

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE LIGAS METÁLICAS REFROTÁRIAS PARA UTILIZAÇÃO EM MANUFATURA ADITIVA PELA TÉCNICA DE FUSÃO SELETIVA A LASER EM LEITO DE PÓ METÁLICO (PBF-L)

André Solano Ferreira Rodrigues Maiolini ¹; Marcelo Otávio dos Santos ²

¹ Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. Pós processados via eletrodo rotativo por plasma resultam em partículas perfeitamente esféricas, ideais para a manufatura aditiva, especialmente na técnica de fusão a laser de leito de pó (PBF-L), devido à sua excelente escoabilidade e capacidade de proporcionar um fluxo contínuo na cama de pó. Contudo, o alto custo das matérias-primas e a dependência de importações podem apresentar desafios na cadeia de suprimentos. A substituição desses pós por partículas irregulares e coesas com texturas mais grossas prejudica a escoabilidade, interrompendo o fluxo nos ductos e no leito de pó. O trabalho enfrenta o desafio de analisar a escoabilidade a seco dos elementos refratários WC e NbC misturados com Co e Ni. Foi desenvolvido um dispositivo vibratório com um recipiente com capacidade de 1,5 kg, acoplado a um rolo compactador que permite o escoamento por gravidade e vibração, variando a pressão de 0,25 MPa a 0,35 MPa. Utilizando peneiras metálicas de malhas entre #35 mesh (500 μ m) e #50 mesh (300 μ m), foi promovida a compressibilidade das misturas na cama de pó. A análise inclui a obtenção de curvas características de fluidez a seco e a avaliação da compactação dessas misturas na cama de pó.

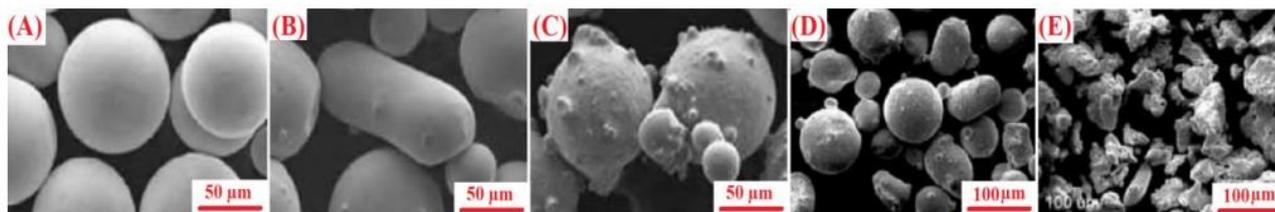
Introdução

A qualidade das peças fabricadas por Manufatura Aditiva (MA) é influenciada pelas características dos pós metálicos, incluindo forma, distribuição de tamanho, morfologia da superfície, composição e escoabilidade das partículas. Tamanhos típicos de partículas para a sinterização via Fusão a Laser de Leito de Pó (PBF-L) estão na faixa de 10 a 60 μ m. Métodos como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), análise de raios-X, difração a laser e peneiramento são usados para examinar a forma, morfologia e distribuição de tamanhos dos pós. A escoabilidade é medida por funis, como o de Hall.

Na técnica de MA, a caracterização experimental dos pós metálicos se limita à medição de propriedades como diâmetro médio, distribuição granulométrica e densidade de compactação, sendo inadequada para determinar uma configuração específica para a deposição do leito de pó. Diferentes processos de produção de pós, como o Processo de Eletrodo Rotativo a Plasma (PREP), resultam em partículas perfeitamente esféricas com superfícies lisas. Partículas de pós do processo de Atomização Rotativa (RA) têm superfície lisa, mas não são esféricas. O processo de Atomização a Gás (GA) apresenta morfologia esférica com textura de superfície ondulada, incluindo partículas ligadas chamadas satélites, que aumentam a rugosidade. Pós produzidos pelo processo de Atomização com Água (WA) têm principalmente partículas com formas irregulares e texturas de superfície grosseira, resultando em menor escoabilidade (DeRoy et al., 2018). As micrografias dos pós obtidos por cada técnica podem ser vistas na Figura 1.

O comportamento do pó metálico é crucial na MA, onde sua propagação depende da escoabilidade. Métodos para avaliar a escoabilidade nem sempre especificam a melhor condição de escoamento, considerando diferentes tamanhos e formas. Na técnica PBF-L, o comportamento do pó é crítico, sendo influenciado por fatores externos, como umidade, geometria, tensões entre partículas, rugosidade da superfície, estado de oxidação e propriedades magnéticas. A coesão excessiva pode limitar o fluxo de deposição, afetando a qualidade final. Portanto, uma descrição precisa do comportamento do pó é essencial para garantir um processo eficiente (Marchetti e Hulme, 2021).

Figura 1 - Imagens de MEV de pós metálicos fabricados pelo processo (A) PREP, (B) RA e (C) GA. Comparação de formatos de pós fabricados pelos processos (D) GA e (E) WA.



Fonte: (DebRoy et al., 2018).

Os metais em pó usados na Manufatura Aditiva (MA) são distribuídos sobre uma camada compactada para a sinterização direta, sendo esse processo repetido camada após camada para formar o produto. A dispersão de partículas pode ser simulada usando o método de elementos discretos – modelagem de elementos finitos 3D (DEM-FEM) para investigar os efeitos das formas das partículas e condições de operação no leito de pó, considerando rugosidade da superfície e fração de volume sólido (Haeri et al., 2016).

As propriedades das matérias-primas dependem de seus processos de fabricação. Os pós metálicos produzidos pelo processo WA depositam camadas mais finas no leito de pó em comparação com os processos PREP, GA e RA. No entanto, devido a texturas de superfície grosseiras e formas irregulares, componentes feitos pelo processo WA têm alta rugosidade. Em contraste, PREP e WA apresentam distribuições de tamanho de partícula mais uniformes, promovendo boa fusão, interconexão e acabamento superficial. Os pós via PREP são considerados de alta qualidade, proporcionando fluxo contínuo. Componentes sinterizados via MA com PREP têm baixa porosidade e alta densidade, mas são caros (DebRoy et al., 2018).

Marchetti e Hulme-Smith (2021) destacam que a escoabilidade dos pós metálicos pode ser avaliada por várias técnicas, como taxa de fluxo, densidade aparente, ângulo de repouso e tensão de cisalhamento. A escolha do método afeta o estado de tensões, densidade compactada e outros fatores, influenciando o comportamento do fluxo de alimentação. Funis com diferentes geometrias são comuns, como o medidor de fluxo Hall (ASTM B213-17) e o funil de Carney (ASTM B964), recomendados para pós não coesivos e coesivos, respectivamente.

Em geral, o comportamento físico dos pós metálicos influencia diretamente os parâmetros do processo de fabricação por MA, via técnica PBF-L. As propriedades-chave são a forma das partículas, distribuição e tamanho dos grãos, densidade aparente, espessura das camadas depositadas e propriedades metalúrgicas (Pal, Drstvensek e Brajljić, 2018). A compactação do pó pode ser quantificada pela densidade aparente, obtida por testes de escoabilidade que promovem densidade compactada. O trabalho visa apresentar um método para escoabilidade e espalhabilidade em PBF-L para misturas de pós finos e irregulares, analisando o comportamento do fluxo, escoabilidade e densidade de misturas de carbonetos cimentados (materiais compostos principalmente por carbonetos metálicos – como o caso dos metais duros) e cermetos com alta fase ligante (30% em peso), usando um dispositivo vibrador e rolo compactador.

Material e Métodos

As características dos pós metálicos utilizados neste trabalho estão apresentadas na Tabela 1. As composições químicas dos carbonetos cimentados e cermetos, baseados em refratários de NbC, WC e W, com matrizes metálicas de Co e Ni, estão apresentadas na Tabela 2. Os pós são provenientes das empresas: WC, da Buffalo Tungsten Inc. (EUA), pó eletrolítico de cobalto da Nanjung Hanrui Cobalt Co, pó de níquel carbonílico da CVMR Corporation/Vale Inco Limited (International Nickel Company) e NbC da China da F&X Electro-Materials Limited.

Tabela 1 - Propriedades dos pós metálicos e rotas de manufatura.

Pós (Símbolo)	Densidade Teórica (g/cm ³)	Tamanho Médio de Grão (μm)	Pureza (%)	Densidade Aparente (g/cm ³)	Rota de Manufatura
Carboneto de Tungstênio (WC)	15,63	1,5	99,530	4,0	Hidrometalurgia e redução e carbonização por H ₂
Carboneto de Nióbio (NbC)	7,65	< 1,0	99,650	3,0	Redução direta via carbotérmica
Cobalto (Co)	8,91	2,0	99,970	2,0	Redução e precipitação (eletrolise)
Níquel (Ni)	8,91	5,0	99,847	2,5	Refino de gás carbonila.

Fonte: próprios autores.

O procedimento experimental tem início com a preparação dos pós metálicos, a partir de técnicas convencionais de metalurgia do pó, e o controle final consiste na caracterização dos pós metálicos, que inclui a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), teste de densidade aparente e escoabilidade dos pós. As densidades teóricas das ligas em estudo são apresentadas na Tabela 2. Os valores descritos foram obtidos pela expressão (1).

$$\rho_t = \left[\frac{\rho_{ligante} \times \rho_{carboneto}}{\rho_{carboneto} \times (\text{ligante}\%) + \rho_{ligante} \times (\text{carboneto}\%)} \right] \times 100\% \quad (1)$$

Tabela 2 - Composição química das misturas por proporção em peso e densidades.

Liga / Designação		Proporção em peso (%)				Densidade (g/cm ³)	
		Cerâmicas refratárias		Metálicos		Teórica	Aparente
		WC	NbC	Co	Ni		
Carbonetos Cimentados	WC-30Co	70,0	0,0	30,0	0,0	12,740	2,92 ± 0,07
	WC-30Ni	70,0	0,0	0,0	30,0	12,746	3,31 ± 0,07
	WC-30(Co,Ni)	70,0	0,0	15,0	15,0	12,743	2,90 ± 0,13
Cermetos	NbC-30Co	3,0	67,0	30,0	0,0	8,003	2,01 ± 0,06
	NbC-30Ni	3,0	67,0	0,0	30,0	8,005	1,84 ± 0,04
	NbC-30(Co,Ni)	3,0	67,0	15,0	15,0	8,004	1,82 ± 0,06

Fonte: próprios autores.

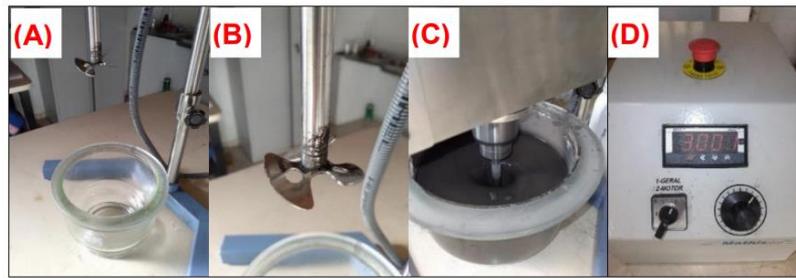
Preparação dos pós metálicos

Os pós metálicos de WC, NbC, Co, Ni e a combinação de Co/Ni, conforme definido na Tabela 2, foram misturados e homogeneizados por meio de um agitador convencional com recipiente de vidro, conforme mostrado na Figura 2 (A), com uma hélice marinha, Figura 2 (C), a 3000 rpm, Figura 2 (D). Após a etapa de mistura, o álcool isopropílico foi removido por meio de secagem convencional, em um forno a uma temperatura de 200 °C por 2 horas.

A morfologia dos pós metálicos

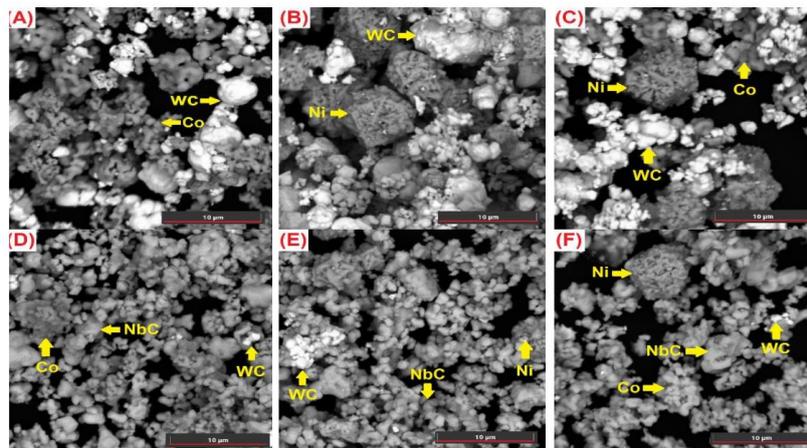
As formas das partículas das misturas de pós metálicos variam de acordo com sua rota de fabricação, conforme mostrado na Tabela 1. Os pós metálicos utilizados possuem partículas com formas irregulares com tamanho médio de grão menor que 10 μm, embora se possa observar pós com partículas predominantemente arredondadas e irregulares com satélites para W e WC; para NbC, partículas poligonais irregulares. As partículas de Ni carbonílico têm formatos dendríticos e porosos. Para o cobalto eletrolítico é facilmente evidenciado na Figura 3 (B) e (C), que as partículas são irregulares em forma e agregadas. Para se distinguir as partículas de cada pó na mistura, foi utilizado o próprio formato e tamanho dos grãos, assim como o contraste, causado pelas diferentes densidades dos materiais, presente nas micrografias.

Figura 2 - (A) Recipiente de vidro com capacidade máxima de 5 kg de pós metálicos, (B) agitador tipo hélice em configuração marítima para alta densidade, (C) homogeneização convencional e (D) variador de rotação da hélice.



Fonte: próprios autores.

Figura 3 - MEV BSE das misturas: (A) WC-30Co, (B) WC-30Ni, (C) WC-30(Co,Ni), (D) NbC-30Co, (E) NbC-30Ni e (F) NbC-30(Co,Ni).

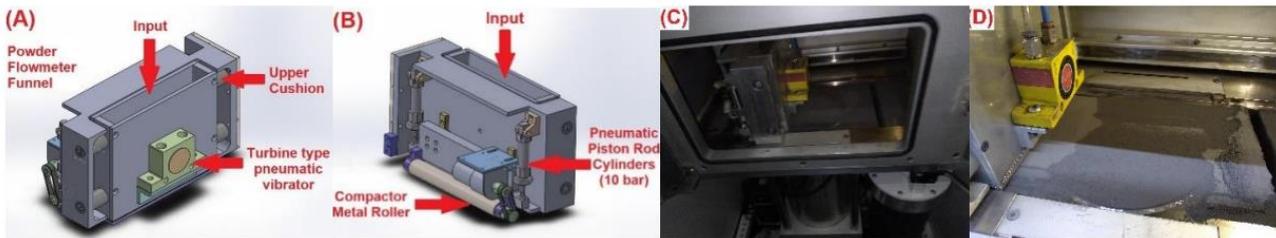


Fonte: próprios autores.

A construção do dispositivo para escoamento de pós com alta coesão

Um dispositivo do tipo recipiente vibratório foi projetado e construído, acoplado a um rolo metálico, conforme mostrado nas Figuras 4 (A) e (B), cuja velocidade de rotação é controlada independentemente de sua velocidade de deslocamento. A compactação é realizada com esse rolo metálico de aço inoxidável polido, dentro da câmara de sinterização, no leito de pó, como apresentado na Figura 4 (C). A área de compressibilidade da mistura de pó é muito ampla (seção transversal e longitudinal); portanto, é muito difícil gerar alta pressão, como indicado na Figura 4 (D), quando comparado à rota convencional de metalurgia do pó. A compactação de camadas finas com um compactador de rolos é interessante para pós metálicos muito finos, especialmente para aplicações que se concentram apenas na impressão tridimensional, SLS, SLM, 3DP (Budding e Vaneker, 2013). Nesta operação de compactação com rolo, o pó metálico precisa fluir sob o recipiente fluidizante que é simultaneamente espalhado e compactado; para isso, foi necessário selecionar e determinar uma peneira ou malha de aço inoxidável para controlar o fluxo de deposição dos pós das misturas preparadas. Vários métodos podem ser adotados para determinar o tamanho e distribuição das partículas. No entanto, o mais utilizado é o teste de peneiramento com telas de malha metálica, que permite uma visão adequada da distribuição granulométrica do material, assim como a separação em determinados intervalos, que devem ser designados pelo tamanho nominal das aberturas na malha metálica (ISO NBR 3310, 2000).

Figura 4 - Perspectivas isométricas do recipiente de pó e do dispositivo vibratório acoplado a um rolo compactador. (A) Vista frontal, (B) Vista traseira, (C) Dispositivo instalado dentro da câmara de sinterização e (D) Teste de escoabilidade e espalhabilidade das misturas de pó no leito de pó.



Fonte: próprios autores.

A escolha da malha para o dispositivo vibratório

Um aparato de teste composto por um agitador, um conjunto de peneiras padronizadas (Figura 5) e uma balança analítica foi utilizado. Diversas peneiras foram escolhidas com base nas características dos pós, como evidenciado na caracterização via MEV BSE. As malhas selecionadas incluíram #60, #80, #120, #200, #230, #325, #400, seguindo padrões estilo Tyler-Mesh. A quantidade de pó recomendada pela norma (ASTM B214) para esse teste é de 100 g, mas quantidades de 200 g e 1000 g foram testadas para analisar o comportamento empírico, visto que o dispositivo vibratório construído tem capacidade experimental de até 1500 g. Foi recomendado manter a umidade relativa entre 45% e 70%, mas, devido à umidade, as misturas inicialmente não fluíram e aglomeraram, como mostrado na Figura 5 (A), obstruindo as aberturas da malha de aço inoxidável. Após secagem a 150 °C por 1 hora, o teste de distribuição granulométrica por peneiras foi realizado por 15 minutos entre 20 e 23 °C, Figura 6.

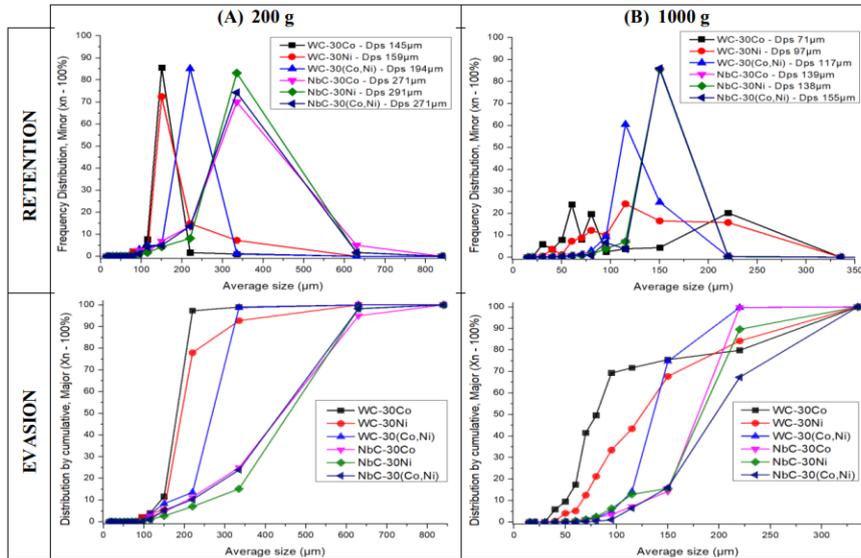
O teste visava determinar a melhor abertura da malha de aço inoxidável para o recipiente vibratório, conforme Figura 7 (B), (C), (D) e (E). A distribuição granulométrica por peneiramento foi expressa em porcentagem em massa da porção de teste com precisão de 0,1%. Com base nos resultados da Figura 5 (A) e (B), foi concluído que malhas abaixo de #100 (149 µm) são ideais para a mistura de 200 g, enquanto malhas abaixo de #50 (297 µm) são preferíveis para 100 g. O teste subsequente utilizou malhas #35 e #50 para garantir o escoamento adequado das misturas, permitindo a realização de testes com pressões variáveis de 0,2 MPa (400 Hz) a 0,35 MPa (520 Hz) no sistema. O procedimento técnico envolveu uma amostra de 1500 g para cada mistura de pó, com medidas de fluxo e densidade aparente obtidas a partir dos valores médios de 10 medições. A densidade aparente foi calculada conforme a expressão (2). O recipiente utilizado para avaliação de densidade aparente tinha dimensões internas de Ø 3,0 x 3,5 cm, seguindo a norma ASTM B964.

$$\rho_{aparente} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}} \quad (2)$$

A distribuição estatística de tamanhos ou granulometria das misturas é comumente expressa pela frequência relativa das partículas retidas ou evitadas para determinados diâmetros. Curvas de fração cumulativa de partículas com diâmetros menores e maiores que a média são utilizadas para representar a distribuição, conforme ilustrado na Figura 7 (A) e (B). Entretanto, o comportamento empírico varia com diferentes massas comparadas. As partículas classificadas como ultrafinas, de acordo com o sistema Tyler para malhas de 50 (300 µm) a 400 (38 µm), são consideradas para ambas as massas testadas (200 g e 1000 g). O diâmetro médio das partículas (D_{ps}), conforme expresso na equação (3), é utilizado em estudos relacionados a fenômenos interfaciais, sistemas particulados, transferência de massa, cinética e catálise (2009).

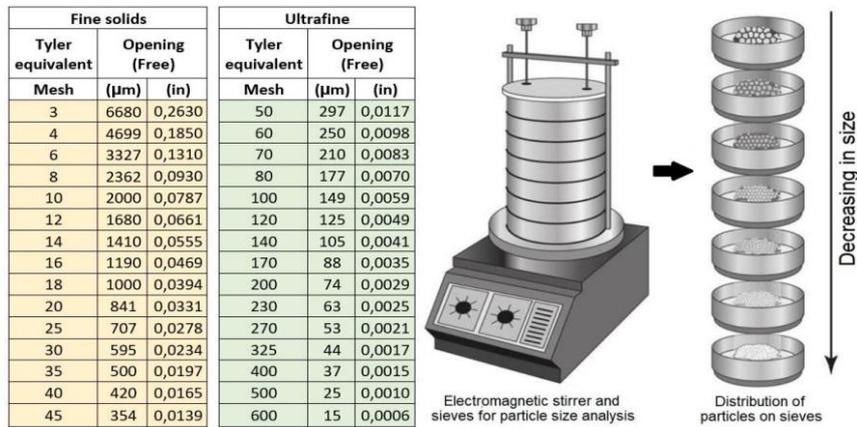
$$D_{ps} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{D_i}\right)} \quad (3)$$

Figura 5 - Distribuição do tamanho de partículas, teste de retenção (Dps Sauter) e teste de evasão, para misturas com (A) 200 g e (B) 1000 g.



Fonte: próprios autores.

Figura 6 - Classificação dos sólidos de acordo com o sistema Tyler.



Fonte: adaptado de (Cremasco, 2009).

Figura 7 - (A) Mistura úmida e aglomerada na malha de aço inoxidável, (B) instalação do recipiente vibratório para o teste de escoabilidade, (C) preenchimento máximo da mistura (1.500 g) no recipiente vibratório, (D) parte interna do recipiente vibratório com a malha de #35 mesh (500 μm) e (E) obtenção do fluxo de massa e densidade aparente.

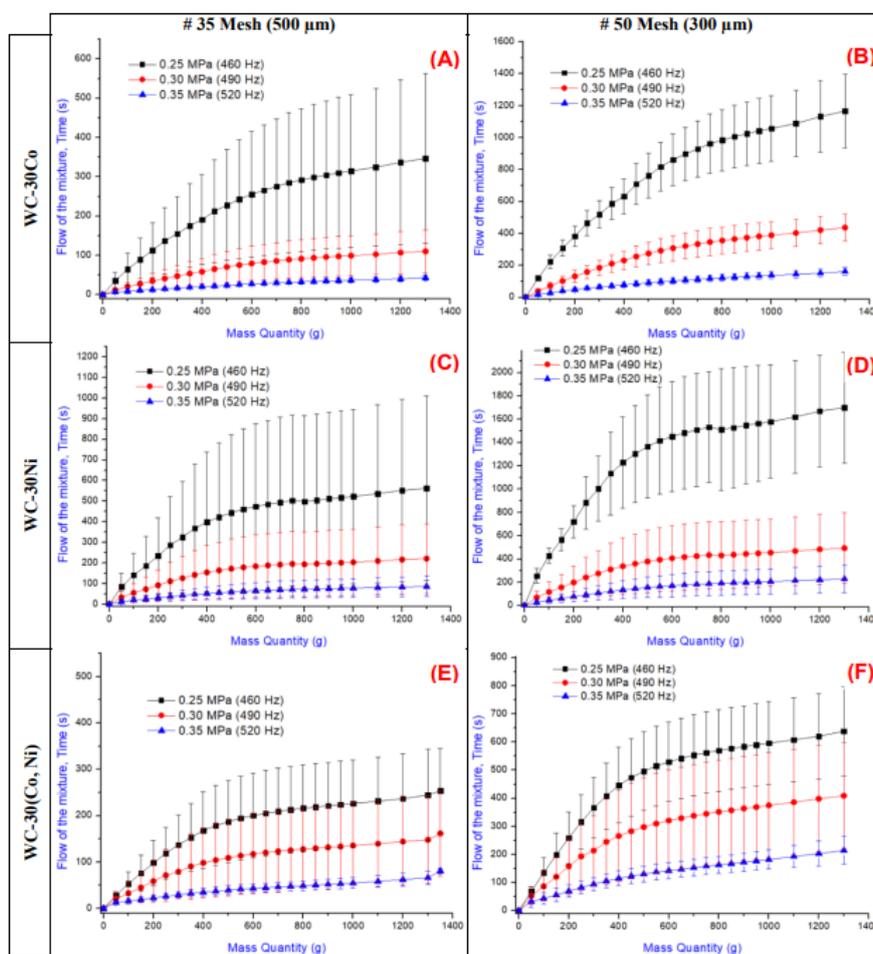


Fonte: próprios autores.

Resultados e Discussão

O teste de escoamento das misturas de pó, carbonetos cimentados: WC-30Co, WC-30Ni, WC-30(Co,Ni), conforme mostrado na Figura 8 (A) a (F), e NbC-30Co, NbC-30Ni, NbC-30(Co,Ni), para Figura 9 (A) a (F) respectivamente, é simulado a partir do dispositivo construído e expresso em forma gráfica, relacionando o fluxo de massa em função do tempo para as malhas #35 (500 μm) e #50 (300 μm). Para esta nova metodologia de medição, foi colocado no recipiente uma quantidade de pó variando de 1300 a 1400 g, a fim de fluir por gravidade e pela vibração do dispositivo, variando de 0,25 MPa (460 Hz), 0,30 MPa (490 Hz) e 0,35 MPa (520 Hz).

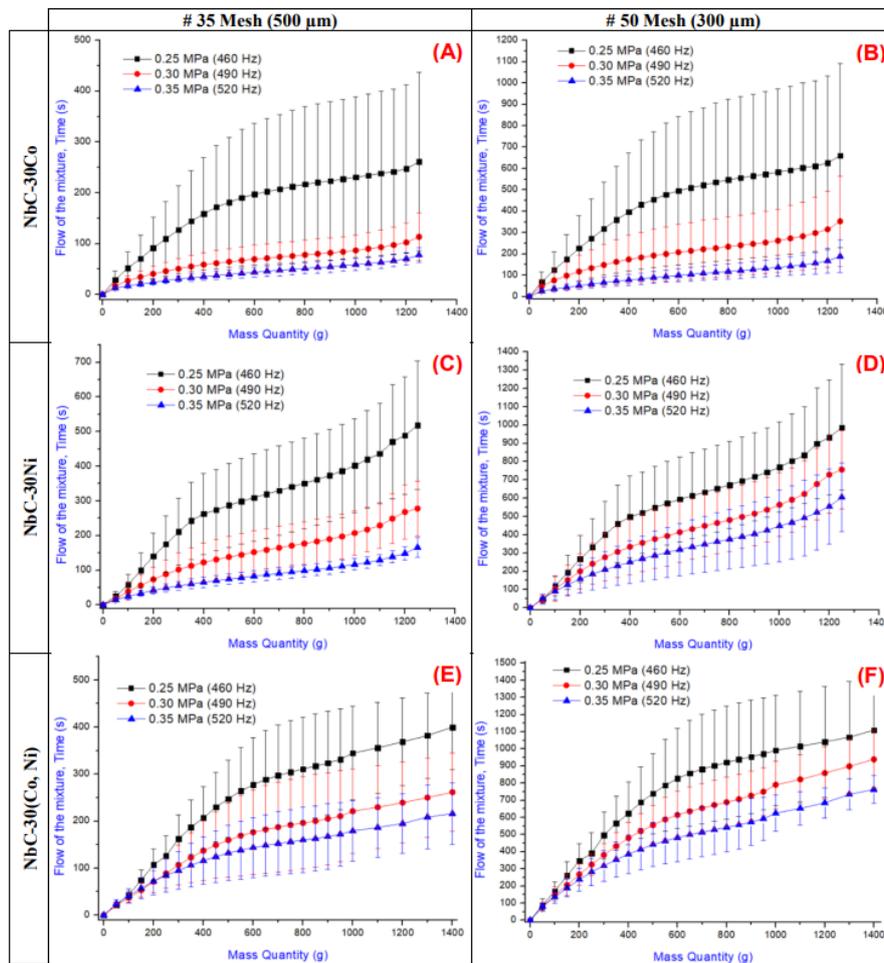
Figura 8 - Fluxo de massa de misturas de pós, para malha #35 e malha #50, dependendo da pressão no sistema ou da frequência de vibração do recipiente para as ligas WC-30Co, WC-30Ni e WC-30(Co, Ni).



Fonte: próprios autores.

Uma observação importante é que, para valores abaixo de 0,20 MPa, para as peneiras de malhas #35 e #50, as misturas de pó não fluíram, as partículas foram compactadas (densidade batida). E para uma pressão de 0,40 MPa, o pó foi expelido em grande quantidade do topo do recipiente. A escoabilidade das misturas de carbonetos cimentados não é uma propriedade inerente, ela depende não apenas de propriedades físicas como também da forma, tamanho de grão, umidade relativa do ar, entre outros fatores. Além disso, também deve-se considerar o estado de tensões e o método de manuseio. O fluxo de pós em métodos individuais de tecnologias aditivas é uma área complexa de estudo (Zegzulka et al., 2020). Na etapa de espalhamento das misturas, no leito de pó, com a régua raspadora e o rolo travados, as camadas de deposição, nos primeiros testes preliminares, mostraram irregularidades na superfície e falta de adesão entre as partículas misturadas, conforme mostrado na Figura 10 (A) e (B), para pressões de 0,20 a 0,25 MPa para as peneiras de malhas #35 e #50.

Figura 9 - Fluxo de massa de misturas de pós, para malha #35 e malha #50, dependendo da pressão no sistema ou da frequência de vibração do recipiente para as ligas NbC-30Co, NbC-30Ni e NbC-30(Co,Ni).



Fonte: próprios autores.

Para as pressões de 0,30 e 0,35 MPa, para ambas as malhas, as camadas depositadas foram uniformes e difusas. Por essa razão, o controle do fluxo de massa versus tempo de fluxo foi realizado para controlar a velocidade de transferência do dispositivo vibratório. Além disso, houve uma grande melhoria na densificação, passando de uma condição de densidade aparente para uma densidade compactada ou prensada, conforme mostrado na Figura 10 (C). Por esse motivo, decidiu-se manter o rolo de metal do dispositivo vibratório travado para a etapa de sinterização direta, e o melhor parâmetro foi uma malha de peneira #35 e a pressão no sistema para misturas à base de WC e NbC, respectivamente, 0,30 e 0,35 MPa. Na Figura 10 (D), com a pressão no sistema de 0,35 MPa e a malha #35, pode-se observar um fluxo excessivo de pó e resíduos nas laterais do leito de pó.

Figura 10 - Comportamento da espalhabilidade da mistura de pó, na cama de pó, em função da pressão do sistema ou da frequência de vibração do dispositivo (A) 0,20 MPa (400 Hz), (B) 0,25 MPa (460 Hz), (C) 0,30 MPa (490 Hz) e (D) 0,35 MPa (520 Hz).

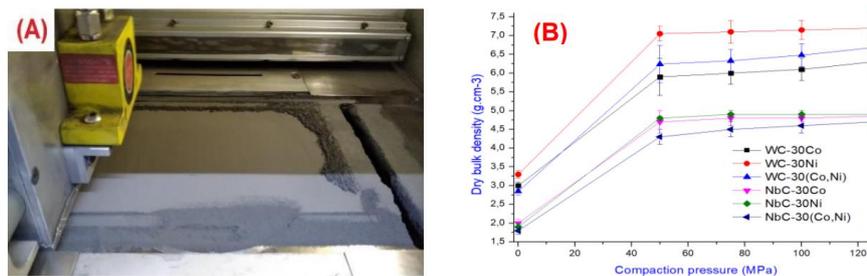


Fonte: próprios autores.

Para alcançar a densidade compactada ideal no leito de pó, os parâmetros associados, como velocidade linear e rotacional do rolo, propriedades de superfície do rolo e espessura da camada de pó, devem ser ajustados cuidadosamente. Esse processo de otimização é complexo, onde as tensões aplicadas à camada de pó são baseadas em métodos de tentativa e erro. Apesar da simplicidade da compactação por rolo, existem aspectos desconhecidos dessa técnica do ponto de vista analítico. Se for utilizada modelagem matemática e/ou simulação, será possível ajustar os parâmetros do processo para melhor controlar a densidade verde e a porosidade do produto compactado. A densidade relativa (ρ_r) da camada compactada de pó é expressa pela equação (3) (Shanjani, Toyserkani, 2008). O processo de compactação com rolos metálicos, com granulação a seco, é amplamente aplicado nas indústrias alimentícia e farmacêutica; pode produzir continuamente grandes quantidades de produtos granulados compactados a um custo comparativamente baixo. Duas das principais vantagens desse processo são que ele é a seco e contínuo. Apesar de ser um processo simples, o desenvolvimento de uma compreensão quantitativa tem se mostrado difícil devido ao comportamento complexo de materiais particulados, que na parte operacional da compactação pode resultar em compactados lineares insatisfatórios (Gururajan et al., 2005). Outra vantagem é que, para baixas pressões e camadas finas (< 1 mm), como mostrado na Figura 11 (A) e (B), a densidade compactada seca.

$$\rho_r = \frac{\text{densidade compactada do pó compactado}}{\text{densidade do material do pó}} \quad (4)$$

Figura 11 - (A) Taxa de fluxo de massa do dispositivo de vibração com malha #35 (500 μm) da mistura WC-30Co e (B) efeito da pressão de compactação na densidade compactada seca das misturas refratárias.



Fonte: próprios autores.

Está prevista a realização de estudos abrangentes sobre o comportamento de compactação no leito de pó, utilizando o rolo metálico. O modelo de Johanson (1965), uma técnica simples de medição, será empregado para investigar as propriedades do material particulado a seco, incluindo fator de compressibilidade e ângulo de atrito entre as paredes. Essa abordagem quantitativa pode prever o desempenho de compactados verdes. No entanto, ainda não foi conduzida uma validação experimental das curvas de fluidez das misturas, nem uma simulação mais detalhada usando um compactador de rolos para produzir aglomerados a partir de partículas finas secas alimentadas por gravidade, conforme proposto por Gururajan et al. (2005).

Conclusões

Este trabalho continua em desenvolvimento, e as considerações até o momento são:

- O dispositivo desenvolvido, utilizando um recipiente vibratório acoplado a um rolo metálico compactador, representa uma nova estratégia para a escoabilidade, espalhabilidade e compressibilidade de misturas de pós refratários e metálicos, especialmente para carbonetos cimentados, no leito de pó destinado a técnicas de sinterização via MA PBF-L;
- Este método é apropriado apenas para pós finos ou misturas de pós que não contenham ligantes poliméricos, estejam secos e não possam fluir por funis de dosagem convencionais;

- Com este método, foi possível determinar a taxa de fluxo de massa, velocidade ou escoabilidade e densidade aparente de misturas de carbonetos cimentados e cermetos, em um único teste, para pós finos menores que 10 μm ;
- Este novo dispositivo tem o propósito de preencher camadas no leito de pó de forma uniforme, sem desperdício de massa; isso está relacionado às propriedades de fluxo, as quais, portanto, influenciam as taxas de produção e a uniformidade das peças compactadas;
- A capacidade das misturas de pó de carboneto WC-30Co, WC-30Ni, WC-30(Co,Ni), NbC-30Co, NbC-30Ni e NbC-30(Co,Ni) escoarem dentro do dispositivo vibratório é uma função das formas das partículas (mais irregulares) e que aumentam o atrito entre as partículas. Quanto maior o atrito, menor a taxa de fluxo das misturas de pó no leito de pó.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Doutorando Fábio Miranda pela parceria, à Brats – Filtros e Pós Metálicos, à Omnitek Tecnologia e ao Instituto Mauá de Tecnologia pelo apoio, bem como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil.

Referências Bibliográficas

- Budding, A.; Vaneker, T. (2013). New Strategies for Powder Compaction in Powder-based Rapid Prototyping Techniques. *Procedia CIRP*. 6. 528–533. 10.1016/j.procir.2013.03.100.
- Chiksha, S.; Shabalala, T.C.; Chikwanda, H. (2014). Effect of particle morphology and size on roll compaction of Tibased powders. *Powder Technology*. 264. 310-319. 10.1016/j.powtec.2014.05.033.
- Cremasco, M.A. (2014) Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. 2ed. – São Paulo: Blucher, 2014., p. 423.
- Debroy, T.; Wei, H.; Zuback, J.; Mukherjee, T.; Elmer, J.; Milewski, J.O.; Beese, A.; Wilson-Heid, A.; De, A.; Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. vol. 92. pp. 112-224. 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
- Gururajan, B.; Seville, J.P.K.; Adams, M.; Greenwood, R.; Fitzpatrick, S. (2005). Roll compaction of a pharmaceutical excipient: Experimental validation of rolling theory for granular solids. *Chemical Engineering Science*. 60. 3891-3897. 10.1016/j.ces.2005.02.022.
- Haeri, S.; Wang, Y.; Ghita, O.; Sun, J. Discrete element simulation and experimental study of powder spreading process in additive manufacturing. *Powder Technology*. 306. 10.1016/j.powtec.2016.11.002. (2016).
- Johanson, J. R. (1965). Stress and Velocity Fields in the Gravity Flow of Bulk Solids. *ASME J. Appl. Mech.*, 31, pp. 472 <https://doi.org/10.1115/1.3625850>
- Marchetti, L.; Hulme-Smith, C. (2021). Flowability of steel and tool steel powders: A comparison between testing methods. *Powder Technology*. 384. 10.1016/j.powtec.2021.01.074.
- NBR NM-ISO 3310-1 Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Pal, S.; Drstvensek, I.; Brajliah, T. Physical behaviors of materials in selective laser melting process. *DAAAM International Scientific Book 2018* pp. 239-256 Chapter 21. 4. 13, 2018. Disponível em <http://dx.doi.org/10.2507/daaam.scibook.2018.21> Acesso: 12 fev. 2022.
- Shanjani, Y.; Toyserkani. (2008) Material spreading and compaction in powder-based solid freeform fabrication methods: mathematical modeling. *International Solid Freeform Fabrication Symposium 2008*. Disponível em <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/14971> Acesso: 19/09/2022
- Zegzulka, J.; Gelnar, D.; Jezerská, L.; Prokes, R.; Rozbroj, J. (2020). Characterization and flowability methods for metal powders. *Scientific Reports*. 10. 10.1038/s41598-020-77974-3.
- Yusof, Y.A.; Smith, A; Briscoe, B. (2005). Roll compaction of maize powder. *Chemical Engineering Science*. 60. 3919-3931. 10.1016/j.ces.2005.02.025.