

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COMPACTAÇÃO UNIAXIAL DE PÓS METÁLICOS POR MEIO DE ENSAIOS DE COMPRESSIBILIDADES DE ALTA RESOLUÇÃO ¹

Kahl Dick Zilnyk ²
Osvaldo Mitsuyuki Cintho ³

Resumo

Foi desenvolvida uma metodologia simples, rápida e econômica de construir curvas de compressibilidade. Testes com pós de ferro com diferentes granulometrias foram feitos e demonstraram a eficiência do método. A alta resolução das curvas obtidas permitiu desenvolver um método gráfico de análise dos mecanismos de deformação dos pós que, aprimorado, pode ajudar em projetos de metalurgia do pó.

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

ANALYSIS OF METAL POWDERS UNIAXIAL COMPACTION BY HIGH RESOLUTION COMPRESSIBILITY TESTS

Abstract

A simple, fast and economic methodology for the construction of compressibility curves was developed. Tests using iron powder with different particle sizes have shown the method precision. The high resolution of the obtained curves allowed to develop a graphic method for analysing the powder deformation mechanics which, once improved, can help in powder metallurgy projects.

Key words: Compressibility; Powder metallurgy; Methodology; Consolidation processes.

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

² Graduando em Engenharia de Materiais Universidade Estadual de Ponta Grossa

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

1 INTRODUÇÃO

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.^[1] Portanto, a densidade a verde (densidade do compactado antes da sinterização) é uma função da tensão aplicada, e a relação entre estas grandezas pode ser demonstrada em uma Curva de Compressibilidade, como as mostradas na Figura 1. O teste padrão para a determinação da compressibilidade de um pó é descrito na norma B 331-95 da ASTM.^[2]

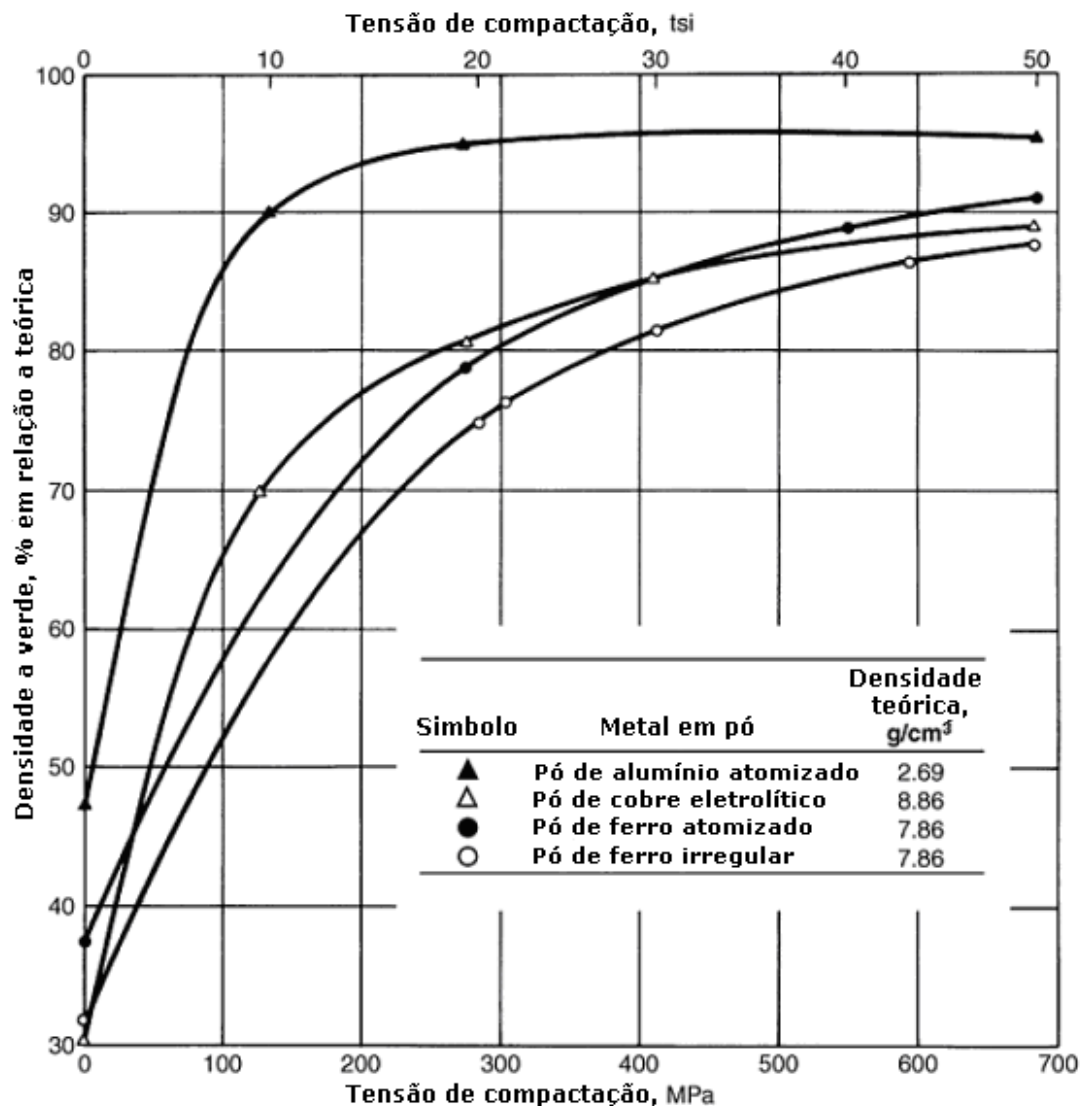


Figura 1. Curva de compressibilidade para diversos metais em pó.⁽¹⁾

Na compactação de materiais predominantemente dúcteis, em matriz rígida à frio, a compressão é constituída de três mecanismos: re-ordenamento do pó no interior da matriz, deformação elástica e deformação plástica.^[3-5] Em materiais de características frágeis, a deformação plástica cede lugar à fratura das partículas. Sob baixas tensões, ocorre apenas acomodação do pó e deformação nas áreas de contato entre as partículas. Com o aumento da tensão, o re-ordenamento pára de acontecer e a deformação plástica se intensifica. Em tensões muito elevadas, a deformação permanente é mínima, e a deformação elástica é favorecida.^[3,4]

É a deformação plástica que garante a resistência a verde do compactado,^[1,3,4] 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 favorece a propagação de trincas e a quebra da amostra a verde.^[5,6]

Nos materiais dúcteis, a compressibilidade aumenta com o tamanho de partícula, pois quanto maior este, maior a capacidade de deformação plástica do material.^[1,4,7,8] Pós metálicos contendo granulometrias diversas também atingem melhores compactações, pois as partículas menores ocupam os espaços vagos entre partículas maiores.^[1,4,8]

Devido à relativa dificuldade de se construir uma curva de compressibilidade pelos métodos tradicionais, e a falta de precisão delas, pouco foi estudado sobre suas propriedades. Dessa forma, a maioria dos trabalhos previamente conduzidos limitaram-se a simulações pelo método de Elementos Finitos^[3] e à procura de um modelo numérico que predissesse seu formato.^[4,7] Neste trabalho, não foi dado grande enfoque à obtenção de equações ou previsões teóricas. Ao invés disso, um método prático e eficiente de construção de curvas de compressibilidade foi apresentado, e os resultados obtidos utilizados na tentativa de interpretar os mecanismos de compactação dos pós de ferro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada uma máquina de ensaios mecânicos computadorizada Shimadzu Autograph II, com capacidade de 30 kN para compactar amostras de pós metálicos uniaxialmente em uma matriz cilíndrica de aço ferramenta AISI D2, com diâmetro interno de 8 milímetros.

Ferro em pó, com morfologia bastante irregular, foi separado granulometricamente em peneiras das seguintes aberturas: 180 µm, 150 µm, 106 µm, 63 µm, 53 µm, 45 µm e 38 µm, e cada fração submetida a exame de tamanho de partícula em um analisador granulométrico a laser CILAS. Foram construídas curvas de compressibilidade com os pós retidos nas peneiras de aberturas 180 µm, 53 µm e 38 µm, e com pó não separado. Antes de cada ensaio, a matriz foi limpa e lubrificada com uma solução de ácido esteárico em etanol.

A construção de uma curva de compressibilidade consiste em compactar um pó com uma determinada tensão, aliviá-la e medir sua densidade, direta ou indiretamente, repetindo esse procedimento para diversos valores crescentes de tensão.^[1] Com a máquina de ensaios computadorizada foi possível controlar com precisão a tensão aplicada ao mesmo tempo em que a altura da amostra foi conhecida. A altura da matriz montada, sem material, foi marcada como posição de deslocamento zero (posição padrão). O pó foi então colocado na matriz e submetido a 1 MPa de tensão (tensão padrão), valor suficiente apenas para acomodar o pó. O computador registrou a altura neste ponto e a tensão foi elevada para 10 MPa, reduzida em seguida para a tensão padrão. Novamente registrou-se a altura. Na sequência, a tensão foi elevada para 20 MPa, reduzida para a tensão padrão e a nova altura foi registrada. Este processo foi repetido com 37 valores crescentes de tensões até 1500 MPa. Nos ensaios realizados neste trabalho foram construídas curvas com 37 pontos, que correspondem aos 37 valores de tensão aplicados. Foram realizados ensaios em 5 amostras de cada pó, com 1 grama de material em cada amostra, sendo que se considerou a média dos resultados.

Como dito anteriormente, o compactado sofre uma distorção dimensional ao ser ejetado da matriz, alterando tanto seu diâmetro quanto sua altura. Esta distorção se dá devido ao atrito entre o pó e a matriz.^[3,6] Considerando o atrito diretamente proporcional à altura da massa de pó, podemos estipular a altura instantânea que o compactado teria se fosse retirado da matriz em uma etapa qualquer do processo. A altura instantânea pode ser determinada por meio de uma regra de três envolvendo a altura registrada para a última tensão aplicada e a altura do compactado após a ejeção, medida com um micrômetro, assim como seu diâmetro.

Para calcular a densidade a verde em cada ponto de compactação empregou-se a seguinte equação [2]:

$$Dn = \frac{1273 \times m}{d^2 \times hn}$$

sendo Dn a densidade, m a massa de pó do compactado, d o diâmetro e hn a altura corrigida, com n variando de 1 a 37.

Uma vez obtidas as curvas de compressibilidade, suas abscissas foram colocadas em escala logarítmica, permitindo observar a que tensões cada um dos mecanismos de ganho de densidade foi mais efetivo. Para comprovar, testes de compressibilidade com o pó entre 150 μm e 106 μm foram interrompidos nas tensões de 40 MPa, 90 MPa, 200 MPa, 300 MPa, 550 MPa, 800 MPa, 1050 MPa, 1300 MPa e 1500 MPa. Utilizado um microscópio óptico OLYMPUS BX-51 equipado com câmera digital, o pó e o compactado foram fotografados para observar o nível de deformação. Também foram feitas imagens por microscopia eletrônica de varredura com um equipamento SHIMADZU SSX-550.

3 RESULTADOS

Os diâmetros médios dos pós retidos em cada peneira, estão exibidos na Tabela 1, onde as granulometrias marcadas em cinza foram utilizadas para construção das curvas de compressibilidade.

Tabela 1. Diâmetro médio das partículas retidas em cada peneira.

Abertura (μm)	Diâmetro médio (μm)
180	179,63
150	137,3
106	89,67
63	68,9
53	52,45
45	43,7
38	29,53

A Figura 2 apresenta a curva de compressibilidade para cada um destes pós e para o pó sem separação. O desvio-padrão foi consideravelmente pequeno, na ordem de 3%, sendo omitido do gráfico para favorecer a visibilidade. Em escala logarítmica, o gráfico da Figura 2 passa a ter o formato mostrado na Figura 3. O progresso da deformação das partículas de pó pode ser observado nas seqüências de fotos, mostradas nas Figuras 4 e 5.

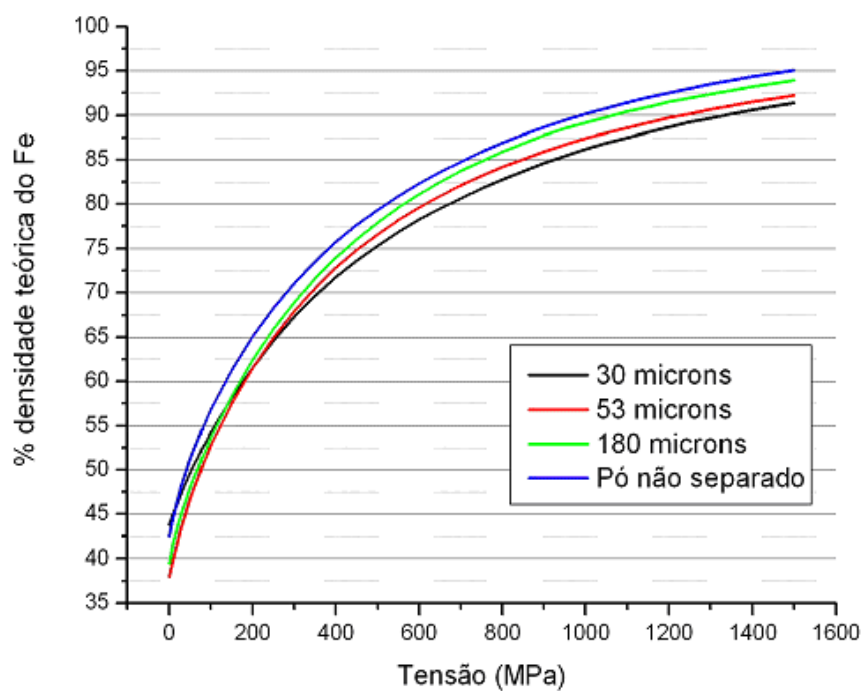


Figura 2. Curva de compressibilidade para pós de ferro com diferentes granulometrias.

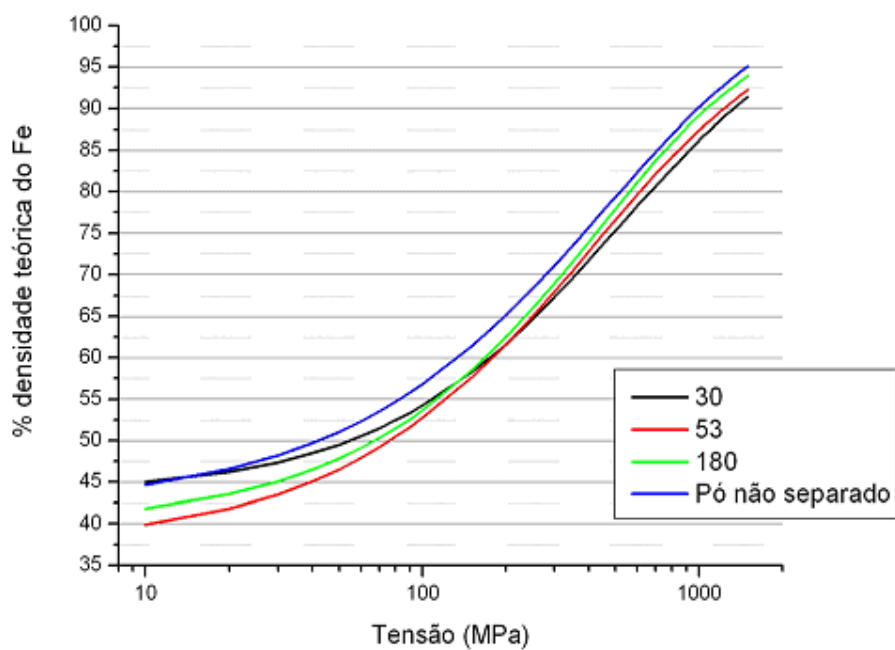


Figura 3. Curvas de compressibilidade em escala logarítmica.

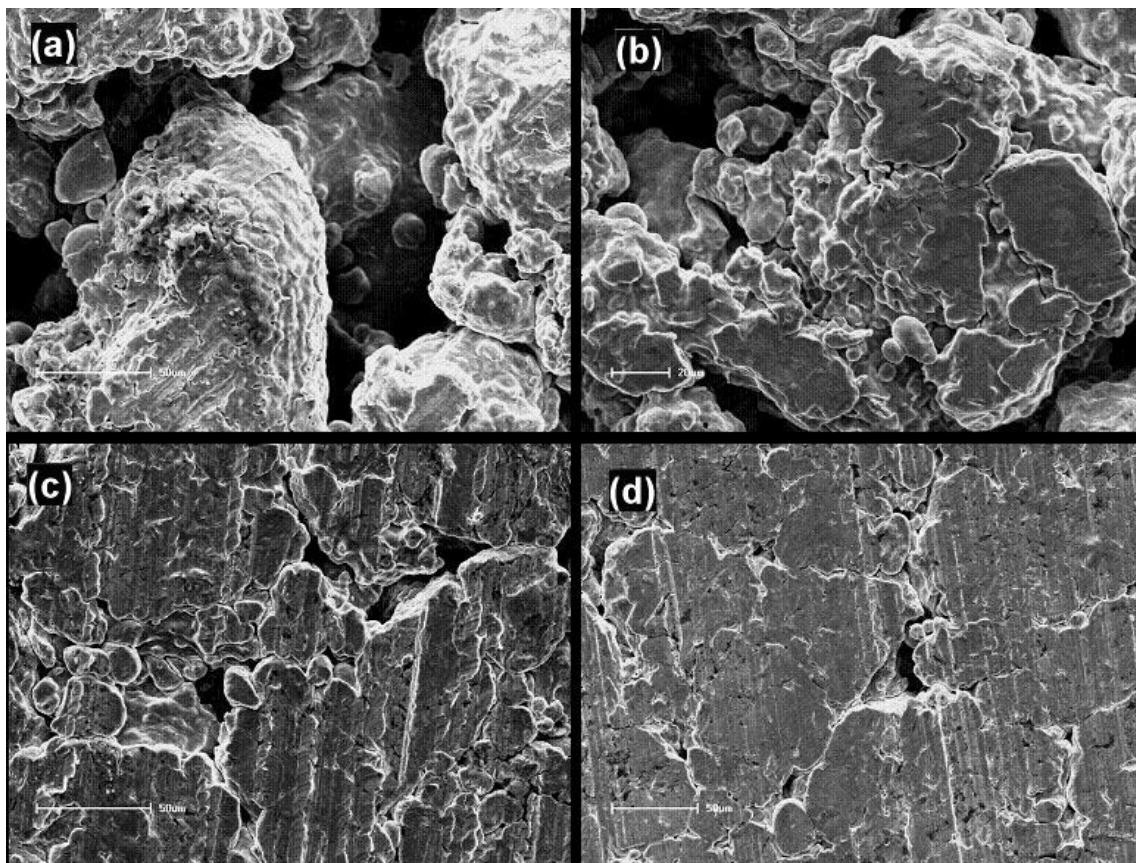


Figura 4. Microscopia eletrônica de varredura das amostras compactadas a: (a) 90 MPa, (b) 200 MPa, (c) 800 MPa, (d) 1500 MPa.

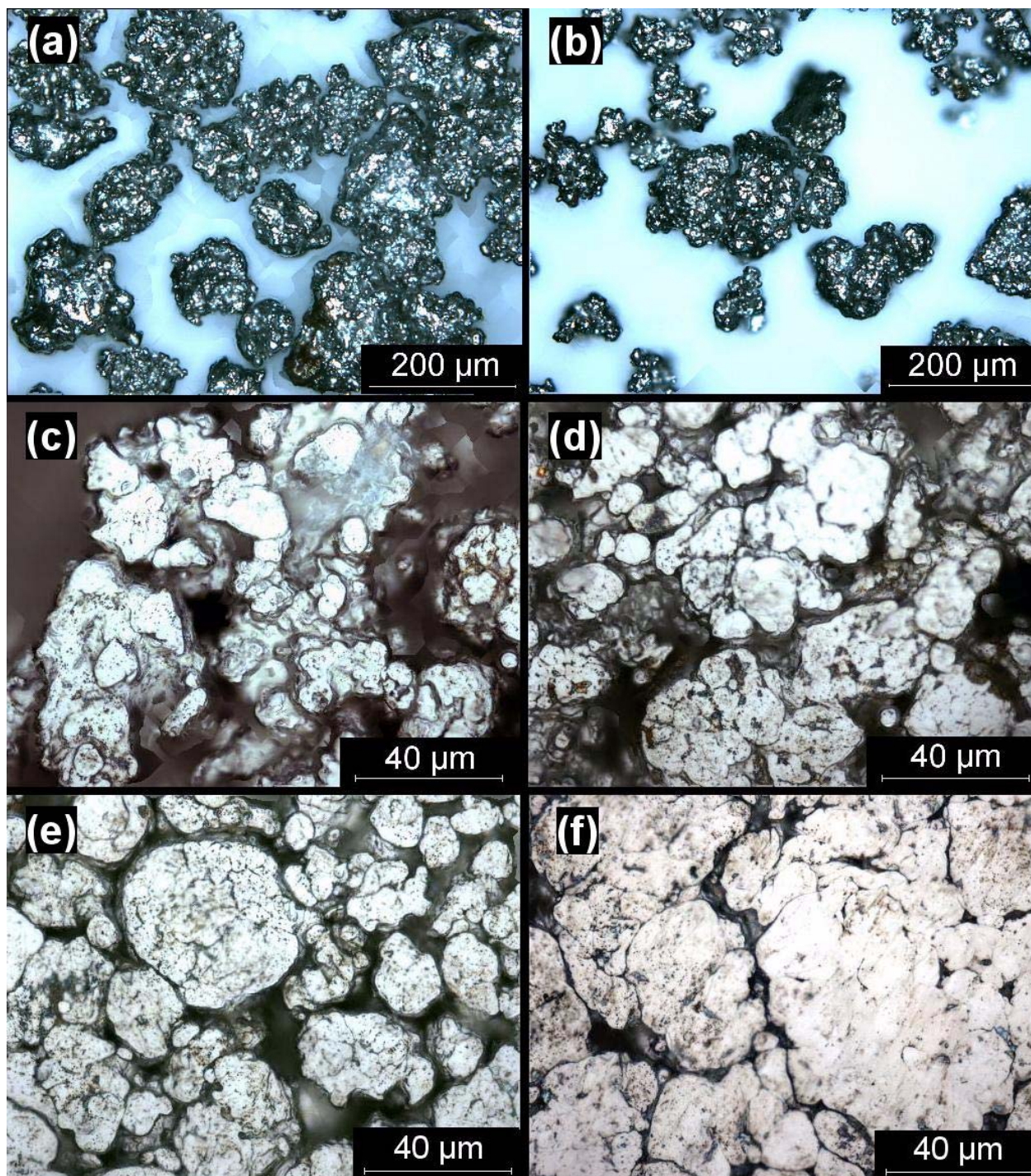


Figura 5. Imagens de microscopia óptica: (a) Pó sem compactação, e pós compactados a: (b) 90 MPa, (c) 200 MPa, (d) 550 MPa, (e) 800 MPa e (f) 1500 MPa.

4 DISCUSSÃO

O comportamento das curvas de compressibilidade obtidas ficou de acordo com os resultados apresentados em literatura, onde quanto maiores as partículas de pó e maior o espalhamento do tamanho de partícula, melhor a compressibilidade e maior a densidade final,^[1,4,7-9] como pode ser visto comparando as curvas referentes a 30 μm e 180 μm da Figura 2. O pó sem separação obteve a maior densidade final por ser composto de diversas granulometrias, o que garante melhor empacotamento das partículas. Os valores de densidade são bastante semelhantes aos mostrados

em trabalhos anteriores para pós irregulares.^[1,4,7-9] Dentre os pós separados que foram utilizados, o retido na peneira de abertura 38 μm era o menos uniforme, sendo composto por partículas ainda mais finas com diversos tamanhos, o que explica sua densidade inicial relativamente alta.^[8,9]

Na curva em escala logarítmica, apresentada na Figura 3, pode-se observar três regiões distintas: uma curva inicial, uma reta e outra curva a elevadas tensões. Por analogia, conjecturou-se que cada região correspondia a um mecanismo de compactação: re-ordenamento do pó, deformação plástica e deformação elástica, respectivamente. Assim, pode-se determinar graficamente a tensão em que cada um dos três passa a ser o mecanismo principal de ganho de densidade.

A deformação plástica é a principal responsável pela resistência a verde do compactado,^[3] pois garante o entrelaçamento das partículas. Sendo assim, é interessante determinar os pontos em que ela começa e cede lugar a deformação elástica prejudicial. Traçando-se retas paralelas à parte retilínea do gráfico, foi possível descobrir em que ponto este passa a ter comportamento linear, que caracteriza a deformação plástica. Para o ferro, esta região começou entre 150 MPa e 210 MPa em todas as amostras, independente da granulometria. As seqüências de imagens de microscopia óptica e eletrônica das Figuras 4 e 5 mostram que a deformação das partículas realmente intensifica-se nesta faixa de tensões, pois a capacidade de re-ordenação do pó vai se extinguindo, havendo deformação plástica nas superfícies de contato entre as partículas e entre essas e a matriz. Estas imagens foram feitas sem preparo metalográfico prévio, podendo-se observar nas imagens da Figura 4 riscos causados por marcas de usinagem na matriz de compactação.

5 CONCLUSÕES

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.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Msc. Selaucio Vurobi Júnior pela ajuda prestada no desenvolver do trabalho e ao CNPQ pela bolsa PIBIC-CNPQ.

REFERÊNCIAS

- 1 Steve Lampman in In: ASM Handbook. Volume 7. 10 ed. USA: ASM international, 1998, 704-716.
- 2 ASTM B331-95 Standard Test Method For Compressibility of Metal Powders in Uniaxial Compaction.
- 3 SMITH, L.N.; MIDHA, P.S.; GRAHAM, A.D.; Simulation of the metal powder compaction, for the development of a knowledge based powder metallurgy process advisor. Journal of Materials Processing Technology, v. 79, p 94-100, 1998.
- 4 THÜMMLER, F.; OBERACKER, R. An Introduction to powder metallurgy. 1.ed. London: The Institute of Materials, 1993. 332p
- 5 GERMAN, R.M. Particle packing characteristics. Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, USA, ISBN 0- 918404-83-5, 1989.
- 6 C.L. MARTINS; Unloading of powder compacts and their resulting tensile strength, Acta Materialia v.51 (2003) 4589–4602
- 7 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.
- 8 CHIAVERINI, V.; Metalurgia do Pó; Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM; São Paulo; 4a ed.; 2001.
- 9 ZILNYK, K. D.; MIKI, C. H.; CAMILO, D. C.; CINTHO, O. M.; Influência do tamanho de partícula na compressibilidade de pós metálicos. In: XVI ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2007, Maringá.