

## **ROTEIRO EXPERIMENTAL**

### **Parte I: Colagem da suspensão (ou barbotina) de argila tipo São Simão**

- 1) Cada grupo receberá um molde de gesso com o formato de um cadinho de laboratório. Preencha o molde com a suspensão até o nível desejado. Inicie a contagem do tempo (até 3 minutos). Observe que se nível da suspensão diminui à medida que a água da suspensão é absorvida. Mantenha o nível constante adicionando mais algumas gotas de suspensão se necessário. Mantenha esse processo durante 3 minutos.
- 2) Ao final desse período, varta o conteúdo do molde de volta no frasco principal e mantenha o molde na vertical (de ponta cabeça) por aproximadamente 3 minuto para remover o excesso de suspensão.
- 3) Verifique se a peça está seca observando a contração em relação à geometria do molde. Vire o molde para baixo e retire a peça com cuidado. Em seguida, leve o frasco para a estufa (secagem a 110°C, por 30 minutos). *Cuidado: as peças nesse estágio são extremamente frágeis!* Durante a semana, a peça será sinterizada a 1100°C, durante 5 horas.

### **Parte II: Dispersão de óxido de alumínio.**

- 1) Identifique cada um dos recipientes (sugestão: "1) Referência sem aditivos" e "2) Poliacrilato de sódio"). Pesar duas alíquotas de óxido de alumínio (alumina calcinada) de aproximadamente 10,00 g e de água destilada de 3,50 g em um mesmo frasco (copinho de café descartável). Com o auxílio de uma espátula, homogeneíze essas duas suspensões.
- 2) Observe a viscosidade dessas suspensões. Elas fluem com a ação da gravidade? Você conseguiria varta-las em um molde? É possível traçar um corte na suspensão com a espátula? Você diria que essas partículas estão bem ou mal dispersas?
- 3) Em uma das suspensões, adicione 1, 2 e 3 gotas de solução de dispersante. Com uma espátula, homogeneíze novamente as suspensões a cada gota adicionada.
- 4) Observe as mudanças de viscosidade que gradativamente ocorrem em relação à suspensão inicial. Elas agora fluem com a ação da gravidade? Você conseguiria varta-las em um molde? É possível traçar um corte na suspensão com a espátula? Você diria que essas partículas estão bem ou mal dispersas?

Referência:

# **Dispersão e Empacotamento de Partículas**

*Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico*

Ivone Regina de Oliveira

André Rocha Studart

Rafael Giuliano Pileggi

Victor Carlos Pandolfelli

2000

FAZENDO ARTE EDITORIAL

---

## Introdução

Duas das principais características que diferenciam os materiais cerâmicos, de um modo geral, das outras classes de materiais são sua alta temperatura de fusão (com exceção da maioria dos vidros) e sua elevada dureza. Essas características são uma consequência direta das ligações químicas primárias de caráter iônico-covalente estabelecidas entre os átomos que constituem os materiais cerâmicos. Por serem bastante fortes e direcionais, essas ligações químicas requerem temperaturas elevadas para serem rompidas e dificultam o deslocamento relativo entre átomos vizinhos, reduzindo drasticamente sua capacidade de deformação.

Assim como em outras áreas tecnológicas, a Engenharia de Materiais busca tirar proveito destas e de outras características particulares das cerâmicas, de modo a propiciar benefícios diretos ou indiretos para o homem. Nesse sentido, os materiais cerâmicos têm proporcionado significativos avanços nos mais variados setores, abrangendo desde áreas mais tradicionais como a de revestimentos cerâmicos até indústrias de alta tecnologia nas áreas de comunicação e informática. A etapa de processamento, abordada neste livro, é de fundamental importância dentro deste contexto, uma vez que tem por objetivo desenvolver um produto cerâmico com um formato final adequado, que possibilite conferir utilidade ou fins práticos às propriedades intrínsecas desses materiais.

Embora sejam as principais justificativas para a utilização dos materiais cerâmicos, as elevadas temperaturas de fusão e a dureza impedem, na maioria das vezes, que peças cerâmicas policristalinas sejam produzidas de maneira economicamente viável, através das técnicas convencionais de processamento aplicadas aos produtos poliméricos e metálicos.

Em virtude disso, os materiais cerâmicos são submetidos a uma rota alternativa de processamento, na qual a peça é conformada a partir de sistemas particulados (ou pós). Essa rota baseia-se na idéia de que o formato final desejado para a peça pode ser obtido através da movimentação e organização espacial de partículas. Nesse contexto, diversas técnicas podem ser empregadas para conformar os pós cerâmicos, como ilustrado esquematicamente na figura 1.1. Uma vez obtido o formato desejado, o compacto é submetido a altas temperaturas (porém inferiores à temperatura de fusão do material) com o intuito de estabelecer ligações mais fortes entre as partículas e, assim, densificar e conferir resistência mecânica ao corpo conformado. Tais ligações são originadas através dos diversos mecanismos de transporte de massa em nível atômico que caracterizam o processo de sinterização que ocorre na etapa de queima apresentada na figura 1.1. Essas são, de uma maneira bastante genérica, as etapas envolvidas na obtenção de um produto cerâmico.

Apesar da utilização de partículas solucionar o problema de conformação de peças cerâmicas, é importante ressaltar que os sistemas particulados apresentam certas características que podem gerar uma série de dificuldades durante a etapa de processamento. Em decorrência da sua elevada área superficial por unidade de volume, esses sistemas são bastante influenciados por forças superficiais entre as partículas, dentre as quais se destaca a força atrativa de van der Waals.

A atuação das forças superficiais de van der Waals favorece a formação de aglomerados entre as partículas, que dificultam significativamente sua trabalhabilidade a seco e, com isso, a etapa de conformação do processamento. Demais fatores como as forças de capilaridade, a rugosidade e o formato das partículas, entre outros, também podem dificultar o processamento de sistemas particulados.

Além de dificultar a conformação, a presença de aglomerados impede que se misture de maneira eficiente partículas cerâmicas provenientes de matérias-primas distintas. Essa mistura é essencial para que se garanta uma adequada distribuição espacial dos elementos químicos e das fases do material ao longo do corpo conformado. Tal homogeneidade microestrutural

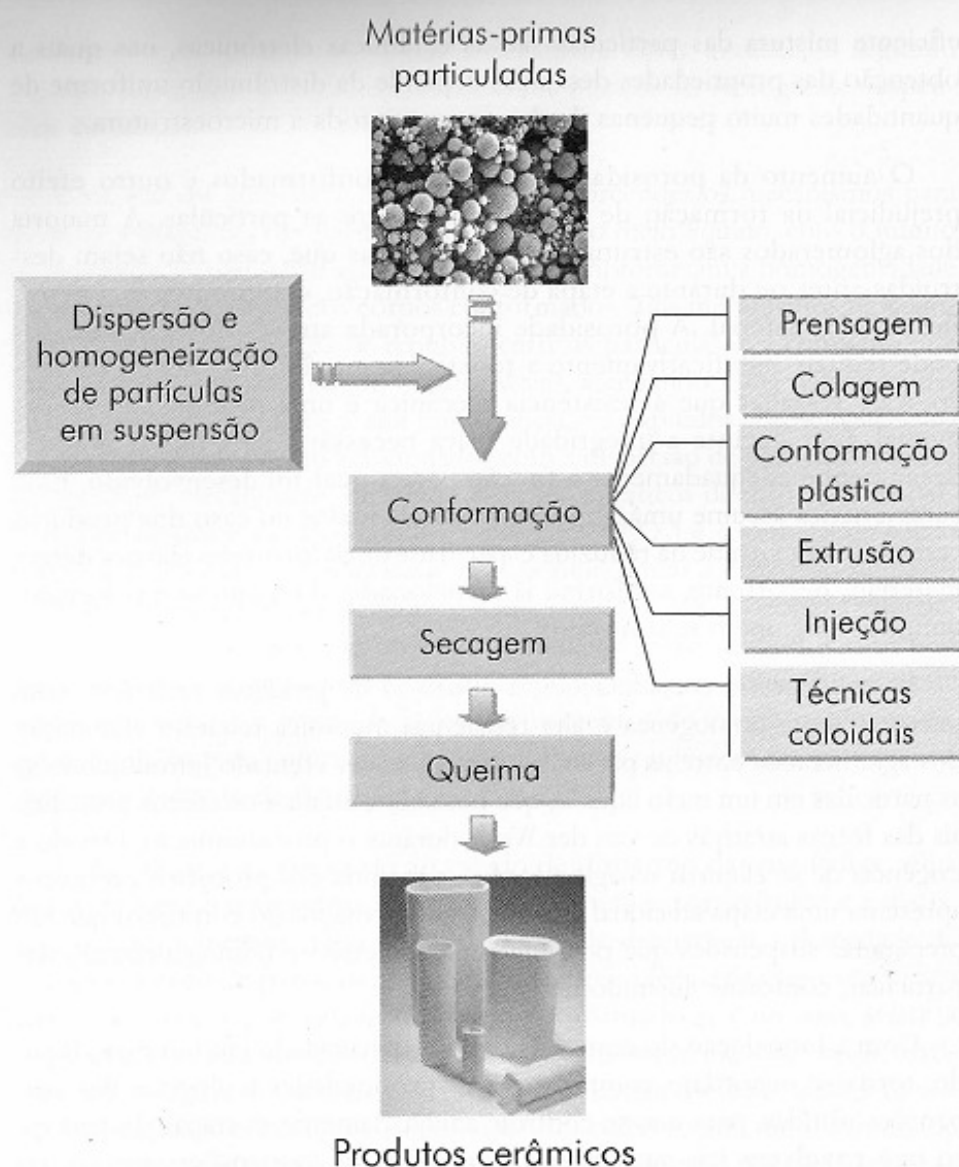


Figura 1.1: Principais etapas usualmente envolvidas no processamento de materiais cerâmicos.

tem importância significativa para o bom desempenho de um produto cerâmico, pois permite que diferentes regiões de um mesmo compacto apresentem propriedades semelhantes. No caso de cerâmicas refratárias, por exemplo, a distribuição inadequada das fases cristalinas do material pode gerar fusão localizada a altas temperaturas, que comprometeria a integridade da peça em serviço. Outros materiais que ilustram a necessidade de uma

eficiente mistura das partículas são as cerâmicas eletrônicas, nas quais a obtenção das propriedades desejadas depende da distribuição uniforme de quantidades muito pequenas de dopantes por toda a microestrutura.

O aumento da porosidade dos corpos conformados é outro efeito prejudicial da formação de aglomerados entre as partículas. A maioria dos aglomerados são estruturas ocas e porosas que, caso não sejam destruídas antes ou durante a etapa de conformação, comprometem a densificação do material. A porosidade incorporada através dos aglomerados pode reduzir significativamente a resistência mecânica do corpo cerâmico. Vale ressaltar que a resistência mecânica é uma propriedade fundamental, pois garante a integridade física necessária para que o produto desempenhe adequadamente a função para a qual foi desenvolvido. Essa característica assume uma importância ainda maior no caso dos produtos cerâmicos em virtude da reduzida capacidade de deformação plástica desses materiais, decorrente, conforme já mencionado, da natureza das ligações químicas que unem seus átomos.

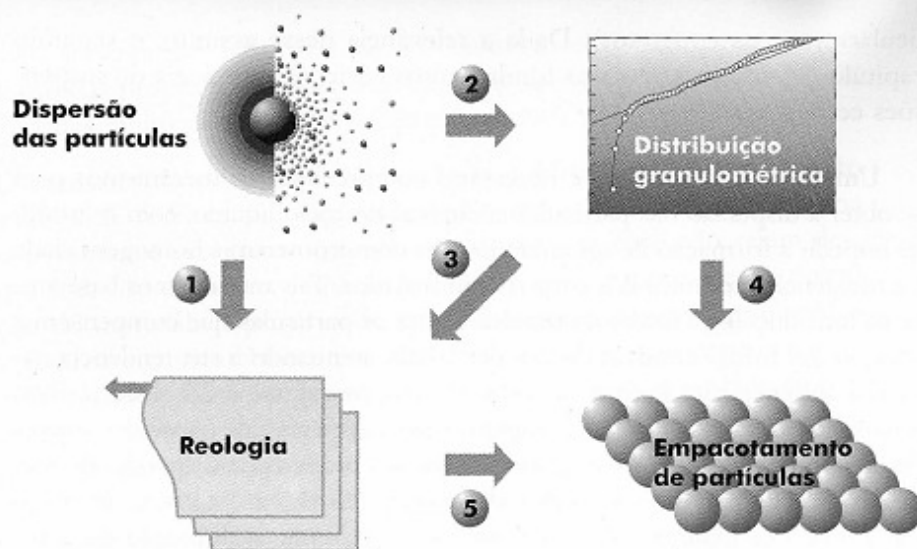
Baseado nestas considerações, a obtenção de produtos cerâmicos com microestrutura homogênea e alta resistência mecânica requer a eliminação dos aglomerados entre as partículas. Isso pode ser efetuado introduzindo-se as partículas em um meio líquido, que possibilite atenuar os efeitos prejudiciais das forças atrativas de van der Waals durante o processamento. Devido à exigência de se eliminar os aglomerados, a maioria dos processos cerâmicos apresenta uma etapa adicional anterior à conformação do corpo, em que são preparadas suspensões que possibilitam a dispersão e homogeneização das partículas, conforme ilustrado na figura 1.1.

Com a introdução do material cerâmico particulado em um meio líquido, torna-se necessário compreender as propriedades reológicas das suspensões obtidas, para que se controle adequadamente as etapas do processo que envolvem tais suspensões. A reologia de suspensões consiste no estudo da deformação ou fluxo de fluidos viscosos decorrente da aplicação de uma tensão ou pressão externa. O domínio da reologia das suspensões cerâmicas é primordial para a sua eficiente homogeneização e para a minimização de custos do processo, uma vez que afeta diretamente o comportamento das suspensões durante a mistura e as suas características de bombeamento e transporte. O comportamento reológico das suspensões adquire importância ainda maior em certos tipos de aplicação em que o produto exige a adição de um meio líquido para sua instalação, como é o caso, por exemplo, de pastas para serigrafia, tintas e refratários monolíticos (par-

ticularmente os concretos). Dada a relevância desse assunto, o segundo capítulo deste livro aborda os fundamentos básicos de reologia de suspensões cerâmicas.

Uma vez em suspensão, é necessário compreender os mecanismos para se obter a dispersão das partículas cerâmicas no meio líquido, com o intuito de impedir a formação de aglomerados que comprometam a homogeneidade e a resistência mecânica dos corpos conformados. Tais mecanismos baseiam-se na introdução de forças de repulsão entre as partículas que compensem a atuação das forças atrativas de van der Waals, atenuando a sua tendência natural à aglomeração. Face à sua importância, os capítulos 3 e 4 deste livro tratam dos aspectos gerais relacionados com a dispersão de partículas através de diferentes mecanismos, incluindo exemplos práticos de dispersão de partículas de óxidos e de não-óxidos. A alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o carbetto de silício (SiC) foram os materiais selecionados para representar a dispersão de partículas desses tipos, respectivamente, devido à vasta utilização dessas matérias-primas para a fabricação de produtos cerâmicos. Esses capítulos mostram que a dispersão das partículas é fundamental, não só para otimizar a etapa de homogeneização e a porosidade (empacotamento) do corpo conformado, como também para controlar o comportamento reológico das suspensões, conforme ilustrado na figura 1.2.

Outro fator que, associado ao estado de dispersão das partículas, afeta de forma significativa o processamento de sistemas particulados é a distribuição granulométrica (figura 1.2). Pelo fato de determinar a densidade de empacotamento de partículas, a distribuição granulométrica tem um efeito marcante sobre a porosidade do corpo conformado e, com isso, sobre a resistência mecânica do produto cerâmico. Conforme indicado esquematicamente na figura 1.2, a distribuição granulométrica também afeta a reologia das suspensões cerâmicas, que depende, entre outros, da distância de separação entre as partículas no meio líquido. Tendo em vista a sua relevância no processamento cerâmico, os aspectos gerais relacionados com a distribuição granulométrica, incluindo o efeito de diversos modelos teóricos sobre o empacotamento de sistemas particulados, são apresentados no capítulo 5 do livro. Ênfase especial será dada à distribuição granulométrica de concretos refratários, devido à sua extensa faixa de tamanho de partículas ( $\sim 0,1 \mu\text{m}$  a  $5 \text{ mm}$ ). Ainda assim, os conceitos abordados no capítulo 5 também são válidos para o caso de suspensões cerâmicas convencionais contendo partículas com tamanho dentro da extensa faixa granulométrica dos concretos.



**Figura 1.2:** Diagrama esquemático indicando a influência da dispersão das partículas e da distribuição granulométrica sobre a reologia e o empacotamento de partículas, evidenciando a sinergia existente entre essas variáveis.

Embora sejam muitas vezes tratadas isoladamente, a dispersão de partículas e a distribuição granulométrica apresentam elevada sinergia, afetando simultaneamente tanto a reologia das suspensões como o empacotamento das partículas do sistema, como mostra a figura 1.2. Todas estas interações serão ilustradas em maiores detalhes ao longo dos capítulos 3, 4 e 5 deste livro.

As considerações apresentadas mostram que a dispersão das partículas em suspensão e a distribuição granulométrica são fatores que determinam uma série de características dos corpos conformados, independentemente do tipo de conformação envolvido no processo. Considerando-se que a maior parte das propriedades finais dos produtos cerâmicos são determinadas pelas características dos corpos após a etapa de conformação, é razoável supor que a natureza e o grau de dispersão das partículas em suspensão e as respectivas distribuições granulométricas são variáveis fundamentais do processamento cerâmico. Em decorrência disso, o principal objetivo deste livro é mostrar como conceitos fundamentais para se obter a dispersão de partículas e controlar a distribuição granulométrica podem ser empregados como ferramentas básicas para a previsão, controle e otimização do processamento dos materiais cerâmicos, com o in-

tuito de obter produtos de alto desempenho ao final do processo. A princípio, tais conceitos fundamentais podem ser aplicados a quaisquer dos diversos processos de fabricação de cerâmicas que envolvem a preparação de suspensões de partículas.