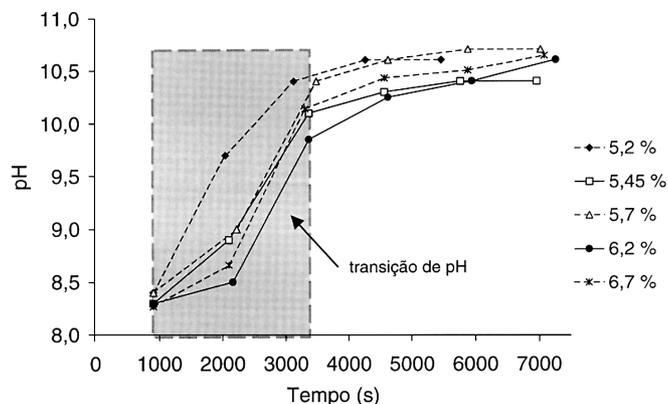


Figura 5: Curvas de pH em função do tempo para os concretos processados nos diversos teores de água.

[Figure 5: pH measurements along the time for castables with different water content.]

O comportamento do pH em função do tempo é similar e independente do teor de água no concreto, conforme se observa na Fig. 5. Inicialmente, logo após a mistura, o pH situa-se em torno de 8,2. Ocorre então uma rápida elevação em seu valor, atingindo um patamar próximo na faixa de 10,3 a 10,7.

Comparando o período de tempo em que ocorre esta transição de pH (região em cinza na Fig. 5), observa-se que é o mesmo em que ocorrem a estruturação do material (Fig. 2), o endurecimento precoce (Fig. 3) e a redução da fluidez (Fig. 4). Surge então a hipótese de que estes fenômenos estejam relacionados.

O pH inicial na faixa de 8,2 está diretamente relacionado com a natureza das matérias-primas presentes no concreto. À medida que o cimento (aluminato de cálcio) se dissolve, ocorre a liberação de íons que elevam o pH, até que atinja o equilíbrio em torno do pH 10,7. Em ambos extremos (pH = 8,2 ou pH = 10,7) o material encontra-se disperso. Contudo, durante a elevação do pH, entre 8,5 e 9,5, é possível que ocorra a floculação temporária da massa. Embora a análise das cargas superficiais das matérias-primas em fun-

ção do pH não tenha sido efetuada neste trabalho, a razão para esse comportamento pode estar vinculada, por exemplo, à presença do ponto isoelétrico do material nesta região de pH.

Entretanto, é o objetivo de um outro trabalho dos autores entender exatamente o que ocorre nesta transição. Neste propõe-se uma alternativa para corrigir este problema. Para tanto, o caminho adotado foi elevar o pH do concreto acima de 9,5 através, por exemplo, da adição de uma base (KOH). Desta maneira o material sempre estaria na faixa ideal de pH e portanto não se esperaria que ocorresse o seu endurecimento precoce. As Figs. 6 e 7 apresentam, respectivamente, as curvas de torque e pH em função do tempo, para uma composição processada com 6,2% de água.

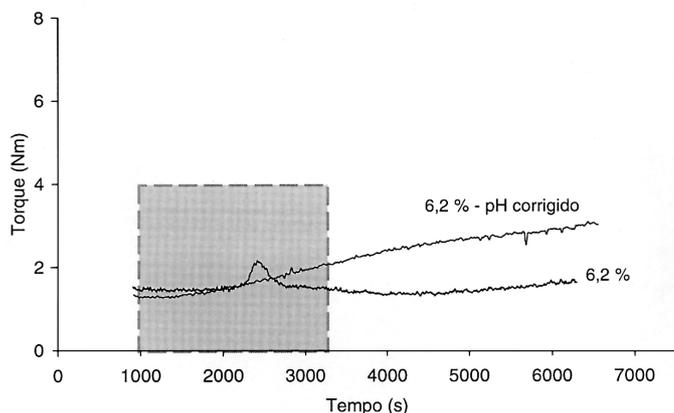


Figura 6: Curva de torque em função do tempo para composição (6,2% em peso de água) na qual o pH inicial foi elevado acima de 9,5, comparada com curvas do material original (6,2% água). A rotação foi mantida constante em 28 rpm para todos os testes.

[Figure 6 – Comparative torque values between the castable (water content 6.2 – wt%) with high initial pH (>9.5) and the original one (rotation speed = 28 rpm).]

Estes resultados confirmam a hipótese de que a transição de pH é responsável pelo pico de endurecimento inicial dos concretos. Além disso, ficou mostrado que a proposta de forçar a elevação de pH foi eficaz para solucionar o problema. Através desta correção, o concreto bombeável ficou isento de qualquer problema que inviabilize sua aplicação, apresentando ainda uma trabalhabilidade de aproximadamente 1 hora, apesar da correção do pH inicial ter antecipado seu endurecimento.

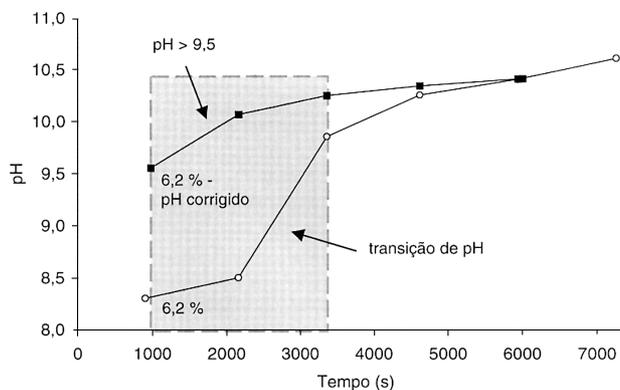


Figura 7: Variação do pH em função do tempo para composição na qual o pH inicial foi elevado acima de 9,5, comparada com a curva original do material. obs: teor de água - 6,2% em peso.

[Figure 7: Comparative pH curves between the castable (water content 6.2 – wt%) with high initial pH (> 9.5) and the original one.]

Finalmente, os concretos não apresentaram, nos teores de água adequados ao bombeamento (5,7 a 6,2%), aquecimento significativo (< 3 °C). Sendo assim, a tendência das massas endurecerem dentro da tubulação por aceleração da pega induzida por calor é mínima.

CONCLUSÕES

O conjunto de resultados apresentado no trabalho permite concluir que o reômetro para concretos utilizado é uma máquina bastante eficaz para caracterização reológica de concretos. Estudos aprofundados do comportamento destes materiais podem ser efetuados neste equipamento, resultando no desenvolvimento sistemático de concretos para diversas aplicações, como o caso do bombeável avaliado.

O concreto bombeável caracterizado apresentou comportamento compatível com o que se requer de um material desta classe, além de apresentar-se como auto-escoante.

Entretanto, em sua forma original, o concreto apresentou um problema de endurecimento precoce, o que comprometeria sua aplicação para situações que requerem alta trabalhabilidade. A causa identificada para este comportamento foi a transição entre o baixo valor de pH inicial (8,2), para o superior valor de equilíbrio (10,7). A solução encontrada foi a elevação do pH inicial (>9,5) logo após a mistura, resultando na total eliminação do pico de endurecimento.

O teor de água utilizado na prática para o bombeamento, entre 5,7 e 6,2%, mostrou-se também o mais indicado pelos estudos reológicos. Nesta faixa, o material apresenta-se pseudoplástico, não segregável (coeso), com tempo de pega adequado (\approx 1,5 hora), além de apresentar características auto-escoantes e não manifestar aquecimento excessivo durante o cisalhamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, ao CNPq e a Cerâmica SAFFRAN S.A. pelo apoio a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Sari, E. Prat, J. F. Labastire, Cement Concrete Res. **29**, 6 (1999) 813-818.
- [2] R. G. Pileggi, V. C. Pandolfelli, Ceramic News – Special South America **1** (1999) 6-13.
- [3] R. G. Pileggi, A. E. Paiva, J. Gallo, V. C. Pandolfelli, Am. Ceram. Soc. Bull. **79**, 1 (2000) 54-58.
- [4] R. G. Pileggi, A. R. Studart, V. C. Pandolfelli, “Correlação entre a mistura e o comportamento reológico de concretos refratários”, trabalho submetido aos anais do 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2000.
- [5] P. Bonadia, A. R. Studart, R. G. Pileggi, S. L. Vendrasco, V. C. Pandolfelli, Am. Ceram. Soc. Bull. **78**, 3 (1999) 57-60.
- [6] M. Yang, H. M. Jennings, Adv. Cem. Based Mater. **2**, 2 (1995) 70-78.

(Rec. 15/06/00, Rev. 09/11/00, Ac. 10.11.00)