

Reologia e distribuição granulométrica de concretos refratários bombeáveis (*Rheology and particle size distribution of pumpable refractory castables*)

R. G. Pileggi, V. C. Pandolfelli

Departamento de Engenharia de Materiais - DEMa
Universidade Federal de S. Carlos - UFSCar
Rod. Washington Luiz, km 235, CP 676, 13565-905, S. Carlos, SP
prgp@iris.ufscar.br; vicpando@power.ufscar.br

Resumo

Bombeamento é o processo no qual o concreto é transportado através de tubulações, diretamente do local de mistura até o de moldagem a elevadas taxas de cisalhamento. Convencionalmente assume-se que concretos fluidos são os mais indicados para este tipo de aplicação. Contudo, esta afirmação não é necessariamente verdadeira, visto que estudos sistemáticos do comportamento reológico de concretos bombeáveis não são comuns em literatura. Além disso, as técnicas de caracterização reológica convencionais são incapazes de simular o material na condição de bombeamento, quando o mesmo está submetido a elevadas taxas de cisalhamento e a uma acentuada restrição volumétrica. Assim, este trabalho tem como objetivo utilizar uma nova técnica para caracterização reológica de concretos bombeáveis, a qual simula, utilizando um reômetro acoplado a um câmara de ensaios com restrição de volume, o fluxo do concreto dentro da tubulação. Adicionalmente, o trabalho também descreve a avaliação do comportamento reológico e do aquecimento de distribuições granulométricas distintas, baseadas no modelo de Andreasen com coeficientes de distribuição $q = 0,21$, $0,26$ e $0,31$, identificando a que melhor se comporta durante o bombeamento, em comparação com uma composição bombeável comercial. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência da técnica desenvolvida na simulação das condições de bombeamento e indicaram a composição, formulada de acordo com o coeficiente $q = 0,26$, como a mais adequada ao bombeamento.

Palavras-chave: concreto, bombeamento, reômetro, refratários.

Abstract

The growing demand for automatically transported refractory castables has stimulated the use of pumpable castables, which are usually specified as high fluidity compositions. However, this specification cannot be accepted as complete, since systematic studies are not commonly observed in the literature. Furthermore, the traditional techniques for rheological evaluation, which are based on flow measurements, cannot simulate the flow conditions of castables inside transporting pipes. Therefore, this work describes a new technique for the rheological characterization of pumpable castables, which is based on a rheometer for refractory castables combined with a device that simulates the flow conditions during the materials transportation. In addition, castables with distinct particle size distributions were rheologically evaluated based on this new technique. The results proved the high efficiency of this new method of rheological characterization, and the castable based on Andreasen's model, formulated using the distribution coefficient $q = 0.26$, was found to be the most suitable one for pumping.

Keywords: castable, pumping, rheometer, refractory.

INTRODUÇÃO

Bombeamento [1] é o processo no qual o concreto é transportado, através de uma tubulação (metálica ou de borracha), diretamente do misturador para o local de moldagem, resultando na redução do desperdício de material e do custo de mão-de-obra para aplicação.

Contudo, a natureza heterogênea dos concretos [2, 3], decorrente de sua grande extensão granulométrica (partículas na faixa de $0,1$ a $8000 \mu\text{m}$), torna o bombeamento um processo complexo que envolve forças de naturezas distintas.

Partículas menores que $100 \mu\text{m}$, as quais em conjunto com a água constituem a matriz do concreto, são predominantemente susceptíveis à ação de forças de superfície. Por sua vez, as partículas maiores que $100 \mu\text{m}$ (agregados) manifestam com maior intensidade os efeitos das forças de natureza mássica.

A coexistência de partículas em ambos os domínios de forças resulta no conceito que estes materiais possuem natureza bifásica [2, 3]. Assim, um concreto pode ser definido como um material cujas propriedades são determinadas pela interação do conjunto de grãos grossos imersos na matriz fluida.

Características Reológicas dos Concretos Bombeáveis

O processo de bombeamento subdivide-se em três etapas distintas: a) mistura; b) transporte e c) moldagem.

MISTURA

Na primeira etapa do bombeamento ocorre a mistura do concreto com a água, e os esforços aplicados determinarão o grau de homogeneidade, o estado de dispersão, a história de cisalhamento

e o aquecimento inicial do material [4].

Quanto maior a energia de mistura fornecida a uma composição, maior também a dissipação de calor, gerando aquecimento indesejável ao concreto, o qual pode resultar numa redução do tempo de pega e/ou no aumento da força necessária para o bombeamento.

Geralmente, elevados esforços de mistura ocorrem quando a composição possui elevado teor de finos (elevada área superficial) [4] e/ou seu comportamento reológico apresenta dilatância.

TRANSPORTE

Após a mistura, o material é pressionado a fluir, em escoamento turbulento, no interior de uma tubulação, sendo submetido a esforços de cisalhamento intensos dentro de um volume restrito.

Assim, a concepção reológica de um concreto bombeável inicia-se com a necessidade do material apresentar comportamento pseudoplástico e/ou tixotrópico [1], que provocam a redução da resistência ao fluxo com o aumento do cisalhamento e ao longo do tempo.

Conceitualmente, a obtenção destes comportamentos está associada à presença de partículas ultra-finas ($< 1 \mu\text{m}$) na matriz [2, 3]. Nestas, a ação das forças de superfície influenciam tanto a movimentação, como as interações entre as partículas.

Entretanto, devido à natureza bifásica dos concretos, a contribuição da presença dos agregados deve ser considerada no comportamento dos concretos. Quanto maior o teor destas partículas grosseiras, menor a pseudoplasticidade e/ou tixotropia da composição [2, 3], uma vez que nesta condição as forças mássicas (fricção, colisão elástica, etc.), que aumentam com o tamanho da partícula, são predominantes.

Além do adequado comportamento reológico, um concreto bombeável também deve ser coeso e homogêneo (não segregável) durante o bombeamento [1, 5]. A manutenção da integridade volumétrica (coesão) de um concreto no estado fluido depende fundamentalmente da ação das forças de superfície, que atuam nas partículas da matriz. Quanto menor o teor de matriz no concreto, maior a facilidade com que este se desagrega.

A maior densidade dos agregados (sólido) em relação à matriz (suspensão sólido + água), é um outro fator que induz a uma tendência natural de segregação [5] durante o transporte. No entanto, alguns artifícios podem evitar esta separação de fases.

O primeiro deles é a minimização da diferença de densidade relativa entre a matriz e os agregados, que pode ser obtida pelo aumento da concentração de sólidos na matriz, ou pela utilização de agregados menos densos.

Um outro artifício está relacionado com a cinética do processo de segregação. Quanto menor for a diferença de velocidade entre as fases, menor a tendência destas se separarem durante o transporte [5]. Matrizes com baixa viscosidade, quando submetidas às tensões do bombeamento, são cisalhadas a taxas superiores àquelas verificadas nos agregados, provocando segregação.

Apesar dos aspectos positivos descritos em relação a matrizes viscosas e/ou com elevada concentração de sólidos, excesso de viscosidade resulta em maiores esforços para o transporte do material, provocando a dilatância do concreto. O aumento da viscosidade reduz ainda seu efeito lubrificante da fricção entre agregados e entre os agregados e a superfície interna da tubulação.

Estes fatores são ainda mais acentuados na situação de volume restrito em que o material se encontra no interior da tubulação durante o bombeamento [6]. Nesta condição, todas as interações

originadas pela colisão e por atrito entre as partículas, são intensificadas devido à redução do grau de liberdade para movimentação entre as mesmas.

MOLDAGEM

As características de moldagem do concreto, que constituem a terceira etapa do bombeamento, são consequência das características reológicas intrínsecas do material [2, 3], aliadas ao histórico das etapas anteriores.

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

Contudo, para que estas características se manifestem de maneira adequada é necessário que as etapas de mistura e transporte não provoquem alterações nas características naturais do material.

Caracterização Reológica dos Bombeáveis

Tradicionalmente, a caracterização reológica dos concretos tem sido restrita ao ensaio de fluidez [1, 7], assumindo-se que apenas composições fluidas são bombeáveis. Entretanto, foi recentemente desenvolvido pelo Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais (GEMM) da Universidade Federal de S. Carlos, em parceria com a empresa Alcoa Alumínio S.A., um reômetro [7] específico para caracterização reológica de concretos. Este equipamento permite simular as diversas solicitações que o material é submetido desde a mistura até a aplicação.

No caso específico dos concretos bombeáveis, o equipamento dispõe ainda de um dispositivo inédito que foi desenvolvido para simular a condição de restrição de volume verificada no interior da tubulação durante o transporte do material. Tal acessório pode ser descrito como uma tampa que é inserida dentro da cuba de mistura do reômetro, impedindo que o concreto se expanda durante o cisalhamento.

Os conceitos até aqui apresentados, fornecem uma visão qualitativa da natureza reológica dos concretos bombeáveis. Assim sendo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar, através de ensaios realizados no reômetro para concretos, a influência da distribuição granulométrica, do teor de água, nas propriedades reológicas e no aquecimento dos concretos, durante as três etapas do bombeamento.

Além disso, tais análises também foram realizadas na condição de volume restrito, utilizando-se para isso, o dispositivo desenvolvido para simulação das solicitações a que o concreto é submetido no interior da tubulação de bombeamento.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos objetivos propostos, foram formuladas três composições de concretos zero-cimento [8] ($100\% \text{Al}_2\text{O}_3$) baseadas no modelo de Andreasen [2, 3], com coeficientes de distribuição $q = 0,21, 0,26$ e $0,31$ e com partículas na faixa de $0,1$ a $4750 \mu\text{m}$. As características das composições encontram-se detalhadas na Tabela I.

As formulações foram processadas em teores de água distintos (ver Tabela II), devido à grande influência desta variável nas propriedades da suspensão que compõe a matriz (água + partículas $< 100 \mu\text{m}$), uma vez que, quanto maior seu teor de água, menor sua

Tabela I – Características físicas dos concretos zero-cimento (100% Al_2O_3) formulados: teores de matriz (partículas < 100 μm) e agregados em porcentagem em volume, área superficial volumétrica (VSA) e densidade aparente dos sólidos (D.A.).

[Table I – General features of the zero-cement castable compositions: matrix (< 100 μm) and aggregates (> 100 μm) volumetric content and the volumetric surface area (VSA).]

Características	q		
	0,21	0,26	0,31
% vol.matriz	45	39	31
% vol. agregados	55	61	69
VSA (m^2/cm^3)	7,36	6,73	5,81
D.A. (g/cm^3)	3,93	3,93	3,93

Obs: matriz: aluminas calcinadas A 1000 SG e A 3000 FL (Alcoa); agregados: alumina eletrofundida branca (Alcoa). VSA = Área superficial específica (B.E.T.) x Densidade aparente (picnometria de hélio).

Tabela II – Teores de água empregados no processamento das composições e a concentração volumétrica de sólidos da matriz (ϕ_{matriz}), além das respectivas distâncias médias de separação entre as partículas da matriz [2, 3] (IPS) e dos agregados [3, 9] (MPT).

[Table II – Water content of the castables and its influence on the volumetric concentration of solids in the matrix (ϕ_{matriz}). The mean distances between matrix particles [2, 3] (IPS) and aggregates [3, 9] (MPT) are also shown.]

q	Água (% vol.)	ϕ_{matriz} (% vol.)	IPS (μm)	MPT (μm)
0,21	15	70,0	0,032	0,605
	14	71,6	0,028	0,588
	13	73,3	0,023	0,571
0,26	16	65,3	0,051	0,471
	15	67,0	0,044	0,455
	14	68,8	0,038	0,439
0,31	16	59,6	0,077	0,334
	15	61,4	0,069	0,320
	14	63,3	0,061	0,305

Obs: Matriz = concentração sólidos na suspensão que compões a matriz: água + partículas < 100 μm .

concentração de sólidos, influenciando diretamente seu comportamento reológico.

A mistura dos concretos foi realizada diretamente no reômetro, a uma rotação constante de 33 rpm segundo os procedimentos desenvolvidos por Pileggi e Pandolfelli [4]. Durante a mistura, foram registrados os esforços (torque) e o tempo necessário para a homogeneização do material, além do respectivo aquecimento.

Imediatamente após a mistura, cada composição teve sua fluidez medida segundo a norma ASTM C-860 adaptada para concretos auto-escoantes. Os concretos foram então submetidos a um ciclo

de rotação entre 2 e 75 rpm. Em seguida, as composições foram sujeitas a um segundo ciclo de cisalhamento utilizando-se o dispositivo para volume restrito. Durante os ensaios, a temperatura de cada composição foi avaliada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

MISTURA

A análise dos resultados inicia-se pela avaliação dos esforços realizados durante a mistura das composições $q = 0,21, 0,26$ e $0,31$. A Fig. 1 apresenta suas curvas de mistura, destacando (vide as setas indicativas) os máximos valores de torque obtidos na virada dos concretos.

Estudos, anteriormente realizados [4], demonstram que o ponto de viragem independe do teor de água final das composições, uma vez que cada distribuição granulométrica possui um teor próprio, no qual o material passa do estado particulado para o fluido. Nesta condição, a ação das forças capilares que atuam na superfície de contato entre as partículas é máxima. Assim, quanto maior o teor de matriz ($q = 0,21$), maior a área superficial (Tabela I) e maiores o torque e a energia (área sob a curva torque x tempo) necessários para mistura do concreto.

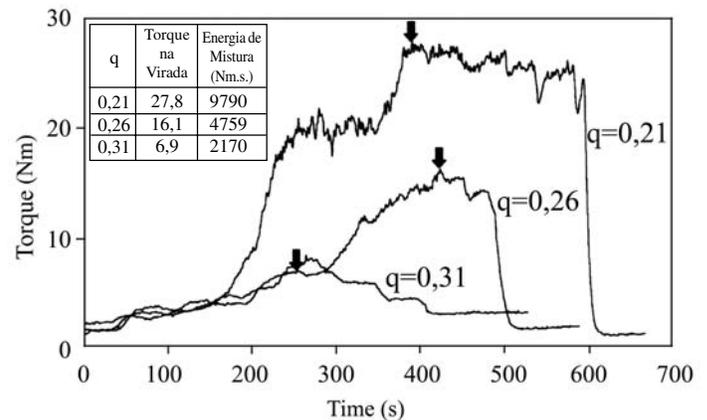


Figura 1: Curvas de mistura das composições formuladas $q = 0,21, 0,26$ e $0,31$. A tabela indica os torques máximos verificados na virada e a energia de mistura estimada pelas áreas sob as curvas.

[Figure 1: Mixing curves for the formulated compositions $q = 0,21, 0,26$ and $0,31$. The table inside the graph describes torque at the turning point (indicated by the arrows) and the mixing energy for each castable.]

FLUIDEZ

Em seqüência ao estudo do comportamento de mistura, as composições foram avaliadas quanto sua fluidez (Fig. 2), sabendo-se que esta propriedade define as características de moldagem do material [2, 3].

A composição com $q = 0,21$, devido ao seu elevado teor de matriz [2, 3], atingiu a faixa de auto-escoabilidade com apenas 13% em volume de água, sendo que, com 15% sua fluidez excessiva indicava tendência à segregação.

O concreto $q = 0,26$ manifestou sua tendência multifuncional [10], apresentando comportamento variável em função do teor de água. Com 14% de água, o material obteve fluidez na faixa dos

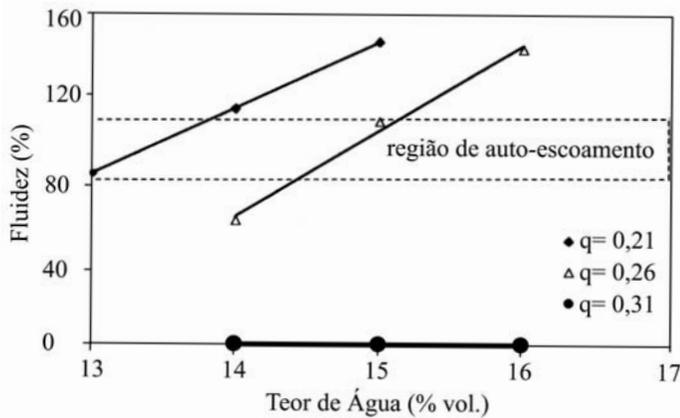


Figura 2: Fluidez das composições avaliadas após a mistura dos concretos em teores distintos de água.

[Figure 2: Flow values measured after mixing castables $q = 0.21, 0.26$ and 0.31 produced with different water contents.]

vibráveis, passando a auto-escoante com 15% e atingindo, com 16%, níveis de fluidez muito elevados e propícios à segregação.

A composição $q = 0,31$, por sua vez, apresentou fluidez zero, independentemente do teor de água. Isto provavelmente decorreu do maior teor de agregados presente nesta formulação [2, 3].

Convencionalmente, tais resultados permitiriam afirmar que as composições $q = 0,21$ e $q = 0,26$ poderiam ser bombeadas nos teores de água em que atingem a auto-escoabilidade [1, 7] (fluidez > 80%).

COMPORTAMENTO REOLÓGICO

A Fig. 3 apresenta as curvas obtidas no reômetro⁽⁷⁾, durante os ensaios de ciclos de cisalhamento aplicados aos concretos com diferentes coeficientes de distribuição e com 14% em volume de água (obs.: o comportamento reológico das composições nos demais teores de água ensaiados é similar, alterando-se apenas os níveis de

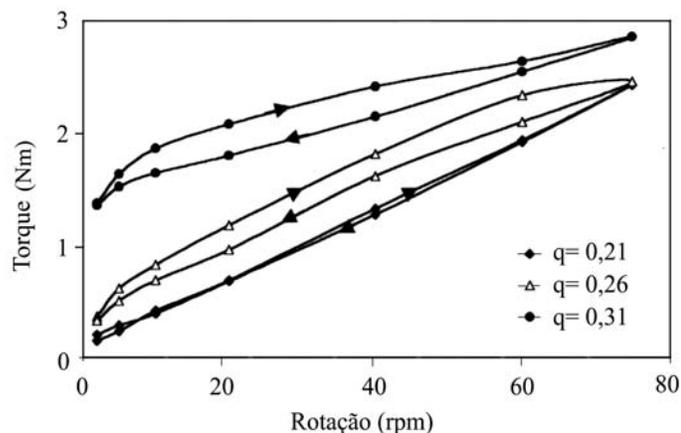


Figura 3: Comportamento reológico dos concretos formulados com $q = 0,21, 0,26$ e $0,31$ (14% em volume de água), quando submetidos a ensaios de cisalhamento cíclico (2 a 75 rpm) sem que o material esteja submetido à restrição de volume. (Obs.: setas indicam sentido de aplicação da rotação.)

[Figure 3: Rheological behavior of the $q = 0.21, 0.26$ and 0.31 (14% vol. of water) castables subjected to shearing cycle experiments (range: from 2 to 75 rpm). Arrows indicate the shearing cycle route.]

esforço. Quanto menor o teor de água, maior o torque para o cisalhamento). As informações obtidas deste ensaio se iniciam com a análise do nível de torque necessário para iniciar o fluxo do material em rotações muito baixas (2 rpm), o qual é diretamente relacionado com a fluidez dos concretos [1, 7]. Como se observa, a composição $q = 0,21$ apresentou um torque de 0,2 Nm e fluidez de 114%, $q = 0,26$ registrou 0,4 Nm e 60% e $q = 0,31$ obteve 1,6 Nm e fluidez nula.

Os resultados mostram também, que $q = 0,21$ apresentou comportamento newtoniano, o qual não é contra indicado ao transporte, enquanto $q = 0,26$ comportou-se como pseudoplástico, sendo indicado ao bombeamento [1]. Finalmente, a composição $q = 0,31$ resultou em elevados valores de torque com dilatância nas rotações mais elevadas.

Contudo, a caracterização reológica dos concretos bombeáveis ainda requer que os ensaios sejam realizados na condição de volume restrito (Fig. 4), simulando o transporte do material no interior da tubulação.

Como se observa, em baixo cisalhamento as composições não apresentaram grande sensibilidade à restrição de volume, mas, à medida em que a rotação se elevou, as composições $q = 0,21$ e $0,31$ apresentaram uma acentuada dilatância, demonstrando não ser adequado ao bombeamento. Já o concreto $q = 0,26$ mostrou-se sempre pouco sensível à restrição de volume.

Estes resultados são ainda mais evidenciados quando analisados em conjunto com os da Fig. 5, na qual se apresenta, em função da rotação de ensaio, a diferença absoluta entre os níveis de torque verificados nos ciclos de cisalhamento com volume restrito e na ausência de restrição.

No sistema $q = 0,21$ (14 % em volume de água), a elevada concentração de sólidos da matriz (71,6% - Tabela I) faz com que suas partículas estejam muito próximas entre si (IPS = 0,028 μm), dificultando sua movimentação em altas taxas de cisalhamento, principalmente quando o sistema não consegue expandir gerando espaço para o deslocamento das mesmas. Este fato resultou na

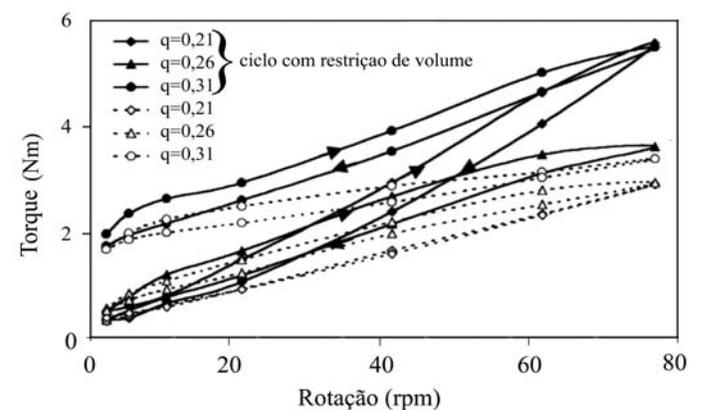


Figura 4: Comportamento reológico dos concretos formulados com coeficientes de distribuição $q = 0,21, 0,26$ e $0,31$, obtidos em ensaios realizados no reômetro para concretos (14% em volume de água) sob a condição de volume restrito (linhas cheias) em comparação aos resultados obtidos sem restrição de volume (linhas pontilhadas). (Obs.: setas indicam sentido de aplicação da rotação.)

[Figure 4: Rheological behavior of $q = 0.21, 0.26$ and 0.31 (14% vol. of water) castables subjected to restricted volume shearing cycles (full lines), compared with results obtained without volumetric restriction (dotted lines). Arrows indicate the shearing cycle route.]

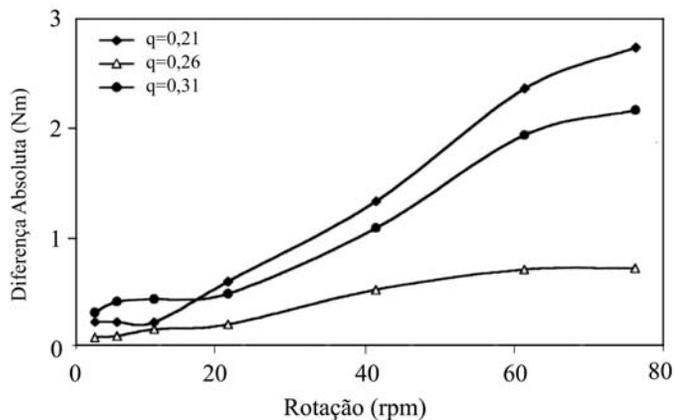


Figura 5: Diferença absoluta entre os níveis de torque obtidos (durante o aumento da rotação) em ensaios com restrição de volume e na ausência desta condição.

[Figure 5: Absolute torque difference between restricted and unrestricted shearing cycles as a function of revolution speed.]

alteração de seu comportamento newtoniano na ausência de restrição de volume, para dilatante na condição oposta.

Por outro lado, o elevado teor de agregados no concreto $q = 0,31$, resulta numa pequena distância de separação entre os mesmos (MPT = $0,305 \mu\text{m}$). Assim, os contatos de alta fricção que ocorrem entre estas partículas, são ainda mais intensificados na condição de volume restrito [6]. Além disso, o reduzido teor de matriz neste sistema diminui a capacidade de lubrificação entre as partículas e a parede da câmara do reômetro, contribuindo também para a dilatância do material.

A composição $q = 0,26$, por sua vez, além de manter o comportamento pseudoplástico na condição de volume restrito, não apresentou grande alteração na sua curva de torque em função da rotação. Tal comportamento decorre dos teores intermediários de matriz e agregados presentes neste sistema [2, 3]. Desta maneira, a distância de separação entre as partículas da matriz (IPS = $0,044 \mu\text{m}$) e dos agregados (MPT = $0,455 \mu\text{m}$) não favorece o predomínio dos fenômenos de superfície da matriz ou dos mássicos entre os agregados, gerando um equilíbrio entre forças no concreto. Além disso, os níveis de torque necessários para o escoamento do material não se mostraram demasiadamente elevados, sendo semelhantes aos de concretos bombeáveis comerciais anteriormente avaliados [1].

Uma última característica fundamental que os concretos bombeáveis devem possuir é uma reduzida tendência ao aquecimento durante o transporte, evitando que a aceleração das reações de hidratação do cimento altere as características reológicas do material no interior da tubulação [1].

Na Fig. 6, o aumento de temperatura das composições $q = 0,21$, $0,26$ e $0,31$ é apresentado em função das energias calculadas (área sob a curva de torque x tempo) para os esforços aplicados pelo reômetro durante a mistura e os ciclos de cisalhamento.

Como se observa, ensaios (mistura e ciclos) realizados sem restrição de volume, apresentam uma relação linear entre aumento de temperatura e energia de cisalhamento, sendo que o máximo aquecimento se verifica durante a mistura, devido aos elevados esforços realizados nesta etapa. Assim, quanto maior a área superficial das composições, maiores o torque na virada e a energia de mistura [4], justificando o acentuado aquecimento do concreto $q = 0,21$, em comparação a $q = 0,26$ e $q = 0,31$.

Contudo, quando os ciclos de cisalhamento foram realizados sob restrição de volume, as composições apresentaram um aquecimento superior ao previsto pela relação linear, verificada na ausência desta condição, devido à intensificação dos contatos e da fricção entre as partículas [6]. Tal fato, aliado à significativa dilatância de $q = 0,21$ e $0,31$ (Fig. 4), resultou no maior aquecimento destas composições.

Também se observa na Fig. 6, o aquecimento de uma composição de concreto refratário bombeável (90% de Al_2O_3), comercial, o qual apresentou aquecimento similar ao da composição $q = 0,26$, confirmando a adequação deste coeficiente ao bombeamento.

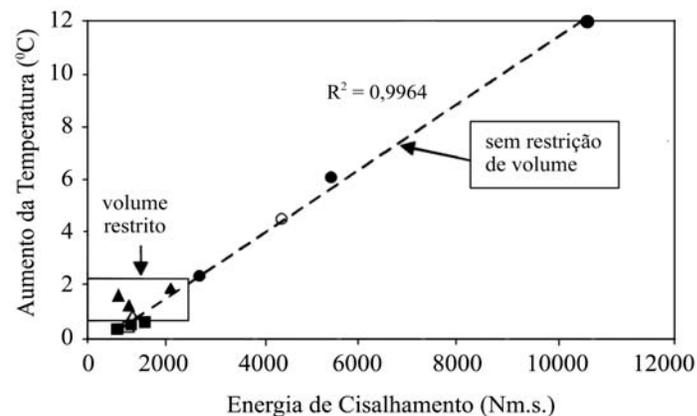


Figura 6: Aumento da temperatura nas composições $q = 0,21$, $0,26$ e $0,31$ (14% em volume de água) e para o concreto comercial com 90% Al_2O_3 e 4% cimento (14,8% de água), em função da energia aplicada durante a mistura e nos ciclos de cisalhamento. Os círculos indicam a etapa de mistura (sem restrição de volume), enquanto os quadrados e os triângulos referem-se aos ciclos de cisalhamento realizados, respectivamente, sem em com restrição de volume. Os símbolos em branco destacam a composição comercial.

[Figure 6: Temperature increase for castables prepared ($q = 0,21$, $0,26$ and $0,31$ - 14% vol. of water) and a commercial composition (90 wt.% of Al_2O_3 and 4 wt.% of calcium aluminate cement - 14.8 vol% of water) as a function of mixing and cyclic shearing energy. Spheres indicate mixing (unrestricted condition), while squares and triangles, respectively, point to unrestricted and restricted volume shearing conditions. Hollow symbols highlight the commercial castable.]

CONCLUSÕES

As discussões realizadas permitem estabelecer que o bombeamento é um processo de aplicação de concretos envolvendo três etapas: mistura, transporte e moldagem.

Assim sendo, a técnica de fluidez é incapaz de determinar se uma composição de concreto é adequada ao bombeamento, pois mesmo que uma composição apresente elevada fluidez, seu comportamento reológico pode variar da pseudoplasticidade à dilatância. Este fato justifica a necessidade de utilização da técnica de reometria na caracterização reológica de concretos bombeáveis.

O reômetro para concretos utilizado mostrou-se capaz de avaliar a reologia dos concretos nas etapas do bombeamento, simulando, inclusive, a condição de volume restrito que ocorre no interior da tubulação de transporte do material.

Os resultados mostraram também, que o comportamento

reológico e a tendência ao aquecimento dos concretos resultam de sua natureza bifásica, sendo conseqüência, tanto da granulometria, como da proporção entre matriz e agregados.

Finalmente, na extensão granulométrica estudada, o coeficiente $q = 0,26$ mostrou-se mais adequado para elaboração de concretos bombeáveis, apresentando equilíbrio entre os fenômenos de superfície de sua matriz e os mássicos dos agregados, fato que resultou em um comportamento pseudoplástico, pouco sensível aos efeitos do fluxo sob restrição de volume.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, ao CNPq, à Cerâmica Saffran e Alcoa Alumínio S.A. pelo apoio dado à execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] R. G. Pileggi, A. R. Studart, C. Pagliosa Neto, V. C. Pandolfelli, “Caracterização reológica de concretos refratários bombeáveis”, *Cerâmica*, **46**, 300 (2000) 176-180.
- [2] I. R. Oliveira, A. R. Studart, R. G. Pileggi, V. C. Pandolfelli, “Dispersão e empacotamento de partículas – princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico”, *Fazendo Arte Editorial* (2000) 224.

- [3] R. G. Pileggi, V. C. Pandolfelli, “Reflexões sobre distribuição granulométrica e sua correlação com a reologia de concretos refratários”, *Ceramic News, Special South America* (1999) 6 -13.
- [4] R. G. Pileggi, A. R. Studart, J. Gallo, V. C. Pandolfelli, “Mixing effects on the rheology of refractory castables”, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **80**, 6 (2001) 27-31
- [5] M. Sari, E. Prat, J. F. Labastire, “High strength self-compacting concrete - original solutions associating organic and inorganic admixtures”, *Cement and Concrete Res.* **29**, 6 (1999) 813-818.
- [6] A. Sundqvist, A. Sellgren, G. Addie, “Slurry pipeline losses for coarse and high density industrial products”, *Powder Technol.* **89** (1996) 19-28.
- [7] R. G. Pileggi, A. E. Paiva, J. Gallo, V. C. Pandolfelli, “Novel rheometer for refractory castables”, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **79**, 1 (2000) 54 -58.
- [8] A. R. Studart, R. G. Pileggi, W. Zhong, V. C. Pandolfelli, “Processing of zero-cement self-flow alumina castable”, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **77**, 12 (1998) 60-66.
- [9] P. Bonadia, R. G. Pileggi, A. Studart, S. L. Vendrasco, V. C. Pandolfelli, “Applying MPT principle to high-alumina castables”, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **78**, 3 (1999) 57-60.
- [10] A. R. Studart, R. G. Pileggi, J. Gallo, V. C. Pandolfelli, “High-alumina multifunctional refractory castables” *Am. Ceram. Soc. Bull.* **80**, 11 (2001) 34-40.
(*Rec. 19/04/01, Ac. 17/08/01*)