

Uma breve revisão sobre o efeito da pressão de compactação nas propriedades de materiais obtidos via metalurgia do pó

Raphael Basílio Pires Nonato

Universidade de Sorocaba (UNISO), Sorocaba – SP
e Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Chapecó, SC

Thomaz Augusto Guisard Restivo

Universidade de Sorocaba (UNISO), Sorocaba – SP

RESUMO

A pressão de compactação é um parâmetro que desempenha um papel importante não só no processo de compactação em si, mas também no pós-processamento (sinterização, pós-sinterização, etc.). O pó compactado é mantido unido principalmente por forças adesivas, cujas magnitudes influenciam as propriedades do material obtido via rota da metalurgia do pó (MP). Portanto, este trabalho apresenta uma breve revisão sobre o efeito da pressão de compactação nas propriedades de materiais obtidos via MP. Isso inclui o estado da arte sobre o tema, mostrando a evolução da pesquisa nessa área. A revisão inicia-se com definições e conceitos sobre PM e pressão de compactação. A seção seguinte apresenta o progresso das pesquisas sobre a relação entre pressão de compactação e propriedades do material. A próxima seção apresenta uma discussão sobre possíveis tendências e oportunidades de pesquisa nessa área em crescimento. A seção final deste artigo corresponde às conclusões tiradas.

Palavras-chave: Pressão de compactação, Propriedades do material, Metalurgia do pó.

1 INTRODUÇÃO

A metalurgia do pó (MP) consiste em um processo de fabricação que transforma um metal sólido puro, liga ou cerâmica em termos de partículas secas em um componente ou produto em sua forma definida com propriedades mecânicas que eventualmente permitem evitar o pós-processamento (THÜMMLER; OBERACKER, 1993).

No contexto do processo de MP, o subprocesso de compactação desempenha um papel importante porque a pressão imposta ao pó é um dos dados de entrada mais influentes para um grande tipo de propriedades (MAHDI *et al.*, 2016). As misturas em pó devem ser transformadas em misturas, que devem ter capacidade de fluir adequadamente concomitantemente com alta resistência verde e compressibilidade.

Sua importância requer ferramental e aparato específicos para executar o processo, que devem ter força suficiente para resistir às tensões atuantes, deformações e características geométricas para executar todo o processo. Parâmetros relacionados à interface entre ferramental e pó influenciam direta e/ou indiretamente o estágio de compactação (BREWIN *et al.*, 2008).

No caso do pós-processamento (sinterização, pós-sinterização, etc.), em que se deseja a maior densidade, a uniformidade da compactação determina principalmente a precisão da peça sinterizada. As

propriedades requeridas devem ser alcançadas sem alterações dimensionais significativas. Com o auxílio da teoria de modelagem de compactação (CM), tensões podem ser calculadas, e propriedades podem ser estimadas para simular o produto resultante mesmo sem a realização de experimentos. Portanto, o CM também é relevante para a otimização de propriedades verdes no contexto das características geométricas. Os itens mais relevantes a serem considerados no MC são: (a) propriedades da parte verde; (b) interação entre ferramental e pó; c) Cinemática da prensagem; (d) propriedades do pó (BREWIN *et al.*, 2008).

Uma das características que influencia a capacidade de compactação é a granulação do pó. Por exemplo, quando o pó é fino o suficiente e tem uma geometria arredondada, ele flui mais facilmente. Essas características implicam em uma distribuição mais uniforme dos pós e um comportamento de deformação que preenche os vazios. Isso induz uma maior densidade da peça compactada.

Outras características que merecem atenção estão relacionadas às análises de enchimento e fluxo. Isso é realizado principalmente usando metalografia ou simulações. Isso visa otimizar a cinemática do processo de enchimento e o projeto da matriz. Além disso, o estado de estresse é comumente não isotrópico (complexo).

No que se refere aos defeitos associados à pressão de compactação inadequada, alguns podem ser destacados: (a) falha do ferramental por sobrecarga ou fadiga; b) Rachaduras provenientes da descarga e do efeito de retorno da mola; c) Rachaduras de cisalhamento na matriz; e (d) distribuição heterogênea de densidade.

Na próxima seção, é apresentado o estado da arte sobre o efeito da pressão de compactação nas propriedades de materiais obtidos via rota da metalurgia do pó.

2 ESTADO DA ARTE SOBRE O EFEITO DA PRENSA DE COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES DE MATERIAIS OBTIDOS VIA METALURGIA DO PÓ

A liga de alumínio A6061 foi obtida a partir de (25, 60, 100, mistura). Foram obtidos três corpos de prova de cada granulação, correspondendo a 5, 7 e 9 toneladas de pressão de compactação. A sinterização foi realizada a 552°C em vinte minutos de contenção. Todos os grupos submetidos ao experimento apresentaram aumento da resistência à compressão quando a pressão de compactação foi aumentada (134 MPa). (MAHDI *µmet al.*, 2016).

O magnésio e o alumínio, que apresentam dificuldades de sinterização devido à sua alta reatividade química, são submetidos a um método de compactação a quente. O efeito da temperatura de compactação (301 a 423) foi observado na sinteribilidade. A sinterização foi realizada em ambiente argônio, no qual ocorrem dois fenômenos concomitantemente: (a) o aumento da temperatura de compactação aumentou o contato entre as partículas; (b) a deformação plástica das partículas favoreceu o adensamento (IWAOKA; NAKAMURA, 2011).

Amostras de cobre foram produzidas por metalurgia do pó e sinterizadas para verificar o efeito da pressão de compactação na microestrutura, densidade e dureza. Pressões de 500, 600, 700 e 730 MPa foram aplicadas sobre o pó, e 750°C por 1,5h foram os principais parâmetros de sinterização. Os experimentos concluíram que o aumento da pressão de compactação induz a redução da porosidade (DIXIT; SRIVASTAVA, 2018).

A rota PM foi selecionada para produzir compósito cobre-carboneto de tungstênio aplicando pressões de compactação de 100 a 600 MPa para verificar propriedades e microestrutura. A condutividade elétrica, a dureza e a densidade foram medidas de acordo com a pressão aplicada, resultando em seu aumento progressivo à medida que a pressão de compactação aumenta gradualmente (MAHANI; ZUHAILAWATI, 2013).

Propriedades magnéticas e de densidade do pó de ferro sinterizado são relatadas (BAGLYUK *et al.*, 2009). Para a condição de porosidade superior a 6,5%, a própria porosidade é o principal parâmetro que influencia a densidade de fluxo magnético do sinterizado. Para valores inferiores a 6,5%, a deformação residual é o fator que mais influencia.

Fe-2,5Ni-0,5Mo-2Cu-0,4C, obtido via PM em alta velocidade de compactação em uma parede de matriz lubrificada, é estudado. À medida que a velocidade e a lubrificação da parede da matriz são aumentadas, a densidade sinterizada, a densidade verde e a força para iniciar e conduzir o processo também são aumentadas (LIU *et al.*, 2020).

O pó de Ti6Al4V foi compactado a frio a várias pressões para ser sinterizado a 1200°C com um tempo de retenção de 2 horas. Uma maior resistência foi associada a uma maior pressão de compactação. A comparação com outros compactos de Ti em pó na mesma faixa de porosidade apresentou maior resistência. Isso se deve principalmente à falha nas regiões de ligação interpartículas, que pôde ser observada no microscópio (GÜDEN *et al.*, 2007).

A liga Al-6Cu-5Zn foi obtida por diferentes condições de PM, com pressões de 200, 400 e 600 MPa, e sinterização. Temperaturas de 410, 560 e 615°C foram ajustadas para sinterizar as amostras em ambiente nitrogenado. A 410°C, para baixa pressão (200 MPa), não se verificou difusão, enquanto para 400 e 600 MPa ocorreu parcialmente. A 560°C, a sinterização em fase líquida começou a aparecer em pequenas regiões. A 615°C, ocorreu efetivamente a sinterização em fase líquida, porém com melhores resultados para a pressão de compactação de 600 MPa (LEE; AHN, 2015).

Al6061 foi obtido por via PM aplicando valores de pressões de compactação de 300, 340, 380 MPa. A sinterização foi realizada a 450°C por meia hora com ambiente de argônio. A microestrutura revelou que a maior pressão de compactação correspondeu à menor porosidade, à menor taxa de desgaste, à maior dureza (ALAMGIR; SIDDIQUE, 2017).



A microestrutura e as propriedades do Ti-1Al-8V-5Fe (Ti-185) foram analisadas sob diversas pressões de compactação. Ao observar os resultados dos experimentos, a resistência ao escoamento, a dureza, a densidade verde, a densidade sinterizada e a taxa de densificação aumentaram com o aumento da pressão de compactação (ZHANG *et al.*, 2019).

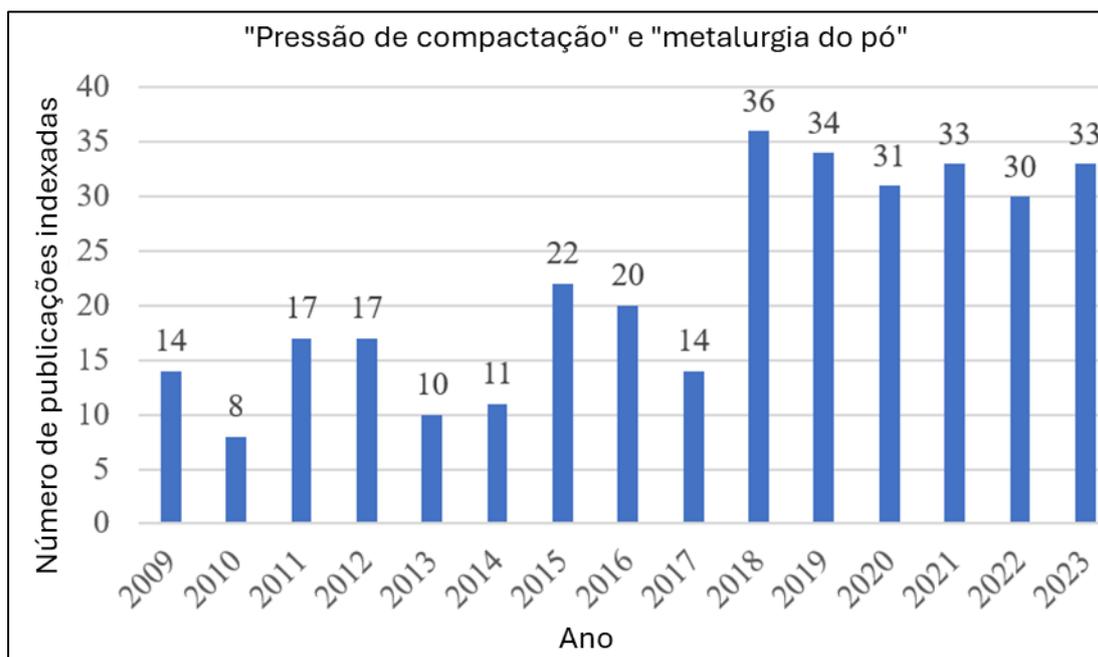
Misturas de 0, 5, 10, 15 e 20% em peso de chumbo em pó e alumínio-10% em peso de cinzas volantes foram compactadas na faixa de [200, 400] MPa. O efeito mola traseira, a densidade verde e a pressão de ejeção aumentaram com o aumento da pressão de compactação. Por outro lado, a porosidade e a pressão de ejeção diminuíram com o aumento da pressão de compactação (REDDY *et al.*, 2010).

3 DISCUSSÃO

Esta seção aborda possíveis tendências e oportunidades no efeito da pressão de compactação sobre propriedades em rota de MP, mostrando a pesquisa bibliométrica extraída de (CAPES, 2024).

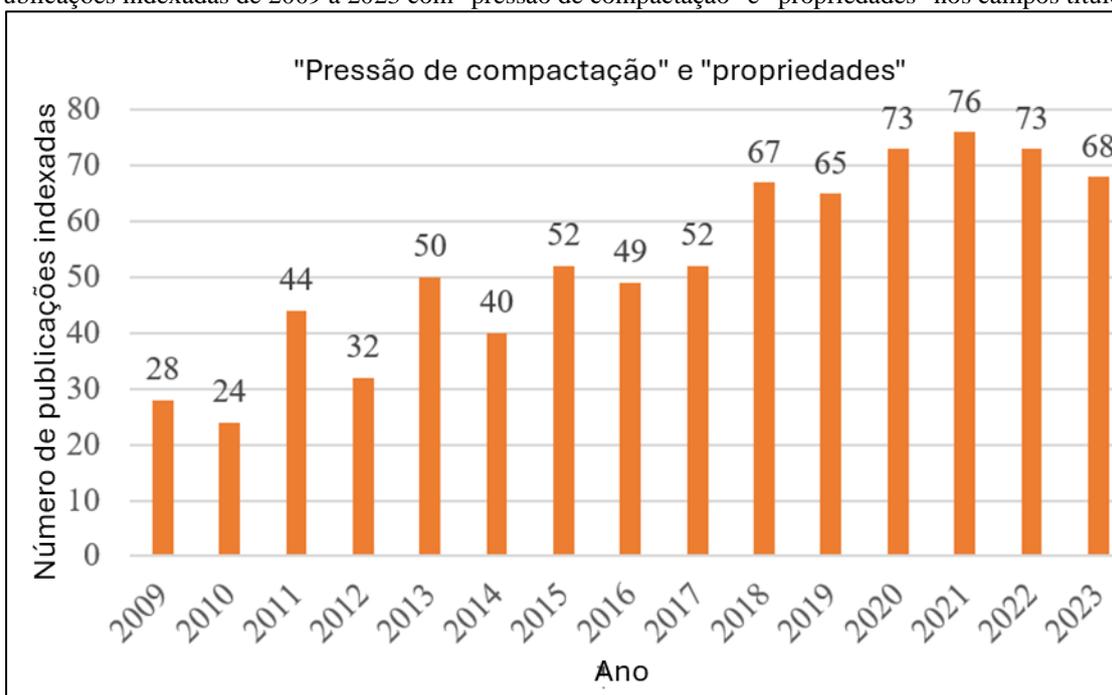
Com o objetivo de verificar a relevância e tendências das palavras de busca e identificar lacunas e/ou oportunidades de contribuição para a área, foi realizada uma pesquisa bibliométrica, cujos resultados são apresentados nas Figuras 1 e 2). Ambos os gráficos referem-se ao período entre 2009 e 2023 e correspondem ao número de publicações indexadas que incluem as palavras de pesquisa selecionadas no repositório de informações da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, 2024). "Pressão de compactação e metalurgia do pó" e "pressão e propriedades de compactação" foram as palavras selecionadas pesquisadas, as quais são apresentadas nas figuras 1 e 2, respectivamente.

Figura 1: Publicações indexadas de 2009 a 2023 com "pressão de compactação" e "metalurgia do pó" nos campos título ou resumo.



Fonte: CAPES, 2024.

Figura 2: Publicações indexadas de 2009 a 2023 com "pressão de compactação" e "propriedades" nos campos título ou resumo.



Fonte: CAPES, 2024.

De acordo com a Figura 1 ("pressão de compactação" e "metalurgia do pó"), o número de publicações indexadas começa em um patamar mais baixo e se estabiliza em um patamar até 2017. O comportamento da parcela aumenta para um patamar mais alto de 2018 a 2023. Em apenas um ano (comparando 2018 com 2017), houve um aumento de aproximadamente 157% no número de publicações.



Mesmo diante da possibilidade de que o número de publicações não esteja crescendo, atingiu-se um nível maior de publicações (*platô*).

Menos abrupto que o gráfico da Figura 1 é o comportamento do número de publicações indexadas por ano mostrado na Figura 2 ("pressão de compactação" e "propriedades"). Nesse caso, por exemplo, o número de publicações dobrou entre 2010 e 2013. De 2010 a 2018, o número de publicações aumentou aproximadamente 179%.

Analisando tanto a Fig. 1 quanto a Fig. 2, pode-se estimar que houve níveis de alcance separados por intervalos de tempo específicos e que o próximo crescimento nessas áreas de pesquisa tende a ocorrer após a ultrapassagem do último nível, que pode ser encontrado no início, em fases intermediárias ou no final de sua construção.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma breve revisão sobre o efeito da pressão de compactação nas propriedades de materiais obtidos via metalurgia do pó. Isso incluiu uma breve descrição sobre a referida área de pesquisa, bem como os progressos realizados, tendências e possíveis oportunidades de pesquisa. O conceito principal baseia-se no fato de que, se a pressão de compactação aumenta, a porosidade diminui. Com base nisso, aumentando a pressão de compactação: (a) aumenta a resistência à compactação; (b) aumento da condutividade elétrica; (c) aumenta a dureza; (d) aumento do fluxo magnético; (e) aumento da força para iniciar e conduzir o processo de compactação; (f) A taxa de desgaste diminui; (g) Aumento da resistência ao escoamento; (h) O efeito de retorno da mola aumenta; (i) aumento da pressão de ejeção.

O número de publicações indexadas foi comparado em um período de quinze anos (de 2009 a 2023) tendo em vista as palavras de pesquisa mais pertinentes, fornecendo a análise de tendências, taxas de crescimento e oportunidades de contribuição de cada palavra de pesquisa.

Portanto, com base nas informações relatadas neste trabalho, embora muitas contribuições tenham sido feitas para ampliar as fronteiras do conhecimento relacionadas ao efeito da pressão de compactação nas propriedades de materiais obtidos via metalurgia do pó, esta área de pesquisa ainda é promissora devido à sua grande abrangência em termos de experimentos viáveis e combinação de elementos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos organizadores do evento pela oportunidade de compartilhar este trabalho. Os autores também agradecem aos conselhos de pesquisa CNPq (proj. 408406/2021-6), CatalisaICT Sebrae (proj. 29083*128) e FAPESP (proj. 2023/09818-8) pelo apoio financeiro.



REFERÊNCIAS

ALAMGIR, M. D., SIDDIQUE, M. A. Effect on compaction pressure on sintered properties of synthesized Al6061 alloys through powder metallurgy route, *International Journal for Scientific Research & Development*, v. 5, n. 07, pp. 932-934, 2017.

BAGLYUK, G. A., PANASYUK, O. V., VLASOVA, O. V., KUROVSKII, V. Y. Effect of compaction conditions on the properties of magnetically soft materials sintered from iron powder, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, v. 48, n. 11-12, p. 663-666, 2009.

BREWIN, B. R., COUBE, O., DOREMUS, P., TWEED, J. H. *Modelling of powder die compaction*, London: Springer, 2008. 347 p.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR. CAPES. Busca por assunto. 2024. Available in: <[https://www-periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br /index.php?](https://www-periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br/index.php?)>. Access in: Mar 26th, 2024.

DIXIT, M., SRIVASTAVA, R. K. Effect of compaction pressure on microstructure, density and hardness of copper prepared by powder metallurgy route, *International Conference on Mechanical, Materials and Renewable Energy*, v. 337, p. 1-9, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012209>.

GÜDEN, M., ÇELIK, E., HIZAL, A., ALTINDIS, M., ÇETINER, S. Effects of compaction pressure and particle shape on the porosity and compression mechanical properties of sintered Ti6Al4V powder compacts for hard tissue implantation, *J Biomed Mater Res Part B: Appl Biomater*, v. 85B, p. 547-555, 2007. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.30978>.

IWAOKA, T., NAKAMURA, M. Effect of Compaction Temperature on Sinterability of Magnesium and Aluminum Powder Mixtures by Warm Compaction Method, *Materials Transactions*, v. 52, n. 5, 2011.

LEE, S. H., AHN, B. Effect of compaction pressure and sintering temperature on the liquid phase sintering behavior of Al-Cu-Zn alloy, *Archives of Metallurgy and Materials*, v. 60, n. 2, p. 1-5, 2015. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0158>.

LIU, Z., LI, D., LIU, X., LI, H., HUANG, X., TANG, Z., ZOU, Y. Effect of die wall lubrication on high velocity compaction behavior and sintering properties of Fe-based PM alloy, *Arch. Metall. Mater.*, v. 65, p. 677-684, 2020. <https://doi.org/10.24425/amm.2020.132806>.

MAHANI, Y., ZHAILAWATI, H. Effect of compaction pressure on microstructure and properties of copper-based composite prepared by mechanical alloying and powder metallurgy, In: *2nd International Conference on Sustainable Materials Engineering (ICoSM)*, 2013. Proceedings, p. 345-348.

MAHDI, A. S., MUSTAPA, M. S., LAJIS, M. A., RASHID, M. W. A. Effect of compaction pressure on mechanical properties of aluminium particle sizes A6061 Al alloy through powder metallurgical process, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 11, n. 8, p. 5155-5160, 2016.

REDDY, S. P., RAMANA, B., REDDY, A. C. Compacting characteristics of aluminum-10 wt % fly ash-lead metal matrix composites, *International Journal of Materials Science*, v. 5, n. 6, p. 777-783, 2010.

THÜMMLER, F.; OBERACKER, R. *An introduction to powder metallurgy*. London: The institute of materials, 1993. p. 332.

ZHANG, Y., GUO, X., CHEN, Y., LI, Q. Effect of compaction pressure on the densification, microstructure, and mechanical properties of Ti-1Al-8V-5Fe alloy based on TiH₂ and HDH-Ti powders, *Micro & Nano Letters*, v. 14, n. 8, p. 906-910, 2019. <https://doi.org/10.1049/mnl.2018.5736>.