

UM ESTUDO TEÓRICO SOBRE A SINTERIZAÇÃO NA METALURGIA DO PÓ

F. Iran Gomes de Brito

irangomesbrito@yahoo.com.br

Katarine F. Medeiros

kakafmedeiros@yahoo.com.br

Jorge Magner Lourenço

Professor do Departamento de Tecnologia Industrial – CEFET-RN

magner@cefetrn.br

RESUMO

Sinterização pode ser definida como um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas de determinado material, inicialmente em contato mútuo, adquira resistência mecânica. Durante a sinterização, a porosidade da estrutura é fechada. Para isto, material deve ser deslocado para preencher os espaços vazios, a maneira que ocorre este processo identifica os mecanismos para acelerar a sinterização que são: a sinterização por fase sólida, fase líquida, sinterização ativada, sinterização reativa. Técnica de sinterização pode ser entendida como o método usado na prática para se obter a sinterização de um dado sistema. As técnicas de sinterização serão divididas aqui em técnicas tradicionais e técnicas inovadoras. Inovadoras no sentido que elas são recentes e, aparentemente, vêm acompanhadas de efeitos não vistos nas técnicas tradicionais. Como técnicas tradicionais, pode-se citar a sinterização em forno resistivo, que é, de longe, a mais empregada na rotina industrial e de pesquisa em laboratório; a sinterização com auxílio de pressão e a sinterização reativa. Como exemplos de técnicas aqui consideradas inovadoras, que têm dado resultados interessantes, pode-se citar a sinterização por microondas, a sinterização por laser e a sinterização por plasma, onde as mesmas serão descritas no presente trabalho.

Palavras - Chave: Sinterização, Metalurgia do Pó, Técnicas e Mecanismos de Sinterização

UM ESTUDO TEÓRICO SOBRE A SINTERIZAÇÃO NA METALURGIA DO PÓ

1. INTRODUÇÃO

A Metalurgia do pó, comumente denominada a arte de produzir artefatos, em escala comercial, através da aplicação de pressão sobre pós metálicos, cerâmicos ou cermetes (metal + cerâmica) , vem a ser um processo altamente desenvolvido de manufatura de peças metálicas ferrosas e não ferrosas [14].

A aplicação de calor durante ou após a compactação é utilizada para aumentar a ligação entre as partículas. Este processo de aquecimento abaixo do ponto de fusão é conhecido como sinterização.

Basicamente, os pós metálicos são configurados em ferramental apropriado com posterior aquecimento sob condições controladas a temperaturas abaixo do ponto de fusão do metal base para promover ligação metalúrgica entre as partículas.

Sinterização pode ser definida como um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas de determinado material, inicialmente em contato mútuo, adquira resistência mecânica. Sua força motora é o decréscimo da energia superficial livre do conjunto de partículas, conseguido pela diminuição da superfície total do sistema. Em muitas ocasiões, isto traz como consequência a eliminação do espaço vazio existente entre as partículas, resultando em um corpo rígido e completa ou parcialmente denso. A sinterização é utilizada para se fabricar peças metálicas, cerâmicas e compósitos metal-cerâmica, sendo parte integrante e principal de técnicas denominadas metalurgia do pó e cerâmica, que se incumbem justamente da fabricação de produtos metálicos e cerâmicos a partir dos pós dos constituintes [16]. Esse aquecimento, chamado sinterização, normalmente confere à massa de pó aglomerada as propriedades físicas e mecânicas desejadas.

Este trabalho tem como objetivo apresentar os tipos de cinética de reação e as técnicas de sinterização, mostrando a maneira como tais processos ocorrem.

No entanto é necessário diferenciar inicialmente tipo de sinterização e técnica de sinterização, que segundo ANGELUS & CLODOMIRO, considera-se tipo de sinterização como a forma com a qual a sinterização procede, ou seja, a cinética de sinterização, que é caracterizada pelos mecanismos operantes responsáveis pelo fechamento da porosidade. Técnica de sinterização pode ser entendida como o método usado na prática para se obter a sinterização de um dado sistema, ou seja, a forma adotada para se conseguir as condições necessárias para a ocorrência de sinterização.

2. ETAPAS DO PROCESSO DA METALURGIA DO PÓ

A tecnologia da Metalurgia do Pó baseia-se na prensagem de pós em moldes metálicos e consolidação da peça por aquecimento controlado. O resultado é um produto com a forma desejada, bom acabamento de superfície, composição química e propriedades mecânicas controladas. O processo da metalurgia envolve quatro etapas fundamentais: a obtenção, a

mistura, compactação e a sinterização dos pós, como pode ser visto no esquema abaixo. (figura 1)

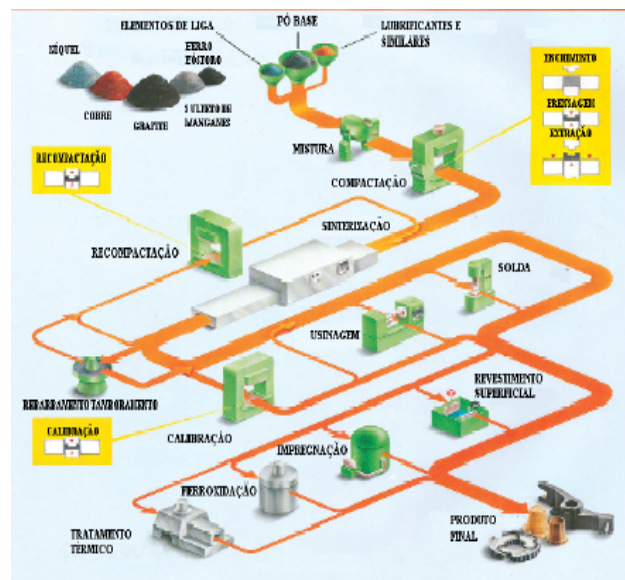


Figura 1. Etapas do Processo da Metalurgia do Pó

3. MECANISMOS PARA ACELERAR A SINTERIZAÇÃO

Existem, rigorosamente falando, dois tipos básicos de sinterização: a sinterização por fase sólida e a sinterização por fase líquida. A força motora para a ocorrência de qualquer tipo de sinterização é a diminuição da energia livre superficial do conjunto de partículas. Esta diminuição ocorre por meio do desaparecimento da interface material/poro, que é substituída pela interface material/material, quando a porosidade desaparece. Estes dois tipos básicos de sinterização são capazes de densificar total ou parcialmente a estrutura, sendo que com o primeiro tipo é possível se obter uma estrutura com porosidade controlada, enquanto que o fechamento total da porosidade é mais facilmente obtido através da sinterização por fase líquida.[16]

Durante a sinterização, a porosidade da estrutura é fechada. Para isto, material deve ser deslocado para preencher os espaços vazios. É justamente o modo como este material é deslocado que indica o tipo de sinterização. Deste ponto de vista, a cinética de sinterização difere grandemente quando existe ou não um líquido presente na estrutura. Por isso, o processo de sinterização é dividido nos tipos básicos citados anteriormente.

Dentro destas classes básicas, existem muitas variações de cinética de sinterização, devido a enorme variedade de materiais sinterizáveis, suas relações e as relações entre estas e os fatores geométricos significantes (tamanho e forma de partículas). Devido a isto, quando se deseja determinar a cinética de sinterização de dado sistema, a rigor, deve-se examinar criteriosamente o caso específico, usando as teorias como subsídio, ao invés de se tentar enquadrar o processo dentro das teorias existentes, como é usualmente feito.[16]

3.1. Sinterização por Fase Sólida

Na sinterização por fase sólida, material é transportado sem que haja qualquer tipo de líquido na estrutura. Existem diversas formas de transporte de material: por fluxo viscoso (caso dos vidros, materiais amorfos e também cristalinos, submetidos à pressão), por difusão atômica (os cristais) ou por transporte de vapor (materiais com alta pressão de vapor). Em todos estes casos, material é transferido para a região de contato entre partículas vizinhas. Outras formas de transporte, até mais eficientes do que estas citadas, devem ser consideradas porque envolvem deslocamento de partículas inteiras, como deslizamento e rotação de partículas, e não deslocamento de átomos individuais. Sejam quais forem os mecanismos atuantes, rigidez e densificação são conseguidas pelo aumento da área de contato entre as partículas e o melhor empacotamento de matéria. Outros mecanismos podem ser encontrados em sistemas particulares [16].

3.2. Sinterização por Fase Líquida

A sinterização por fase líquida acontece devido à formação de líquido na estrutura. Este líquido pode ser causado pela fusão de um dos componentes do sistema ou pode ser o resultado de uma reação entre, pelo menos, dois dos componentes do sistema. A ocorrência deste líquido tem papel decisivo na determinação dos mecanismos de sinterização e do aspecto final da estrutura sinterizada. A sinterização com fase líquida é um modo bastante atraente de consolidação de materiais dificilmente sinterizáveis por fase sólida e para a obtenção de materiais compósitos.

3.3. Sinterização Ativada

Pode-se falar ainda de um terceiro tipo de sinterização, a sinterização ativada, mas este pode ser enquadrado sempre como um caso especial de sinterização por fase sólida ou líquida. Genericamente, sinterização ativada significaria ativar os mecanismos de sinterização para promover sinterização mais rápida; entretanto, na prática, este nome designa especificamente o uso de substâncias, denominadas ativadores, para provocar a aceleração dos mecanismos de sinterização.

3.4. Sinterização Rápida

Outra forma de se acelerar os mecanismos de sinterização, denominado aqui sinterização rápida, é o simples aumento da velocidade de aquecimento da amostra. Por razões não constantes na teoria de sinterização por fase sólida, os mecanismos de transporte de matéria são ativados, quando se aumenta a taxa de aquecimento. Este tipo de sinterização, incluindo a possibilidade de sua aplicação, será discutido adiante [16].

4. TÉCNICAS DE SINTERIZAÇÃO

Técnica de sinterização, conforme já mencionado, pode ser entendida como o método usado na prática para se obter a sinterização de um dado sistema. As técnicas de sinterização serão divididas aqui em técnicas tradicionais e técnicas inovadoras. Inovadoras no sentido que elas são recentes e, aparentemente, vêm acompanhadas de efeitos não vistos nas técnicas tradicionais. Como técnicas tradicionais, pode-se citar a sinterização em forno resistivo, a sinterização com auxílio de pressão, e a sinterização

reativa. Como exemplos de técnicas aqui consideradas inovadoras, que têm dado resultados interessantes, pode-se citar a sinterização por microondas, a sinterização por laser e a sinterização por plasma.

4.1. Técnicas Tradicionais de Sinterização

4.1.1. Sinterização em forno resistivo: É a mais usada tanto em escala industrial como em escala de laboratório. Trata-se simplesmente de usar um forno resistivo. Em algumas ocasiões, o elemento aquecedor é a própria amostra. A estrutura sinteriza apenas com o auxílio da temperatura. Geralmente, trabalha-se com baixas taxas de aquecimento e resfriamento, devido "à inércia térmica dos fornos". Pode-se ainda manipular a atmosfera de sinterização. Os fornos resistivos são os de mais fácil fabricação e permitem o processamento de uma maior quantidade de amostras cada vez [16].

4.1.2. Sinterização com auxílio de pressão: Nesta técnica, dois fatores promotores de sinterização são usados simultaneamente: temperatura e pressão. A temperatura promove o aumento de transporte de material e a pressão intensifica ainda mais este transporte por deformação plástica e deslizamento de partículas inteiras. Este método é recomendado quando se deseja sinterizar materiais que são dificilmente sinterizados somente por aquecimento, como as cerâmicas covalentes, ou quando se quer garantir o fechamento completo da porosidade de estruturas usualmente sinterizadas apenas por aquecimento. Existem basicamente dois modos de sinterização sob pressão: a prensagem isostática a quente e a prensagem uniaxial a quente. Pode-se citar ainda a *Sinter-HIP* que é na verdade uma combinação entre sinterização em forno resistivo, seguida de prensagem isostática a quente. Comparando-se os fornos usados, a prática e a versatilidade da sinterização em forno resistivo, a sinterização com pressão é muito mais complicada e dispendiosa.

4.1.3. Sinterização reativa: Esta técnica de sinterização diferencia-se das demais antes apresentadas por utilizar uma reação entre os componentes do material para auxiliar o processo de sinterização. Reações entre componentes podem criar novas fases, com diferentes molhabilidades, energias superficiais e difusividades; gradientes de composição, que promovem difusão atômica; e liberação de energia, se a reação é exotérmica, que aumenta a temperatura da amostra, aumentando conseqüentemente a difusão atômica sem que seja necessário maior gasto de energia no forno de sinterização. É claro que somente aqueles sistemas que apresentam reações entre componentes que contribuam para o processo de sinterização podem ser assim sinterizados, pois existem também sistemas reagentes cujos resultantes se opõem à cinética de sinterização, de modo que pode ser impossível sinterizar tais sistemas. Este tipo de sinterização não requer equipamentos especiais, podendo ser conduzido em fornos resistivos normais [16].

4.2. Técnicas Inovadoras de Sinterização

4.2.1. Sinterização por microondas: A técnica de sinterização utilizando aquecimento por microondas (MS) já vem sendo pesquisada desde as duas últimas décadas. O aquecimento da amostra sinterizada por esta técnica, ocorre pela dispersão de energia eletromagnética numa faixa de microondas selecionadas para este fim, geralmente 2,45 GHz. Há uma variedade de materiais cerâmicos sendo processados a partir dessa técnica de sinterização, obtendo-se resultados satisfatórios como microestrutura uniforme, alta densidade e significativa economia de energia. O crescente interesse pelo processo de sinterização por microondas torna-se evidente devido ao fato das ondas eletromagnéticas interagirem com o

compactado, aquecendo-o uniformemente em níveis menores de temperaturas de sinterização e resultando em melhores propriedades mecânicas, diferentemente do aquecimento convencional, onde o calor é aplicado na superfície da peça, alcançando o núcleo por condução térmica e produzindo gradientes de tensões e temperaturas [11].

4.2.2. Sinterização seletiva por laser: Esta técnica de sinterização consiste em dirigir um feixe de laser sobre a amostra, provocando aquecimento. Esta técnica ainda não é usada para sinterização em escala industrial, assim como as demais. Ela foi desenvolvida para o trabalho de prototipagem rápida com polímeros; entretanto, pesquisas estão sendo conduzidas para o trabalho com metais e cerâmicas.

O equipamento de sinterização a laser emite um feixe de laser que é refletido em um espelho que se move, permitindo que o feixe faça uma varredura sobre uma camada de pó solto. O calor gerado pelo laser funde a parte mais externa das partículas do polímero. A região atingida pelo laser sofre então sinterização e assume a forma de placa. Uma nova camada do pó solto é colocada sobre a primeira camada (logo, também sobre a placa) e o feixe faz nova varredura, sinterizando nova placa. Neste processo, as diferentes placas são unidas umas às outras por sinterização. Como o campo de varredura do feixe laser pode ser ajustado a forma das placas sinterizadas obtidas são as mais variadas e, conseqüentemente, a forma do corpo sinterizado final, que é crescido de baixo para cima, camada por camada.

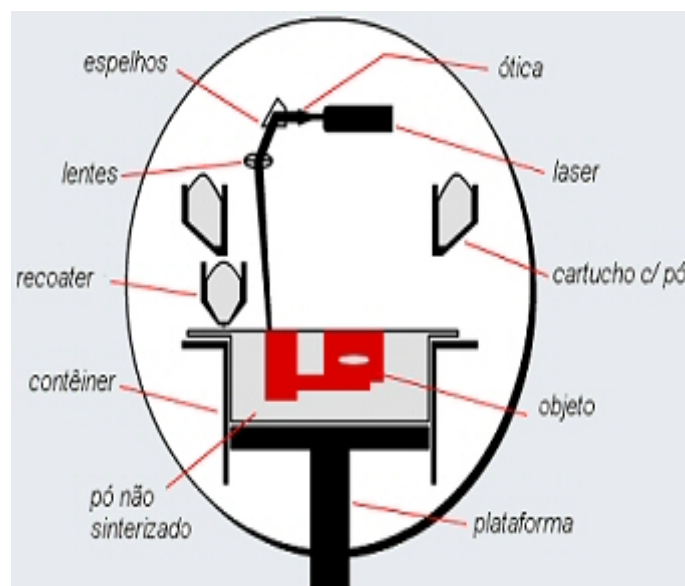


Figura 2. Esquema de um sistema de sinterização a laser (EOS, 2002).

4.2.3. Sinterização por plasma: O plasma é um gás que apresenta certo grau de ionização de seus constituintes, sendo, portanto, um gás condutor elétrico. O plasma pode ser gerado com o uso de energia que provoque ionização em certo nível que garanta sua estabilidade, a energia ionizante. São três os tipos mais empregados de energia ionizante: calor, radiação e descarga elétrica.

A sinterização por plasma consiste em expor a amostra sob sinterização a um plasma inerte ou reativo. O aquecimento se dá por bombardeio dos íons do plasma sobre a superfície

externa da amostra, principalmente, caso a amostra esteja em contato direto com o plasma, ou por radiação, caso a amostra esteja isolada. Em ambos os casos, o aquecimento da amostra acontece de seu exterior para o interior. O aquecimento pode se dar muito rapidamente, possibilitando taxas de aquecimento da ordem de 150 °C/min e, devido à condução de calor na amostra, grandes gradientes de temperatura na amostra são teoricamente possíveis.

Não apenas aquecimento produz o bombardeio iônico sobre a superfície externa da amostra. Defeitos são também produzidos, seja pela implantação de íons na rede do material, arrancamento de átomos da rede (sputtering) ou a criação de desordem na rede cristalina. Estes defeitos, logicamente, modificam as propriedades superficiais das partículas e, por conseguinte, sua sinterização. O plasma pode, portanto, produzir mais efeito sobre a cinética de sinterização que simplesmente aquele provocado pelo rápido aquecimento. É importante ressaltar, todavia, que este efeito deve ser produzido apenas na superfície externa das amostras, uma vez que o plasma não penetra na porosidade da amostra verde, não havendo, então, produção de defeitos nas partículas interiores. Assim, este tipo de influência deve se restringir ao exterior da amostra e sua influência total sobre a sinterização pode ser desprezível, mas não necessariamente sua influência sobre as propriedades mecânicas da peça [10].

Em geral, processos a plasma envolvem reações físicas e químicas que ocorrem entre partículas e superfícies sólidas em contato com o plasma. Alguns exemplos são: erosão por plasma, deposição de filmes finos, proteção de superfícies por tratamentos especiais, endurecimento de superfícies, e implantação iônica

5. CONCLUSÕES

A Metalurgia do Pó surgiu como alternativa para a realização de processos que consumiriam muita energia, uma vez que alguns materiais possuem um alto ponto de fusão, e em algumas ocasiões, características desses materiais são indispensáveis em uma aplicação específica.

A consideração dos aspectos econômicos torna ainda mais significativos quando se fabricam peças de formas complexas, tolerâncias dimensionais rigorosas e grandes lotes de produção.

Fundamentalmente, a sinterização é um processo onde a economia de material é levado ao extremo: não há geração de cavacos (os quais numa usinagem convencional podem representar até 50% do peso original da peça bruta), nem carepas, e tendo ainda a vantagem de, controlando-se a densidade, eliminar pesos mortos indesejáveis no produto final. Mesmo levando em consideração à necessidade de operações posteriores de usinagem, uma peça sinterizada normal, usa mais de 97% de sua matéria original.

Conclui-se que é de extrema importância o incentivo e o investimento na pesquisa na área da Metalurgia do pó, uma vez que é comprovada sua eficácia tanto no tocante das propriedades de seus produtos resultantes, quanto no fator econômico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Exner, Principles of Single Phase Sintering, Reviews on Powder Metallurgy and Physical Ceramics, **1**, 1-4 (1979).
- [2] A. G. P. Da Silva, C. Alves Jr., Cerâmica, submetido.
- [3] R. M. German, Liquid Phase Sintering, Plenum Press, New York (1985).
- [4] R. M. German, J. Metals, **38**, 8 (1986) 26.
- [5] J. Cheng, J. Qiu, J. Zhou, N. Ye, Microwave Processing Materials III, **269** (1992) 323.
- [6] S. Vodegel, Ber DKG, **44** (1996) 1.
- [7] K. L. Nutt, web page: <http://www.cranfield.ac.uk/coa/rapid/proceeding/nutt.html>
- [8] M. Agarwala, D. Bourell, J. Beaman, H. Marcus, J. Barlow, Rapid Prototyping Journal, **1**, **1** (1995) 26.
- [9] K. Subramanian, N. Vail, J. Barlow, H. Marcus, Rapid Prototyping Journal, **1**, 2 (1995) 24.
- [10] E. L. Kemer, D. L. Johnson, Am. Ceram. Soc. Bull., **64**, 8 (1985) 1132.
- [11] LOURENÇO, J. M.; Tese de doutorado: Sinterização a plasma.
- [12] NUNES, R.A.; Notas de aulas da disciplina Conformação de Materiais, PUC-RIO, 2003, disponível em: <http://www.dcm.puc-rio.br/~ranunes/org/introdução-2003.pdf>.
- [13] METALURGIA DO PÓ, disponível em:
<http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/temoutros/cursoprofissionalizante/tc2000/processos/65proc.pdf>
- [14] METALURGIA DO PÓ, disponível em:
<http://cursos.unisanta.br/mecanica/polari/sinterizacao.html>
- [15] GRUPO DE TECNOLOGIA DO PÓ, disponível em:
<http://www.qualisinter.com.br/processo.htm>
- [16] SILVA, A.G.P., ALVES JUNIOR, C.; A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização.
- [17] METALURGIA DO PÓ, disponível em:
http://meusite.mackenzie.com.br/carlosmonezi/seminarios/1o_semestre/1_2003/metalurgia_do_po
- [18] SINTERIZAÇÃO A PLASMA, disponível em:
http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_sitio/texto/pagina_inicial_do_LAP.htm