

OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DE CURVAS DE COMPRESSIBILIDADE DE DIVERSOS METAIS¹

*Kahl Dick Zilnyk²
Oswaldo Mitsuyuki Cintho³*

Resumo

Um novo método semi-automatizado de construção de curvas de compressibilidade foi desenvolvido e utilizado para obter curvas mais precisas e detalhadas de diversos pós metálicos puros que as apresentadas em trabalhos anteriores. A alta resolução das curvas obtidas permitiu fazer uma inovadora análise gráfica dos mecanismos de compactação para determinar a tensão ideal de compactação, o que pode ajudar a reduzir custos e tempos de elaboração de projetos da metalurgia do pó.

Palavras-chave: Metodologia; Metalurgia do pó; Curva de compressibilidade; Mecanismos de compactação.

OBTAINMENT AND EVALUATION OF COMPRESSIBILITY CURVES OF VARIOUS METALS

Abstract

A new semi-automated method for constructing compressibility curves was developed and used to obtain more accurate and detailed curves of various pure metallic powders than ones presented in previous work. The high resolution of the obtained curves allowed an innovative graphical analysis of the compression mechanisms to determine the ideal compression stress, what can help reducing costs and time in powder metallurgy projects elaboration.

Key words: Methodology; Powder metallurgy; Compressibility curve; Compaction mechanisms.

¹ *Contribuição técnica ao 11º Seminário de Metais Não Ferrosos, 1 a 3 de setembro de 2009, São Paulo, SP.*

² *Graduando em Engenharia de Materiais Kahl Dick Zilnyk. Universidade Estadual de Ponta Grossa*

³ *Universidade Estadual de Ponta Grossa – Departamento de Engenharia de Materiais.*

1 INTRODUÇÃO

A Metalurgia do Pó (PM) é um método já desenvolvido e bem estabelecido para a fabricação de componentes ferrosos e não ferrosos. A PM é economicamente vantajosa frente a outras técnicas de produção, uma vez que minimiza a necessidade de usinagem e acabamento superficial, e mantém uma estreita tolerância dimensional. O processo de fabricação mais usual por PM inclui compactação a frio em matriz rígida e posterior sinterização. A compactação é a principal etapa responsável pela densificação da massa de pó, e consiste no aumento da densidade aparente do material através da aplicação de uma tensão externa.⁽¹⁻⁶⁾

Compressibilidade pode ser definida como a tensão necessária para conferir a uma determinada massa de pó certa densidade, a qual geralmente é dada em relação à densidade teórica do material.⁽⁶⁾ Portanto, a densidade a verde (densidade do compactado antes da sinterização) é uma função da tensão aplicada e das propriedades do material em pó. O ensaio tradicional para determinar a compressibilidade de uma massa de pó é regulamentado por normas de instituições como ASTM, MPIF e ISO.⁽⁷⁻⁹⁾ A relação entre tensão aplicada e densidade aparente é melhor observada em uma Curva de Compressibilidade, como as mostradas na Figura 1. Entretanto, os métodos tradicionais de obtenção destas curvas são essencialmente manuais e de precisão limitada, restringindo seu uso prático.^(5,6) Um dos objetivos deste trabalho é apresentar uma nova metodologia criada para a obtenção de curvas de compressibilidade. Este novo método semi-automatizado permite a construção de curvas mais precisas e detalhadas com grande economia de material.

Apesar de ser uma etapa chave do processo de fabricação, ainda há muitas incertezas a respeito do processo de compactação.⁽¹⁰⁾ Sabe-se que para metais dúcteis, no início da compactação, o atrito entre as partículas de pó é suficientemente baixo para permitir que elas deslizem umas sobre as outras, melhorando o empacotamento. As propriedades físicas das partículas, como tamanho e formato, são cruciais nesta etapa. Com o aumento da tensão, passa a ocorrer deformação elasto-plástica. Assumindo o formato das partículas como sendo perfeitamente esféricas, elas se deformariam a partir da superfície de contato com a matriz e com as outras partículas, até atingir o formato aproximado de um prisma retangular. A partir do momento que não há mais espaço vazio hábil ao preenchimento no interior do compactado, a deformação que ocorre deste ponto em diante passa a ser majoritariamente elástica.^(1-3,6,11,12)

É a deformação plástica que garante a resistência a verde do compactado [1,4,6], porém a deformação elástica apresentada no estágio final da compressão é prejudicial, pois parte dela não é eliminada durante o descarregamento devido ao atrito entre o pó e as paredes internas da matriz, sendo recuperada somente quando o compactado é ejetado da matriz. Esta expansão súbita, chamada de “springback” favorece a propagação de trincas e a quebra da amostra a verde.^(11,13)

Nos materiais dúcteis, a compressibilidade aumenta com o tamanho de partícula, pois quanto maior este, maior a capacidade de deformação plástica do material.^(1-3,6,10) Pós metálicos contendo granulometrias diversas também atingem melhores compactações, pois as partículas menores ocupam os espaços vagos entres partículas maiores.^(1,9,10)

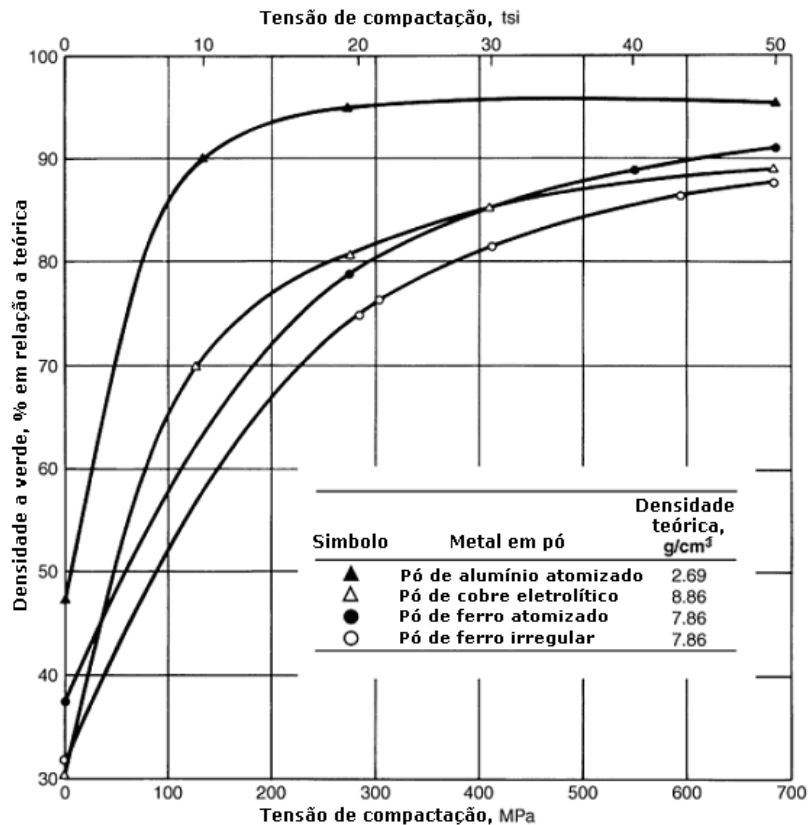


Figura 1. Curva de compressibilidade para diversos metais em pó.⁽⁶⁾

A necessidade de se compreender melhor os mecanismos de compactação, para assim reduzir tempos e custos de projetos, tem levado muitos pesquisadores a estudar o tema.⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ Este trabalho também propõe um método gráfico para determinar o intervalo de atuação dos mecanismos de deformação, que, apesar de ser essencialmente empírico, traz a vantagem de ser de simples utilização e fácil leitura. Através dele torna-se possível estimar com satisfatória precisão a tensão ideal de compactação, de modo a garantir boa densificação e resistência a verde, sem submeter a peça a tensões desnecessariamente elevadas, que além de encarecer o ferramental e o processo, podem danificá-la devido ao efeito.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 2 mostra um fluxograma do método criado para a obtenção das curvas de compressibilidade. Foi utilizado 1 grama de pó por ensaio. Para a parte automatizada, utilizou-se uma máquina de ensaios universal Autograph II, da marca Shimadzu, com capacidade para 300 kN. A matriz empregada possuía diâmetro interno igual a 8mm, e era lubrificada antes dos ensaios com solução de ácido esteárico em etanol. A principal virtude deste novo método é permitir construir uma curva com qualquer número de pontos usando uma única massa de pó, ou seja, dispensar a contínua ejeção e preenchimento da matriz a cada ponto, o que reduz muito o erro experimental.

Um compactado comprimido no interior de uma matriz rígida apresenta deformação elástica. Quando a tensão é aliviada, parte desta deformação não é recuperada devido ao atrito com as paredes internas da matriz. Como neste novo método a altura do compactado é medida com no interior da matriz, é necessário

levar a deformação elástica retida em consideração, descontando-a antes do cálculo da densidade. (2,4,12,15)

Considerou-se que a deformação retida é proporcional a altura instantânea do compactado, portanto aferindo-se manualmente a altura final após a ejeção e relacionando-se este valor com a última altura instantânea registrada, é possível corrigir as demais.

Amostras de cobre em diferentes estágios de compactação foram quebradas e analisadas por MEV, a fim de investigar a presença e o nível de deformação plástica das partículas de pó.

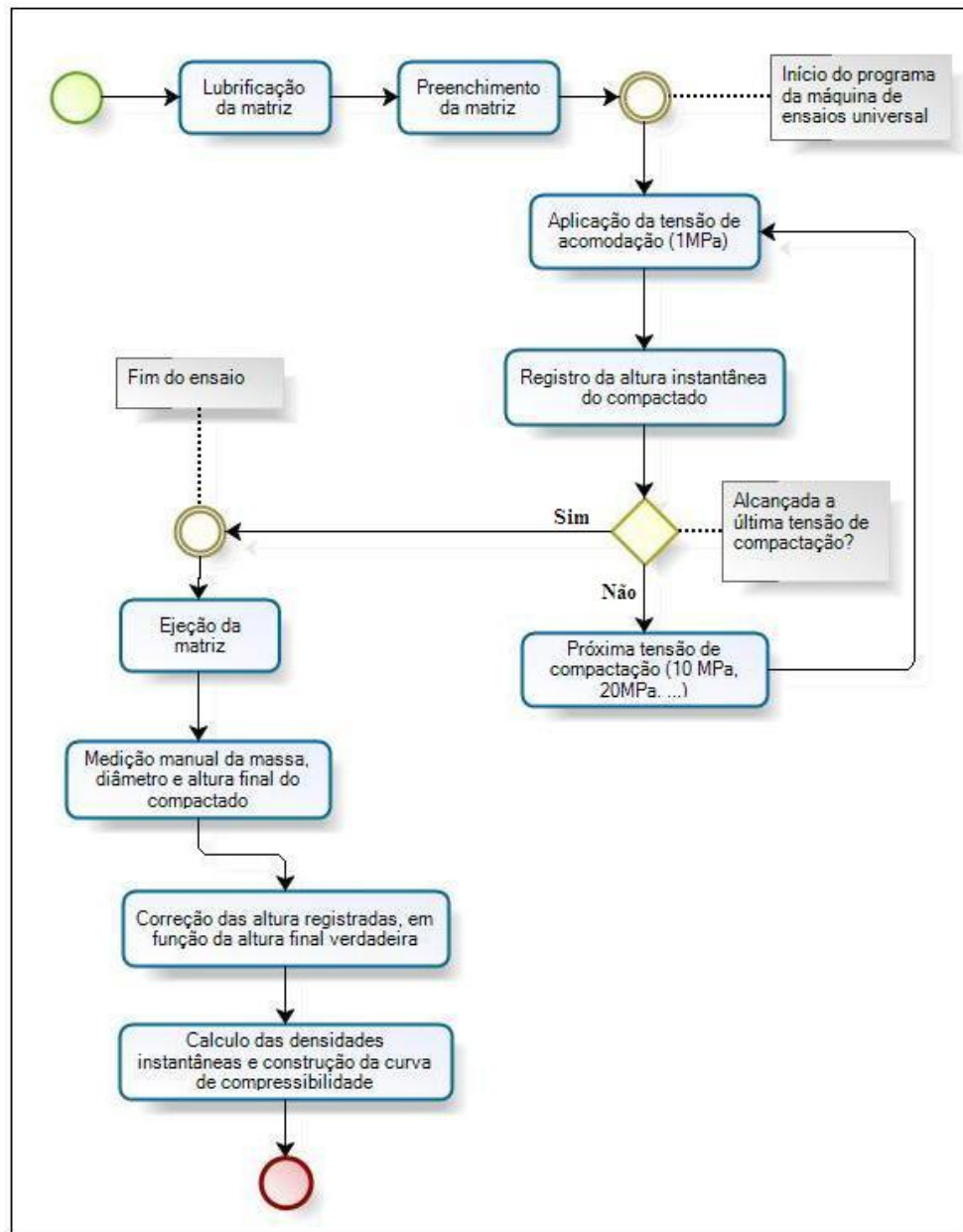


Figura 2. Fluxograma da metodologia criada para obtenção de Curvas de Compressibilidade.

3 RESULTADOS

A Curva de Compressibilidade da Figura 3, com 39 pontos, foi construída com pó de ferro puro. Foram feitas cinco repetições do ensaio, apresentando no gráfico o

valor médio. Para todos os pontos, o desvio padrão manteve-se abaixo de 5%. Juntamente na Figura 3, estão mostrados os pontos da curva de compressibilidade do pó de ferro com morfologia irregular, mostrada na literatura e reproduzido na Figura 1.⁽⁶⁾

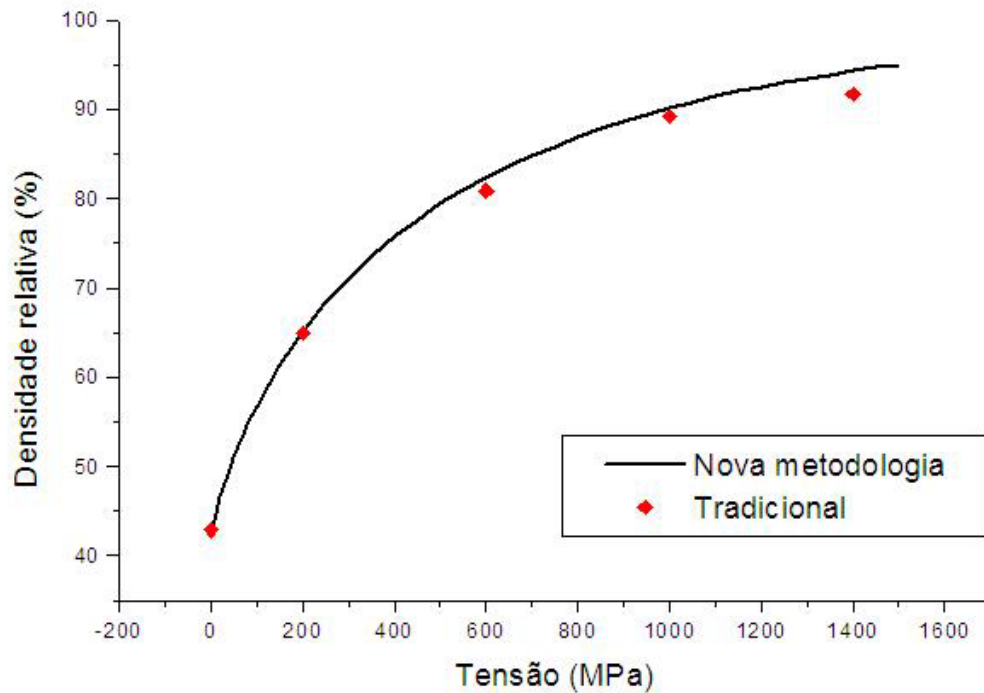


Figura 3. Curva de Compressibilidade para o pó de ferro puro em comparação com os pontos da curva apresentada na literatura, Figura 1.⁽⁶⁾

Na Figura 4 estão mostradas Curvas de Compressibilidade com 29 pontos feitas para diversos metais dúcteis em pó. Foram feitas três repetições do ensaio com cada material, sendo apresentada no gráfico a média das repetições.

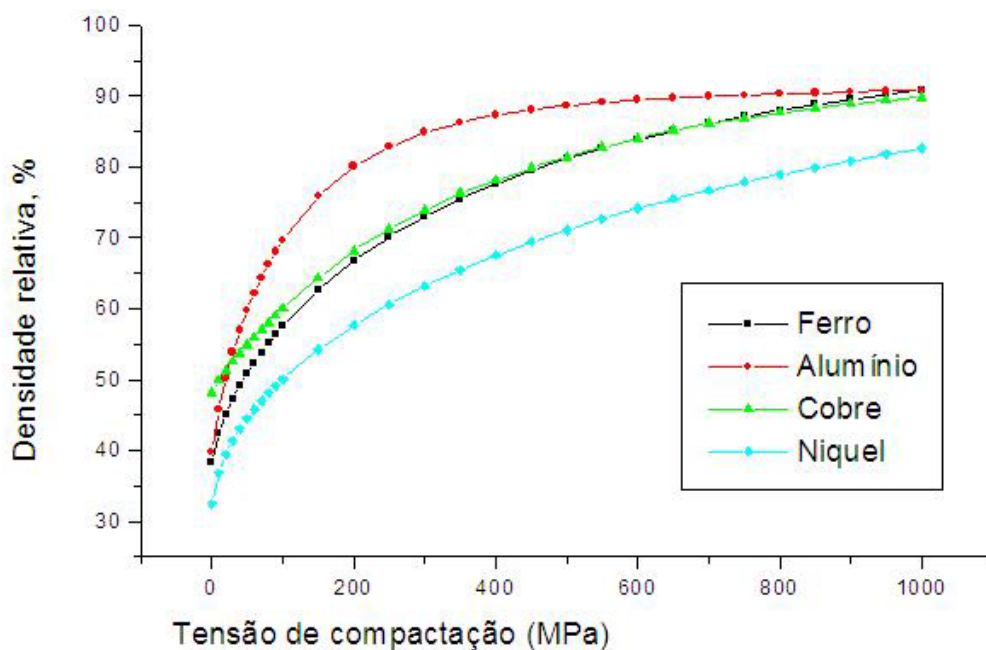


Figura 4. Curvas de compressibilidade para diversos metais dúcteis em pó.

Colocando o eixo da tensão das curvas de compressibilidade mostradas na Figura 4 em escala logarítmica, obteve-se as curvas mostradas na Figura 5. Observa-se que estas curvas apresentam regiões de comportamento distinto: Inicialmente uma região não-linear, seguida por uma quasi-linear que por fim dá lugar a outra não linear, como fica evidente no caso do alumínio. A região inicial corresponde ao re-empacotamento das partículas no interior do molde, enquanto o segundo estágio corresponde a deformação elástica do material em pó. Na Figura 6 estão as imagens de MEV do pó de cobre submetido a compactações sob diferentes tensões, demonstrando o incremento na deformação plástica das partículas.

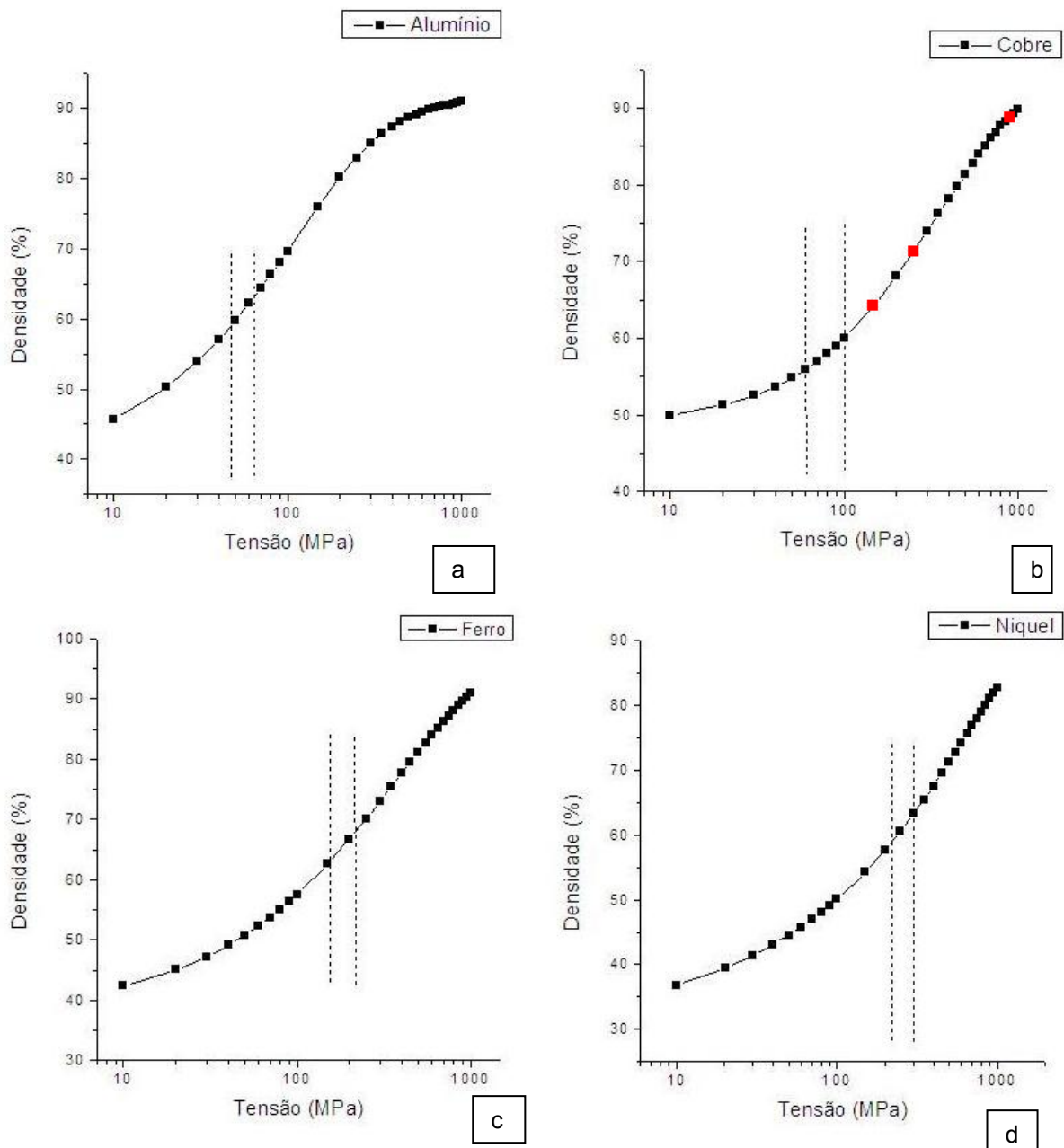


Figura 5. Curvas de compressibilidade em escala logarítmica.

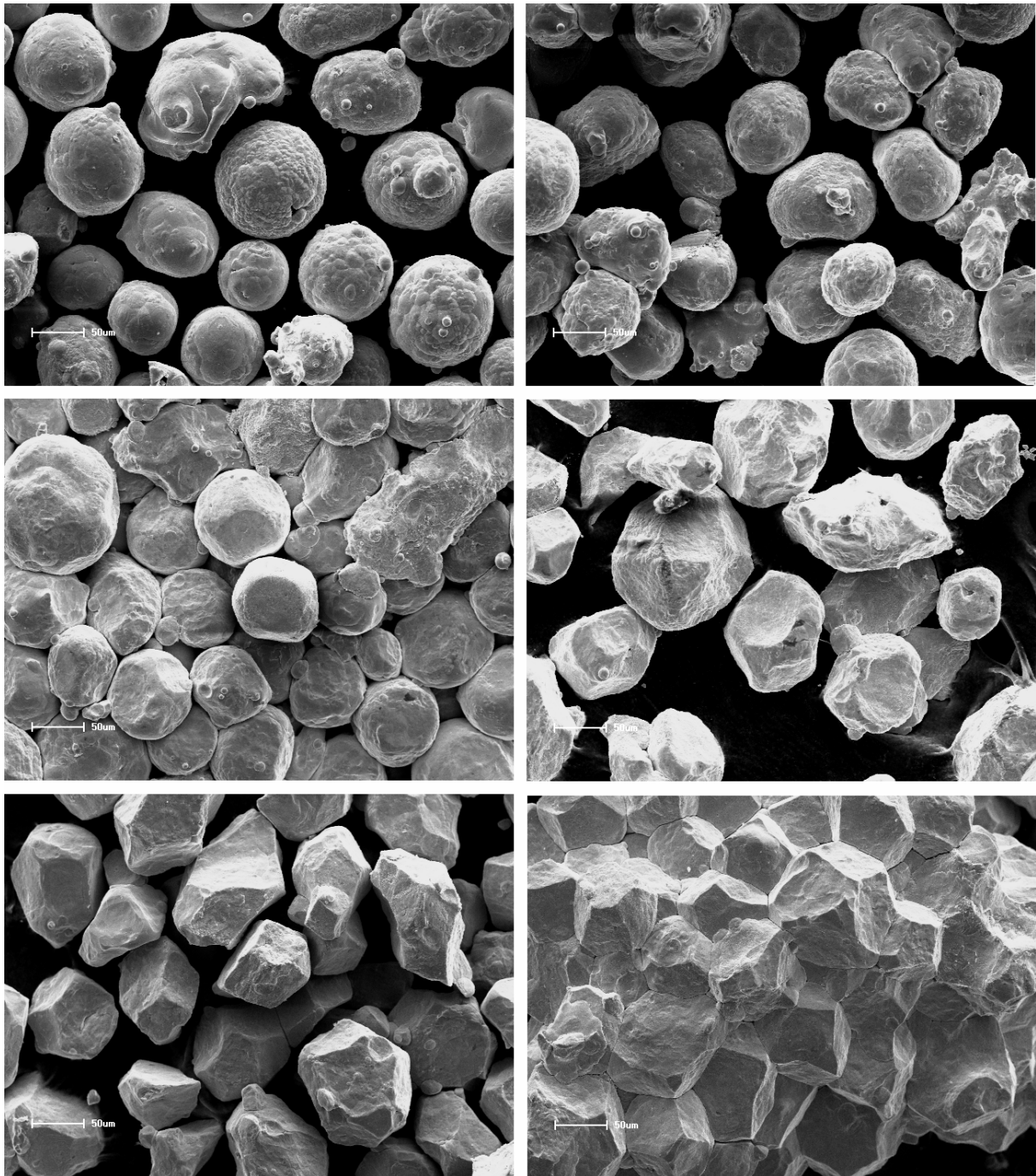


Figura 6. Pós de cobre compactados a: a) sem compactação, b) 200.MPa, c) 400.MPa, d) 800.MPa, e) 1.200.MPa, f) 2.000.MPa. Os pontos b), c) e d) estão assinalados na Figura 5b.

4 DISCUSSÃO

Observa-se na Figura 3 que o erro experimental associado ao novo método é pequeno, conferindo boa repetibilidade e precisão nos resultados. As curvas exibidas na Figura 4 possuem o formato característico de curvas de compressibilidade e os valores estão em concordância com a Figura 1, exceto para o alumínio, porém tal desvio pode ser atribuído a diferenças nas características dos pós.

Na Figura 5 nota-se a tendência das curvas ao formato “em S” quando o eixo das tensões é colocado em escala logarítmica. Podem-se observar três regiões:

uma curva inicial, uma reta e outra curva a elevadas tensões. Por analogia, conjecturou-se que cada região correspondia a um mecanismo de compactação: reordenamento do pó, deformação plástica e deformação elástica, respectivamente. Assim, pode se determinar graficamente a tensão em que a deformação plástica atua como o mecanismo principal de ganho de densidade, evitando utilizar tensões muito baixas, insuficientes para dar resistência a verde ao material, ou tensões muito elevadas, que poderiam fragilizar o material devido ao efeito “springback” ou exigir etapas posteriores de rebarbeamento.

A seqüência de imagens mostrada da Figura 6 mostra que 200 MPa (região inicial da curva, Figura 5b) não são suficientes para deformar significativamente as partículas de pó. Porém, com 400 MPa já observa-se uma boa quantidade de partículas amassadas, coincidindo com a entrada na região linear da curva. Para tensões elevadas (800 MPa e acima), as partículas apresentam-se com grande deformação, aumentando a área de contato entre elas e desta forma promovendo o ganho de resistência a verde.

5 CONCLUSÃO

O método desenvolvido mostrou-se simples e preciso, obtendo resultados em concordância com trabalhos anteriores. A alta resolução das curvas obtidas permitiu determinar graficamente o intervalo de tensão em que cada mecanismo de compactação agiu mais ativamente, o que facilita a identificação da tensão ótima de compactação para uma determinada aplicação. Identificar a tensão em que passa a ocorrer deformação plástica pode ajudar no modelamento teórico de curvas, pois podem ser buscadas relações entre o valor obtido experimentalmente e valores de propriedades mecânicas intrínsecas do material. A possibilidade de construir curvas de compressibilidade com alta resolução em pouco tempo e com pouco material abre novas possibilidades de estudos, como em materiais submetidos a moagem de alta energia, onde a curva de compressibilidade pode ser usada, por exemplo, para fornecer indícios do nível de encruamento do pó.

A utilização de curvas de compressibilidade em escala logarítmica pode ajudar a reduzir o tempo gasto nas etapas iniciais de projetos de metalurgia do pó, adequando a tensão de compactação de acordo com as características de cada pó. Sugere-se que a tensão escolhida esteja dentro da região de regime linear da curva, garantindo boa resistência a verde e evitando problemas durante o descarregamento e desmoldagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Msc. Selauco Vurobi Júnior e ao Dr. Milton Domingos Michel pela ajuda prestada no desenvolver do trabalho e ao CNPQ pela bolsa PIBIC-CNPQ dada a um dos autores.

REFERÊNCIAS

- 1 THÜMMLER, F.; OBERACKER, R. An Introduction to powder metallurgy. 1.ed. London: The Institute of Materials, 1993. 332p
- 2 ZILNYK, K. D.; CINTHO, O. M. Avaliação do processo de compactação uniaxial de pós metálicos por meio de ensaios de compressibilidades de alta resolução. Anais do 63º Congresso anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Santos, 2008.
- 3 CHIAVERINI, V.; Metalurgia do Pó; Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM; São Paulo; 4a ed.; 2001.
- 4 SMITH, L.N.; MIDHA, P.S.; GRAHAM, A.D.; Simulation of the metal powder compaction, for the development of a knowledge based power metallurgy process advisor. Journal of Materials Processing Technology v.79 p. 94-100, 1998.
- 5 D. POQUILLON; J. LEMAITRE; V. BACO-CARLES; PH. TAILHADES; J. LACAZE. Cold compaction of iron powders, Powder Technology v.126, p. 65– 74, 2002.
- 6 LAMPMAN, S. Compressibility of metal powders. In: ASM Handbook Volume 7. 10 ed. USA: ASM international, 1998, p. 704-716.
- 7 ASTM B331-95 Standart Test Method For Compressibility of Metal Powders in Uniaxial Compaction.
- 8 MPIF Standard 35, 1994. Materials Standards For P/M Structural Parts. Metal Powder Industries Federation, Princeton, USA.
- 9 ISO 3927, "Metallic Powders Excluding Powders for Hardmetals--Determination of Compactibility (Compressibility) in Uniaxial Compression," by the International Standards Organization
- 10 AL-QURESHI, H.A.; GALIOTTO, A.; KLEIN, A.N. On the mechanics of cold die compaction for powder metallurgy. Journal of Materials Processing Technology, v.166, p.135-143, 2005.
- 11 GERMAN, R.M. Particle packing characteristics. Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, USA, ISBN 0- 918404-83-5, 1989.
- 12 COCKS, A.C.F.; Construtive modeling of powder compaction and sintering. Progress in Materials Science 46 p. 201-229, 2001
- 13 C.L. MARTINS; Unloading of powder compacts and their resulting tensile strength, Acta Materialia v.51 p. 4589–4602, 2003.
- 14 GETHIN, D.T.; TRAN, V.D.; LEWIS, R.W.; ARIFFIN, A.K. An Investigation of Powder Compaction Processes Int. J. Powder Metall., v. 30(4), p. 385-398, 1994.
- 15 W. WU, G. JIANG, R. H. WAGONER, G. S. DAEHN. Experimental and numerical investigation of idealized consolidation: Part 1: Static compaction. Acta mater. 48 p. 4323–4330, 2000.
- 16 AL-QURESHI, H.A.; SOARES, M.R.F.; HOTZA, D.; ALVES, M.C.; KLEIN, A.N. Analyses of the fundamental parameters of cold die compaction of powder metallurgy. Journal of Materials Processing Technology, v.199 p. 417–424, 2008.