

# OTIMIZAÇÃO DE SUSPENSÃO DE ALUMINA PARA CONFORMAÇÃO DE LÂMINAS DE CORTE CERÂMICAS<sup>1</sup>

Fabiana Mendonça de Faria<sup>2</sup>  
Ricardo H. R. Castro<sup>2</sup>

## Resumo

O objetivo desse projeto é desenvolver a técnica de produção de uma lâmina de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) nacional passando por todas etapas de fabricação. Para isso, foi determinada a concentração de Óxido de Magnésio ( $\text{MgO}$ ) e Óxido de Manganês ( $\text{MnO}_2$ ) adequada para sinterização na menor temperatura possível através do equipamento de dilatométrica. A seguir, através da técnica de estabilização de suspensões, foi otimizada uma suspensão da composição ideal por medidas de viscosidade e reologia em função da concentração de dispersante e pH da suspensão. A suspensão otimizada foi aplicada no processo de colagem por dreno para conformação no formato de faca.

**Palavras-chave:** Cerâmica; Conformação; Alumina; Suspensão.

## OPTIMIZATION OF ALUMINA SUSPENSIONS FOR CONFORMATION PROCESS OF CUTTING TOOLS

## Abstract

The objective of this work is develop a procedure to produce alumina blade considering all the fabrication steps. To do so, the concentration of sintering additives ( $\text{MgO}$  and  $\text{MnO}_2$ ) was optimized by dilatometry measurements. After determining the best composition to lower sintering temperature, an aqueous suspension of this composition was also optimized considering viscosimetry and rheological measurements. The optimized suspension was successfully applied in a slip-casting process.

**Key words:** Ceramics; Conformation; Alumina; Suspensions.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Bernardo, SP, Brazil

## 1 INTRODUÇÃO

A fabricação de materiais cerâmicos de alta performance envolve o domínio de todas as etapas de processamento. Este processamento inclui desde a preparação e seleção da matéria-prima, até a conformação, sinterização e acabamento final. As propriedades elétricas e mecânicas do produto final serão fortemente dependentes destas etapas, tendo cada uma delas que ser compreendida em detalhes para a obtenção das características desejadas.<sup>(1,2)</sup>

Um dos métodos mais comumente utilizados na indústria para conformação de materiais cerâmicos é a colagem de suspensão por dreno. Basicamente esse processo envolve a preparação de uma suspensão das partículas cerâmicas de interesse em um solvente (H<sub>2</sub>O, etanol, metanol, etc.). A seguir, a suspensão é colocada em um molde poroso e o solvente é absorvido por este devido à capilaridade. Ao ser atraído pelo molde, o solvente carrega as partículas, deixando um depósito empacotado de partículas na parede do molde. A suspensão é deixada no molde tempo suficiente para geração de uma parede da espessura desejada. Após a espessura ser atingida, o excesso de suspensão é retirado e ocorre retração espontânea da peça devido à secagem do conteúdo de água no seu interior, havendo destaque da peça naturalmente, que terá formato inverso do molde.<sup>(2,3)</sup>

O grande obstáculo nesse processo é a otimização da suspensão que será utilizada. Isso porque, ao se preparar uma suspensão, naturalmente é observado o fenômeno de sedimentação. Isto é, as partículas cerâmicas se separam do solvente formando um compacto no fundo do recipiente onde a suspensão se encontra devido à força gravitacional. Esse gradiente de concentração gerado pela sedimentação se reproduz no molde poroso, fazendo com que algumas regiões tenham espessuras maiores que outras. Para controlar esse fenômeno é necessário entendê-lo mais detalhadamente.

Em geral, quando temos partículas pequenas (<0,1 μm), o movimento Browniano espontâneo gera uma mobilidade aleatória das partículas na suspensão. Para partículas desse tamanho, essa movimentação aleatória é mais significativa que a força gravitacional, de modo que, virtualmente, tais partículas poderiam permanecer suspensas por um tempo indeterminado. No entanto, partículas pequenas têm uma tendência natural de se aglomerar. Isso ocorre devido às forças de van der Waals. Apesar de se tratar de uma força de curto alcance, com eventuais choques entre as partículas em suspensão essas forças começam a agir, unindo duas ou mais partículas em um chamado aglomerado. Esses aglomerados têm massa significativa, de modo que a força gravitacional se torna preponderante em relação ao movimento Browniano e esses sedimentam.

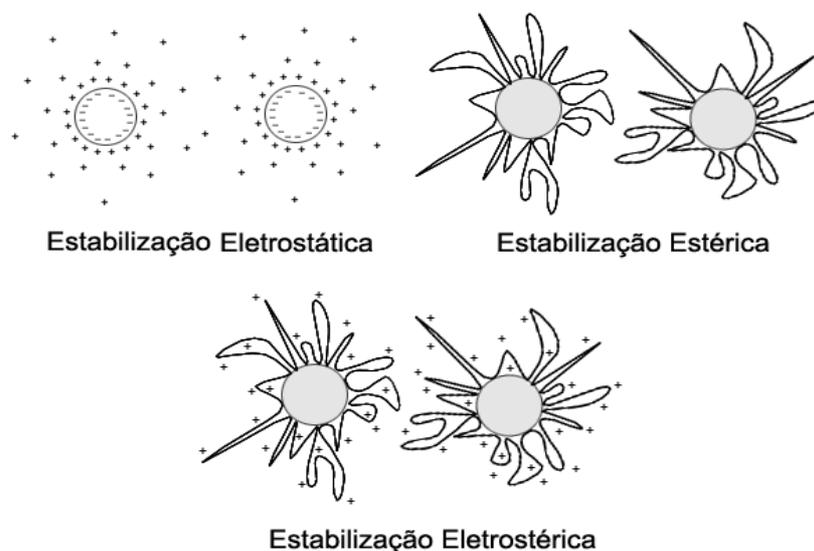
O problema de sedimentação pode ser contornado utilizando métodos de estabilização. Como a interação de van der Waals é de curto alcance, o método de estabilização tem por objetivo impedir a aproximação demasiada das partículas, mantendo-as estabilizadas pelo movimento Browniano. Esse objetivo pode ser obtido de três formas básicas: estabilização eletrostática, estérica e eletrostérica.

A estabilização eletrostática usa como conceito a geração de cargas semelhantes na superfície das partículas em suspensão. Isso é, em geral há uma carga na superfície de partículas cerâmicas devido às ligações químicas incompletas observadas naquela região. No entanto, essas cargas são muito pequenas, o que não gera uma repulsão eletrostática suficiente entre as partículas para mantê-las afastadas. Para promover a repulsão são adicionadas moléculas carregadas à suspensão que têm

afinidade com a superfície das partículas. Isso gera cargas superficiais e, portanto, repulsão interpartículas.

A estabilização estérica tem por objetivo manter as partículas afastadas umas das outras utilizando um polímero ligado à superfície das partículas. Esse polímero geraria uma barreira física para aproximação, de modo que a distância de alcance das forças de van der Waals é evitada, não havendo a formação dos aglomerados.

Uma última forma de estabilização, que é a mais eficiente, unindo os dois métodos acima descritos. Esse método utiliza cadeias poliméricas eletricamente carregadas ligadas à superfície das partículas. Assim, haverá o fenômeno de repulsão eletrostática aliado ao fenômeno estérico. A Figura 1 mostra esquematicamente as três formas de estabilização de suspensões.



**Figura 1:** Formas de Estabilização de partículas em suspensão

Para otimização do processo eletrostérico de estabilização, a química de superfície das partículas empregadas e a química das cadeias poliméricas que servirão de dispersante (estabilizante) devem ser estudadas e adequadamente escolhidas. Isto é, para um funcionamento efetivo do método, o polímero deve se ligar quimicamente na superfície das partículas, de modo que qualquer agitação não o destaque desta e, ademais, os grupos químicos do polímero que não se ligam à superfície devem ter um  $pK_a$  (constante de dissociação de grupo ácido) adequado de modo que no pH da suspensão haja grupos químicos ionizados e, portanto, cargas.<sup>(4)</sup>

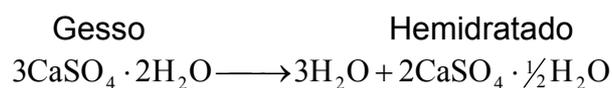
Um dos dispersantes mais utilizados nos processos cerâmicos é o poliacrilato.<sup>(3,5,6)</sup> Esse polímero apresenta grupos carboxílicos distribuídos pela cadeia, estando alguns ionizados e outros não, dependendo do pH. Os grupos não ionizados serão responsáveis pela ligação do polímero à superfície das partículas por ligações de hidrogênio, já os grupo ionizados irão gerar cargas negativas para estabilização. De fato os poliacrilatos só são efetivos em partículas com superfícies básicas,<sup>(4,7)</sup> como a alumina e a magnésia, para partículas com superfícies ácidas, outros polímeros com características básicas devem ser empregados.

A eficiência de um dispersante na estabilização pode ser estudada por técnica de sedimentação.<sup>(3)</sup> Isto é, são preparadas suspensões com diferentes concentrações de dispersantes e essas são repousadas para sedimentação, sendo o tempo de sedimentação diretamente proporcional à estabilização. No entanto, esse tipo de ensaio é demorado e de pouca precisão quando se tem longo tempo de

sedimentação. Uma alternativa é o estudo das propriedades reológicas da suspensão.<sup>(8)</sup> Essas propriedades são dependentes do fluxo de solvente pelas partículas em suspensão, de maneira que viscosidades menores significam linhas de fluxo de solvente pouco perturbadas, e viscosidades maiores significam linhas de fluxo bastante perturbadas pelas partículas. Em verdade, portanto, partículas maiores tendem a afetar a viscosidade mais expressivamente, de modo que os aglomerados tendem a gerar perturbações mais significativas. Deduz-se, afinal, que a presença de um dispersante eficiente tende a diminuir a viscosidade da suspensão pois dificulta a formação dos aglomerados.

Após a escolha do dispersante mais eficiente, o processo de colagem por dreno segue para a preparação do molde e posterior preenchimento deste. Como a drenagem é função da porosidade do molde, esse deve ter porosidade controlada. O molde deve também ser barato, pois sua vida útil não é limitada. O material mais comum para isso é o gesso.

Os moldes de gesso são preparados por mistura de água com pó de gesso de Paris, colocando a mistura em um padrão de molde. Isso produz uma superfície lisa do molde, duplicando os contornos do padrão perfeitamente. O molde é feito em partes, cada uma dimensionada para ser retirada sem danificar a peça conformada.<sup>(2)</sup> A reação esperada para o gesso é:



Essa reação é exotérmica e gera o hemidratado, que tem maior rigidez que o gesso inicial. A reação é reversível mas lenta no sentido oposto, a ação da água no hemidratado resulta na precipitação do gesso novamente. A reação é satisfeita com a introdução de apenas 18% de água, mas muito mais água é necessária para promover uma mistura adequada para fazer o molde. Essa água “extra” permanece ainda entre os cristais de gesso, resultando em porosidades capilares muito finas quando o molde é seco. São essas porosidades que puxam a água da suspensão durante a colagem. A quantidade de porosidade pode assim ser controlada pela quantidade de excesso de água que deve ser adicionada durante a fabricação do molde. Para colagens usuais, utilizamos cerca de 70% a 80% de água, mas esse número é mais precisamente determinado em função do material e do tamanho das partículas da suspensão que está sendo utilizada.

Com o molde preparado, a suspensão preenche o vazio do molde de gesso e espera-se tempo o suficiente para alcançar a espessura desejada. Após isso, o excesso de suspensão é retirado e a peça é feita secar para desmoldagem. Nesse processo de secagem, moléculas de água são eliminadas da peça, criando vazios em seu interior. Esses vazios geram reacomodação das partículas na peça, fazendo com que haja retração da mesma, facilitando a desmoldagem. No processo de desmoldagem, é comum que a peça tenha uma baixa resistência mecânica, provocando constantes quebras no manuseio, seja manual ou automático. Para corrigir tal problema, a utilização de aditivos chamados ligantes tem se tornado comum. Esses aditivos são cadeias poliméricas com temperatura vítrea relativamente alta, o que promove resistência mecânica ao sistema.<sup>(2)</sup> Esses ligantes devem ser adicionados quando da preparação da suspensão, para que estejam homogêaneamente distribuídos pela suspensão e, por consequência, pela peça após a colagem.

A peça então conformada passa para a última etapa do processamento, a sinterização<sup>9</sup>. Nesse processo a peça é exposta em altas temperaturas para que haja eliminação dos poros e conseqüente densificação. Nessa etapa deve-se ter atenção para os polímeros adicionados na etapa de conformação. Isto é, cada polímero adicionado se transformará em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O no aquecimento por combustão. Esses dois compostos estarão na forma gasosa e devem ser eliminados da peça. Caso haja um aquecimento demasiadamente rápido da peça na sinterização, as peças podem sofrer trincas pela expansão interna desses gases. Portanto, o aquecimento deve ser geralmente lento até a completa eliminação do material orgânico, que acontece por volta de 500°C, para então ser elevado à temperatura de sinterização.

A temperatura de sinterização é usualmente definida como 2/3 da temperatura de fusão do material.<sup>(1)</sup> Nessa temperatura há movimentação atômica adequada no sistema, permitindo reorganização dos grãos e partículas, que tendem a se unir para eliminar as superfícies disponíveis (que são termodinamicamente instáveis), promovendo a eliminação dos poros. Alguns sistemas não eliminam poros naturalmente devido a mecanismos de transporte de massa inadequados.<sup>(1)</sup> Nesses casos, é comum o uso de aditivos de sinterização que promovem os mecanismos ideais. Tais aditivos são íons adicionados na fabricação do material cerâmico ou homogeneizados a ele por mistura mecânica (moagem).<sup>(2)</sup>

Após a sinterização temos a peça nas propriedades e dimensões finais. Por vezes é necessário um acabamento superficial nessa peça, dependendo da aplicação pretendida.

O objetivo principal do projeto é desenvolver uma lâmina de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) passando por todas as etapas do processo de fabricação de uma peça cerâmica. Determinou-se a composição que promoveria a maior economia de processamento utilizando técnica de dilatometria e as etapas seguintes envolvendo suspensões foram otimizadas utilizando estudos de reologia.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O material cerâmico utilizado foi a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – fornecido pela Alcoa com pureza de 98% e malha 325). Esse material foi selecionado pela facilidade de manuseio, não toxicidade e informações disponíveis na literatura sobre a otimização de sua suspensão em meio aquoso. MgO (fornecido pela Dinâmica com pureza analítica) e MnO<sub>2</sub> (fornecido pela Synth e com pureza analítica) foram utilizado como aditivo de sinterização.

Para determinar as quantidades ideais de aditivos, diferentes misturas foram testadas no dilatômetro SETSYS 1600 da Setaram, buscando a menor temperatura de sinterização e homogeneidade de processo. Para os ensaios foram prensadas amostras de diâmetro de 3mm e altura de 2mm em prensa uniaxial com 1,0t.

O solvente para as suspensões foi água destilada e deionizada. Água destilada é necessária para evitar contaminações que podem interferir na geração de cargas superficiais das partículas em suspensão.

O poliacrilato de sódio (Dispex N40 nomeado PA neste trabalho) foi utilizado como dispersante e possíveis ajustes de pH foram realizados utilizando HNO<sub>3</sub> ou NH<sub>4</sub>OH. As suspensões foram preparadas com diferentes concentrações de poliacrilato e foram assim submetidas às medidas de viscosidade. As suspensões tiveram 50 mL e uma concentração de sólido de 20% em volume. As concentrações de PA foram variadas de 0,001 mL a 0,05 mL por grama de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Os ensaios de viscosidade foram realizados em um viscosímetro Brookfield DV-II, disponível no campus, utilizando taxas variadas de rotação (de 10 rpm a 200 rpm). O molde será preparado utilizando gesso de Paris contendo 80g de H<sub>2</sub>O para 100g de gesso.

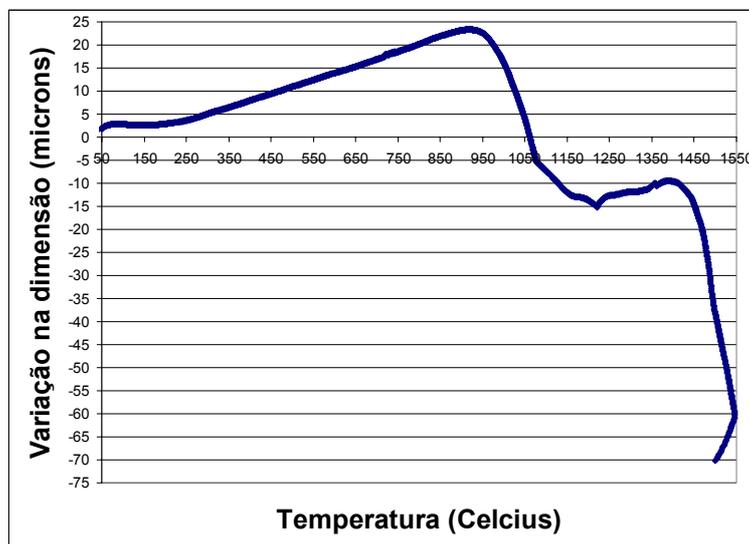
A suspensão para colagem teve concentração de 30%, 40% e 50% em volume para determinar a melhor condição de colagem. Nessa suspensão será aplicado ligante (PVA) em 1% em massa caso a colagem origine peças demasiadamente frágeis.

A sinterização da peça conformada foi realizada a partir dos dados de dilatométrica realizados no início do projeto, com taxa de aquecimento de 1°C/min até 600°C - para eliminação da matéria orgânica - e 10°C/min até a temperatura determinada pelo experimento.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Testes de Dilatometria

O Gráfico da Figura 1 apresenta no eixo x a temperatura de tratamento térmico e no eixo y a deformação da amostra contendo 0.05% molar de MgO (Óxido de Magnésio) e 99.95% molar de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nas amostras prensadas em pastilhas de 2mm de altura como descrito no procedimento experimental. A Figura demonstra que a amostra prensada com 1t sofreu expansão de cerca de 25 microns até 900°C, e a partir daí uma retração total de cerca de 6% em relação ao seu tamanho inicial. O resultado apresentado possui dois patamares. Isso pode ser reflexo de uma quantidade insuficiente de MgO para estabilizar as partículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gerando crescimento anisotrópico e re-acomodação das amostras. Deste modo, apesar da inicial retração da amostra em 900°C, considera-se o início de sinterização por volta de 1.400°C.



**Figura 1** – Dilatometria da amostra contendo 0.05% molar de MgO (Óxido de Magnésio) e 99.95% molar de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Observando a dilatométrica para a amostra prensada de 0.5% molar de MgO e 99.5% molar de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Figura 2) e comparando com aquele apresentado na Figura 1, observa-se que neste caso não houve a presença do patamar. Isso indica que a quantidade maior de MgO (0,5%) foi agora suficiente para estabilizar as partículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, tornando-as isotrópicas, e eliminando o patamar inicial em 900°C. Apenas

uma retração de cerca de 9% em relação ao seu tamanho inicial foi observada com início de sinterização também em 1.400°C.

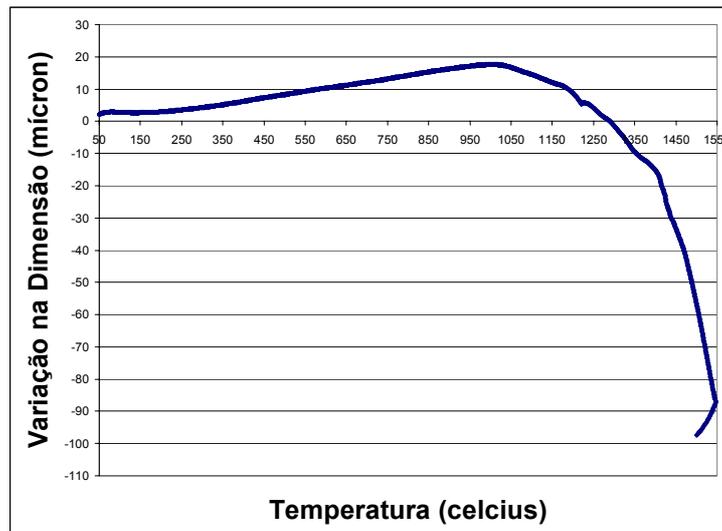


Figura 2 – Dilatométria da amostra contendo 0.5% molar de MgO e 99.5% molar de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Mediante as elevadas temperaturas de sinterização observadas, que levaria a custos de processo demasiadamente altos, foi considerada a utilização de um outro aditivo para aumento de difusão e promoção de mecanismos densificantes de sinterização nas amostras. O aditivo selecionado foi o Óxido de Manganês, com a função de solubilizar-se na rede cristalina do Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gerando defeitos e aumentando a taxa de difusão, resultando na diminuição da temperatura de sinterização no estado sólido.

A Figura 3 mostra a dilatométria de uma amostra de composição semelhante àquela apresentada na Figura 1, mas com a adição de 0,5% de óxido de manganês. Nota-se que o efeito de estabilização pelo MgO não foi alterado, e o primeiro patamar de retração permanece. No entanto, esta amostra sofreu retração de 8% em relação ao seu tamanho inicial (considerando o início a 25°C e final da retração a 1.550°C), sendo pouco maior que aquele registrado para a amostra sem o óxido de manganês.

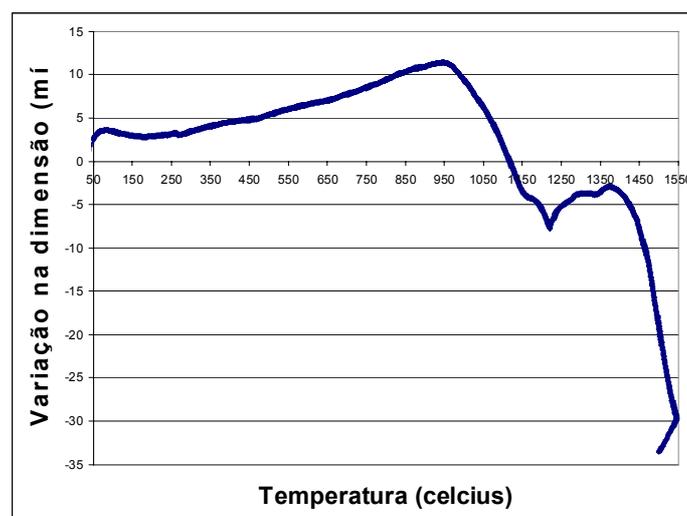


Figura 3 – Dilatométria para a amostra contendo 99.45% molar de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.05% molar de MgO e 0.5% molar de MnO<sub>2</sub>,

A Figura 4 mostra a dilatometria da amostra semelhante àquela da Figura 2, mas contendo 0.5% de  $MnO_2$ . Nota-se que o patamar não está presente devido à estabilização causada por 0.5% de  $MgO$ , e o material tem uma curva suave até a densificação. Como esperado, sua densificação foi maior, chegando a 12% de retração em relação ao seu tamanho original (considerando o início a  $25^\circ C$  e final da retração a  $1.550^\circ C$ ), revelando um processo eficaz de eliminação de poros.

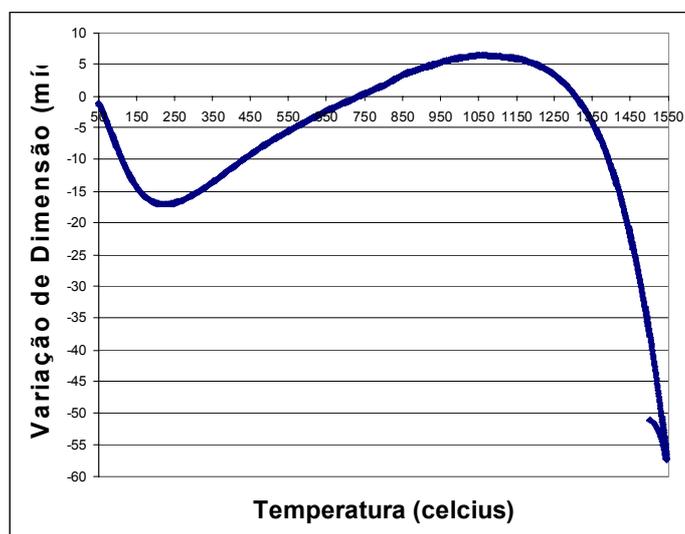
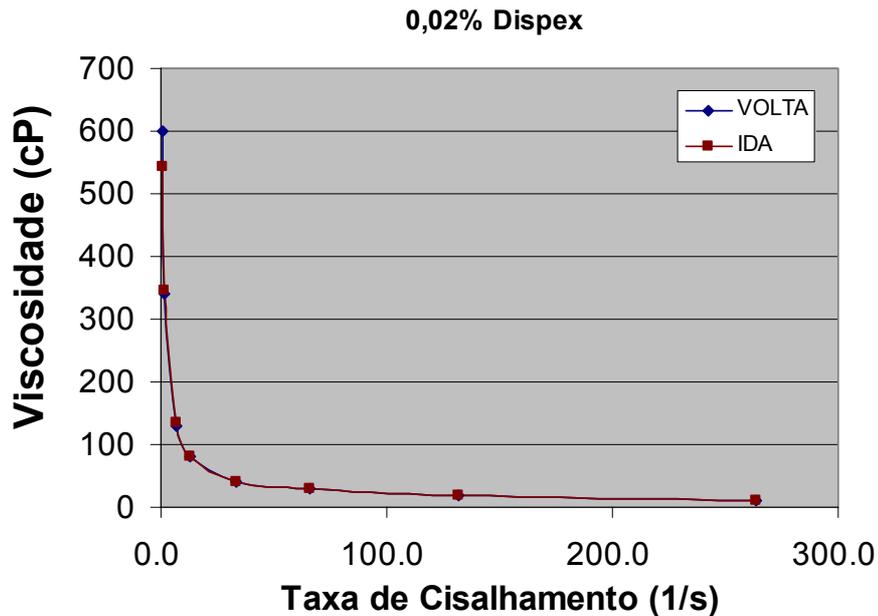


Figura 4 - 99% molar de  $Al_2O_3$ , 0.5% molar de  $MgO$  e 0.5% molar de  $MnO_2$

### 3.2 Ensaios de Viscosidade

Com a composição selecionada a partir dos dados de dilatometria (0.5% molar de  $MgO$  e 99.5% molar de  $Al_2O_3$ ), a seguir os ensaios de viscosidade foram realizados para otimizar a suspensão para posterior colagem de barbotina (nome industrial para suspensão ou dispersão – mistura heterogênea de pó cerâmico e solvente). Com os dados de viscosidade, foram estudados também os comportamentos reológicos em função da presença do dispersante Dispex N40, um poliacrilato de sódio.

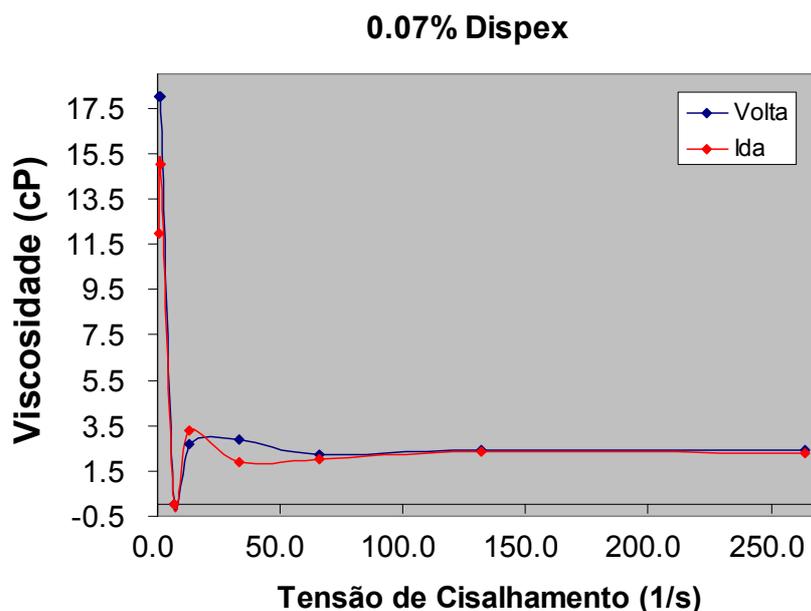
Os gráficos da Viscosidade em função da Tensão de Cisalhamento obtidos com o estudo são apresentados a seguir.



**Figura 5** – Viscosidade em função da taxa de cisalhamento de uma suspensão de alumina a 20% em volume e contendo 0.02% de Dispex

A Figura 5 apresenta a amostra de alumina em suspensão aquosa contendo 0.02% de Dispex como agente dispersante. Nota-se um comportamento pseudoplástico inicial (redução da viscosidade em função do aumento da taxa de cisalhamento). Isso pode ser um reflexo da formação de aglomerados fracos quando em baixas taxas de cisalhamento, que são rompidos com o aumento desta. O rompimento dos aglomerados gera um maior fluxo do solvente ao redor das partículas, diminuindo a viscosidade. A Figura 5 mostra também gráficos chamados de IDA e de VOLTA. Isso porque os ensaios foram iniciados em altas taxas de cisalhamento, seguidos de diminuição sistemática até um aumento seqüencial. Este procedimento foi adotado para que fosse estudado o fenômeno de reologia em função do tempo, i.e., fenômeno de tixotropia ou reopexia (diminuição ou aumento da viscosidade, respectivamente, em função do tempo para mesma taxa de cisalhamento). Nota-se que apenas uma ligeira reopexia, desde que a amostra em baixas taxas apresentou um pequeno aumento da viscosidade no ciclo de volta, ou seja, com a amostra após certo tempo de processo.

A reopexia pode ter sido gerada pela formação de aglomerados mais fortes ao longo do processamento, desde que a concentração de Dispex ainda era muito baixa para evitar a formação completa destes, estando apenas em uma concentração suficiente para auxiliar a união das partículas pela formação de pontes entre as moléculas adsorvidas.

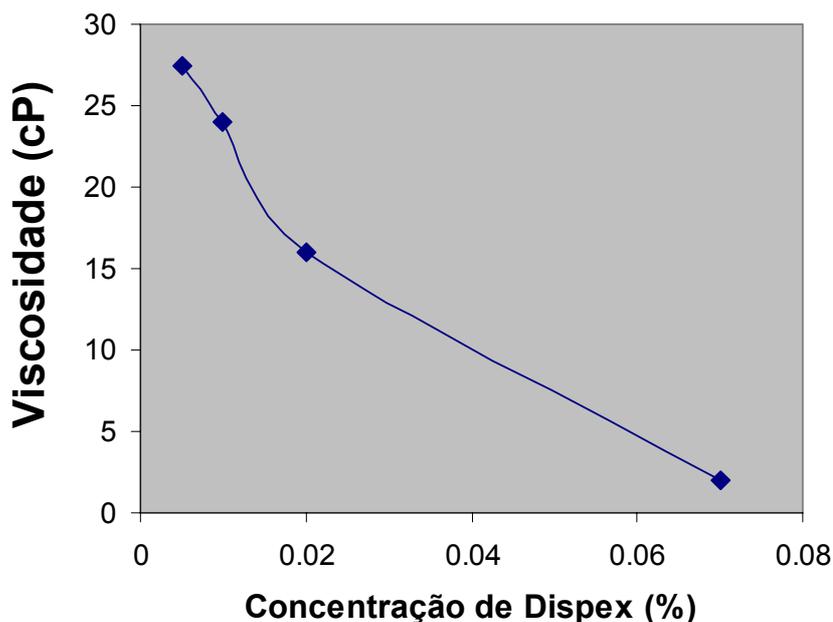


**Figura 6** – Viscosidade em função da taxa de cisalhamento de uma suspensão de alumina a 20% em volume e contendo 0.07% de Dispex

A Figura 6 mostra um comportamento semelhante de pseudoplasticidade para a suspensão contendo 0.07% de Dispex, desde que houve uma diminuição da viscosidade em função do aumento da taxa de cisalhamento. Essa pseudoplasticidade é no entanto evidenciada só quando observamos taxas mínimas de cisalhamento, pois quando a maior quantidade de dispersante possibilita a não formação de aglomerados mesmo em taxas menores.

Nota-se, além disso, que inicialmente a viscosidade inicial para todas as taxas de cisalhamento é menor quando comparada com aquelas da Figura 5. Isso mostra a eficiência do agente dispersante Dispex na estabilização das partículas, e diminuição conseqüente da viscosidade.

Essa avaliação do efeito do dispersante na viscosidade final pode ser avaliada fixando apenas uma taxa de cisalhamento e comparando-se as viscosidades para diferentes concentrações de aditivos. Isso é mostrado na Figura 8:



**Figura 7** – Viscosidade em função concentração de Dispex em uma suspensão de alumina a 20% em volume.

Este estudo indica menor viscosidade na suspensão contendo 0,07% de dispersante, apresentando alta fluidez em relação às outras suspensões. Apesar disso, um patamar de estabilização não foi obtido, indicando que viscosidades ainda menores podem ser obtidas para concentrações maiores de Dispex.

A baixa viscosidade e fluidez são desejadas no projeto para dificultar aglomerações e facilitar o processo de colagem; sendo assim, a concentração de dispersante mais eficiente foi inicialmente a de 0,07%. Esse ensaio será completado nas próximas etapas do projeto, onde também ensaio de potencial zeta será feito para estudar as cargas geradas na superfície das partículas pelo Dispex.

#### **4 CONCLUSÃO PARCIAIS**

Devido à melhor sinterização em temperatura razoável, e baixa porosidade, a composição otimizada considerando fatores de processamento (temperatura de sinterização) foi 0,5% molar MgO, 0,5% molar MnO<sub>2</sub> e 99% molar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Os dados indicaram a estabilização das partículas de alumina pelo MgO e a sinterização pronunciada devido ao MnO<sub>2</sub>.

Serão realizados ensaios complementares para avaliar a concentração ideal de aditivo. Inicialmente os testes indicaram que será preciso uma concentração maior do que 0,07% de Dispex em uma suspensão de alumina a 20% em volume.

#### **Agradecimentos**

O autor agradece a Fundação Educacional Inaciana pela bolsa de Iniciação Científica.

## REFERÊNCIAS

- 1 Chiang, Y.-M., Birnie, D., & Kingery, W. D. *Physical Ceramics - Principles for Ceramic Science and Engineering* (John Wiley & Sons Inc., New York, 1997).
- 2 Richerson, D. W. *Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design* (1992).
- 3 Oliveira, I. R., Studart, A. R., Pileggi, R. G. & Pandolfelli, V. C. *Dispersão e Empacotamento de Partículas* (Fazendo Arte, São Paulo, 2000).
- 4 Castro, R. H. R., Murad, B. B. S. & Gouvea, D. Influence of the acid-basic character of oxide surfaces in dispersants effectiveness. *Ceram. Int.* **30**, 2215-2221 (2004).
- 5 Davies, J. & Binner, J. G. P. The role of ammonium polyacrylate in dispersing concentrated alumina suspensions. *J. Eur. Ceram. Soc.* **20**, 1539-1553 (2000).
- 6 Cesarano III, J. & Aksay, I. A. Stability of aqueous alpha-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> suspensions with poly(methacrylic acid) polyelectrolytes. *J. Am. Ceram. Soc.* **71**, 250-255 (1988).
- 7 Castro, R. H. R. & Gouvea, D. The influence of the chitosan adsorption on the stability of SnO<sub>2</sub> suspensions. *J. Eur. Ceram. Soc.* **23**, 897-903 (2003).
- 8 Johnson, S. B., Franks, G. V., Scales, P. J., Boger, D. V. & Healy, T. W. Surface chemistry-rheology relationships in concentrated mineral suspensions. *Int. J. Miner. Process.* **58**, 267-304 (2000).
- 9 Kingery, W. D., & Francois, B. *Sintering and Related Phenomena* (eds. Kuczynski, G. C., Hooten, N. A. & Gilbson, G. N.) (Gordon & Breach, New York, 1967).