

MODELAGEM NÚMERICA E ANÁLISE DE LIGAS METÁLICAS REFRAATÁRIAS PARA UTILIZAÇÃO EM MANUFATURA ADITIVA PELA TÉCNICA DE FUSÃO SELETIVA A LASER EM LEITO DE PÓ METÁLICO (PBF-L)

Victor Buso Fernandes de Campos¹; Marcelo Otávio dos Santos²

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

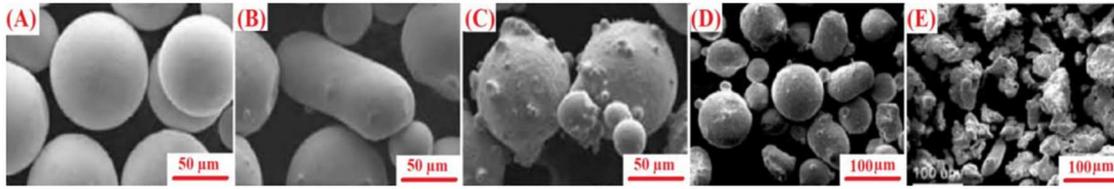
²Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. *As ligas metálicas refratárias a base de tungstênio (W) têm atraído a atenção em diversas áreas industriais, como metalmeccânica, siderúrgicas, militares, entre outras. A produção de peças refratárias por técnicas de manufatura aditiva, como Fusão em Leito de Pó a Laser (PBF-L), tem sido um grande desafio, devido à complexa otimização dos parâmetros do processo para melhorar densidade, porosidade e microtrincas, visando obter uma microestrutura a mais homogênea possível. Neste trabalho de Iniciação Científica foram modeladas e analisadas numericamente amostras de ligas a base de W, através de técnicas de simulação numérica por elementos discretos (DEM) para posteriormente serem comparadas com amostras obtidas experimentalmente pelas técnicas de PBF-L. Simulações computacionais, em geral, são ferramentas importantes e podem apresentar resultados muito confiáveis se utilizadas apropriadamente, poupando tempo no projeto. Além de todas as suas contribuições, este trabalho enfrentou alguns desafios no decorrer da pesquisa, sendo a capacidade de processamento do computador a maior deles. Através deste trabalho foi possível apresentar uma metodologia para a modelagem computacional do escoamento do pó de W de formato irregular através de uma peneira sujeita a vibração, o que permitiu o avaliar a propagação desse pó para posterior análise de espalhabilidade e homogeneidade.*

Introdução

Na técnica de manufatura aditiva (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 (DebRoy et al., 2018). As micrografias dos pós obtidos por cada técnica podem ser vistas na Figura 1.

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).

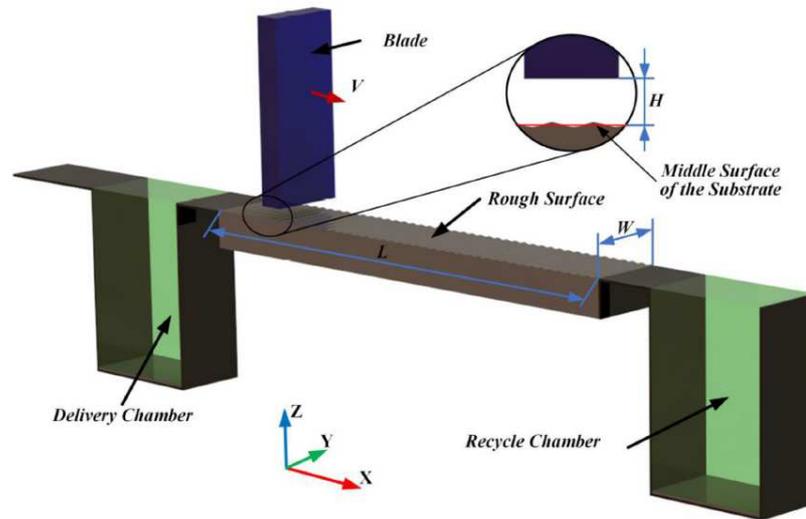
O comportamento do pó metálico é crucial na manufatura aditiva (MA), onde sua propagação depende da escoabilidade. Métodos para avaliar a escoabilidade nem sempre especificam a melhor condição de escoamento, considerando diferentes tamanhos e formas. Na técnica PBF-L, o comportamento do pó é crítico, 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).

Nesse sentido, o processo de espalhamento de pó é fundamental para as propriedades do leito de pó, como a densidade de empacotamento, que afeta a transferência de calor e massa nas interações laser-partícula e, portanto, os produtos fabricados (Ziegelmeier et. al. 2015 e Gu et. al. 2019). Geralmente, uma camada de pó lisa e homogênea contribui para uma fusão de pó estável. Além disso, uma camada de pó densa favorece uma maior condutividade térmica efetiva (Sih, et. al. 2004), e a absorvidade de potência do laser é maior (Tran et al. 2017).

Os metais em pó usados na MA são distribuídos sobre uma camada compactada para a sinterização direta, sendo esse processo repetido camada após camada para formar o produto. E a dispersão de partículas pode ser simulada computacionalmente usando o método de elementos discretos (DEM) 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).

Em seu estudo, Xiang et. al. (2021), procurou revelar o efeito da morfologia da superfície do substrato no processo dinâmico de espalhamento de pó e o efeito das condições de espalhamento na qualidade de empacotamento, onde propôs sugestões úteis para melhorar a eficiência de espalhamento e a qualidade de empacotamento. Um modelo DEM correspondente ao sistema prático de espalhamento de pó foi desenvolvido, conforme descrito na Figura 2.

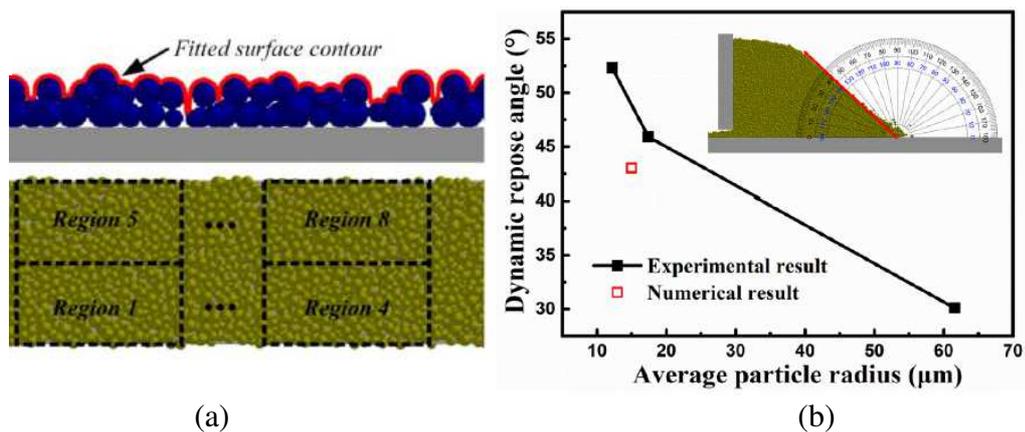
Figura 2 – Imagem esquemática da modelagem DEM para o processo de espalhamento do pó.



Fonte: Xiang et. al. (2021)

Ainda em seu trabalho, Xiang et. al. (2021), analisam o efeito da morfologia da superfície do substrato com diferentes rugosidades (Fig. 3a). Finalmente, avaliam o efeito das condições de espalhamento (Fig. 3b), ou seja, a velocidade de espalhamento, a espessura da camada e a orientação da textura da superfície do substrato, onde sugestões práticas são propostas, e experimentos foram conduzidos para verificar os resultados da simulação DEM e as sugestões que permitem orientações da superfície do substrato.

Figura 3 – (a) Rugosidade da camada de pó e densidade relativa, (b) simulação da resposta dinâmica do pó.



Fonte: Xiang et. al. (2021)

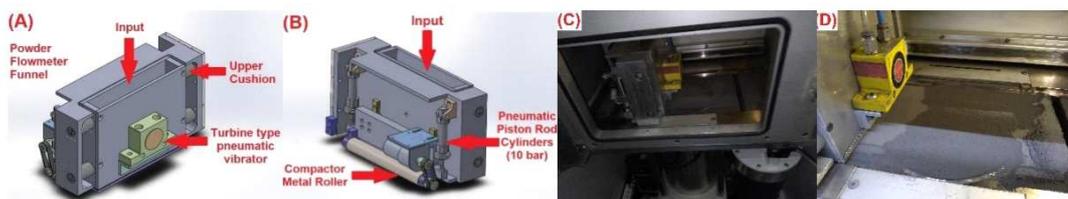
O método de elemento discreto (DEM) é eficaz para simular o procedimento dinâmico das partículas de pó e é amplamente utilizado para investigar o processo de espalhamento de pó para fabricação em manufatura aditiva. Lee et al. (2018), Markl et al. (2018) e Xiang et al. (2016) desenvolveram novos métodos para empacotar camadas de pó para fabricação em manufatura aditiva com base no DEM. Em seus modelos, técnicas

como escalonamento de massa e algoritmos estocásticos foram usadas para melhorar a eficiência de empacotamento. Parteli e Pöschel (2016) estabeleceram uma ferramenta numérica para simular o processo de espalhamento de pó baseado em rolo para fabricação aditiva, considerando formas geométricas complexas de partículas. Seus resultados mostraram que uma maior velocidade de espalhamento resultou em uma maior rugosidade da superfície da camada de pó, e que uma distribuição de tamanho de partícula mais ampla poderia resultar em maior rugosidade da superfície.

Haeri et al. a(2017) e b(2017), investigaram os efeitos da forma da partícula, velocidade de espalhamento, modo de espalhamento de pó (rolo/lâmina) e a forma de espalhadores baseados em lâminas e obtiveram resultados significativos. Nan et al. (2019 e 2020) simularam o processo de espalhamento de pós com base no DEM e investigaram os efeitos da altura da folga, velocidade de espalhamento da lâmina e velocidade de rotação na banda de cisalhamento e no fluxo de massa. Chen et al. (2019 e 2020) investigaram a dinâmica de espalhamento de pó e analisaram a qualidade da superfície, densidade de empacotamento e força de contato sob diferentes parâmetros. Ma et al. (2020) construíram um modelo DEM de espalhamento de pó baseado em lâmina e investigaram o efeito da fração fina na fluidez; foi demonstrado que a fluidez diminuiu à medida que a quantidade de partículas finas aumentava. Meier et al. (2019) e Averardi et al. (2020) investigaram o efeito do tamanho das partículas de pó na qualidade de empacotamento da camada de pó. Os resultados mostraram que a qualidade de empacotamento se degradou à medida que o tamanho das partículas diminuiu.

Desta forma, este trabalho de Iniciação Científica pretende contribuir com a pesquisa na área de simulação computacional DEM, através do estudo de escoabilidade do pó não esférico de liga de tungstênio (W) por meio de um dispositivo vibratório (Fig. 4), previamente projetado e fabricado pelo Doutorando Fábio Miranda, que apoia este trabalho em uma parceria da Universidade de São Paulo – USP com o Instituto Mauá de Tecnologia – IMT.

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 da máquina e (D) Teste de escoabilidade e espalhabilidade das misturas de pó no leito na máquina.



Fonte: Miranda, et al. (2024).

O dispositivo previamente desenvolvido (Fig. 4), é um recipiente vibratório configurado exclusivamente para atender o preparo do pó visando melhorar sua escoabilidade no processo de MA, otimizando metodologias para uma matéria prima específica (pós-metálicos). Este funciona quando são despejados os pós na câmara de vibração, que passam por peneiras (*meshs*) ao mesmo tempo em que o equipamento vibra, e logo após isso, o pó cai na mesa da máquina, formando o leito para em seguida ser compactado por um rolo compressor acoplado ao dispositivo.

Material e Métodos

A técnica computacional adotada para simular o escoamento dos pós de tungstênio (W) foi a de modelos de elementos discretos (DEM), através do software ANSYS ROCKY.

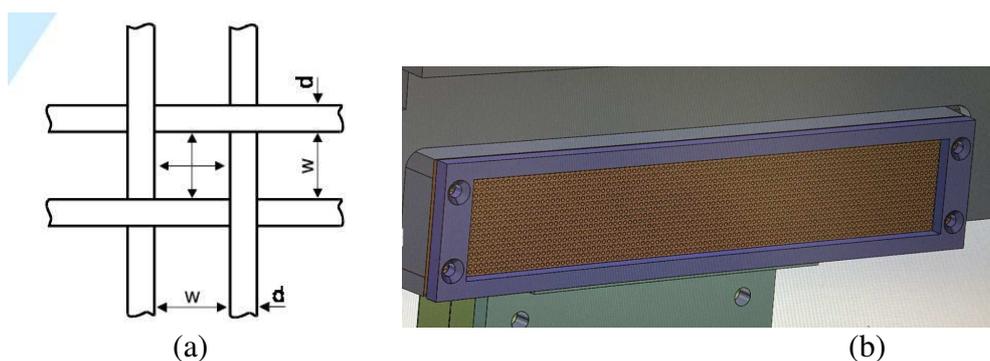
Foram consideradas três situações diferentes para realização das simulações, sendo elas: (1) pós perfeitamente esféricos (modelo ideal e convencional de mercado) escoando por gravidade, (2) pós caracterizados (modelos não esféricos) escoando por gravidade e (3) pós não esféricos escoando por gravidade adicionada a vibrações impostas pelo dispositivo.

A análise das situações (2) e (3), serão objeto de um estudo mais profundo nesta pesquisa. Na situação (2), será possível observar o escoamento e deslocamento do pó, caindo de uma altura de 30 mm até alcançar a mesa da máquina, formando assim o leito de pó. Na situação (3), o pó também será previamente despejado na câmara, porém, serão provocadas vibrações no dispositivo, o que pretende favorecer o seu escoamento através da malha de peneiramento. Neste caso, será possível simular diferentes frequências de vibrações a fim de obter a melhor geometria e escoabilidade do pó.

Escolha das peneiras para simulação

Para a determinação do tamanho e distribuição dos pós metálicos, vários métodos podem ser utilizados, sendo o mais comum - peneiramento, ele permite uma visão adequada da distribuição granulométrica do material, bem como sua separação em faixas determinadas (Fig. 5). As peneiras ou malhas são padronizadas por norma (NBR-NM-ISO 3310-1), como as matérias-primas do projeto apresentam 10 μm , foi necessário a seleção de malhas de maior numeração (*Tyler-Mesh*).

Figura 5 – (a) Dimensionamento da malha formadora da peneira conforme a norma NBR-NM-ISO 3310-1, (b) Modelo CAD da peneira utilizada no dispositivo.



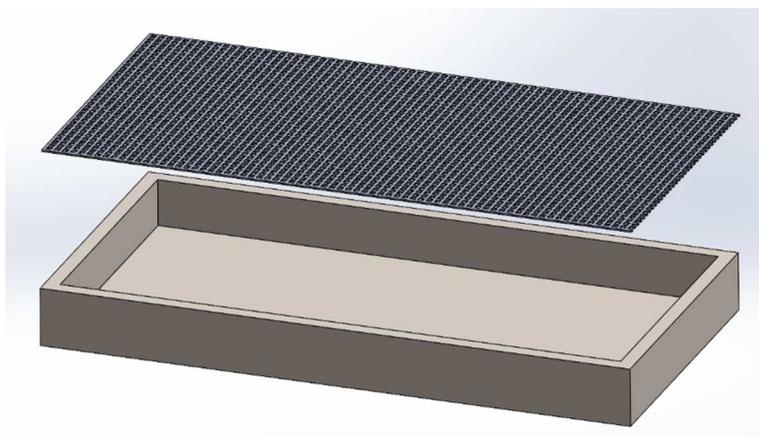
Fonte: (a) Adaptado de NBR-NM-ISO 3310-1, (b) próprios autores.

O procedimento de análise consiste em selecionar um jogo de peneiras de acordo com as características esperadas para o material utilizado, seguindo um passo a passo: (a) organizar as peneiras no equipamento de vibração em ordem decrescente de aberturas, (b) pesar uma amostra de 100g de pó metálico (no caso do experimento foram realizados testes com 200g e 1000g), (c) colocar a amostra sobre a peneira superior do conjunto, (d) ligar o vibrador de peneiras por 10 minutos, após isso (e) pesar cuidadosamente o material retido em cada uma, o material sobressalente deve ser retirado com um pincel macio e

com cautela, a fim de evitar deformação na malha, o peso total do pó retido deverá representar 99,9% do total adicionado no início do peneiramento, sendo que se a perda for superior a 0,1g o procedimento deve ser repetido.

O resultado da distribuição granulométrica será obtido ao calcular a porcentagem em peso retida em cada uma das peneiras. Em Maiolini, et al. (2023), apontaram como ideal para o procedimento as malhas #35 (w: 0,50mm) e #50 (w: 0,87mm), que apresentaram melhor escoabilidade e geometria do pó metálico para a situação que melhor se adequa ao projeto. Desta forma, o conjunto peneira e reservatório do leito foi modelado pelo CAD Solidworks (Figura 6).

Figura 6 – Sistema *mesh32* e leito em modelagem 3D.



Fonte: próprios autores.

Propriedades do pó

Nesta pesquisa, devido a uma análise de partículas, a simulação para algumas delas se tornou inviável, devido ao tempo e demanda de processamento computacional, portanto, apenas uma foi simulada, o carboneto de tungstênio, cujas propriedades simuladas podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades dos pós metálicos inseridas no software Ansys Rocky.

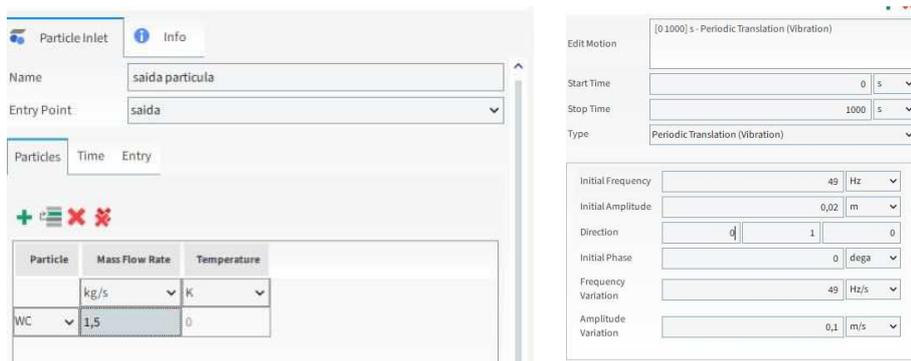
Pós (Símbolo)	Densidade Teórica (g/cm ³)	Tamanho Médio de Grão (µm)
Carboneto de Tungstênio (WC)	15,63	1,5

Fonte: (Maiolini, et al. 2023)

Simulações

O procedimento de de simulação computacional utilizando o software ANSYS ROCKY exige diversas etapas preliminares de *setup*, como as definições de características mecânicas e geométricas do pó, assim como os parâmetros de deslocamentos e vibrações do dispositivo, como observado na Figura 7.

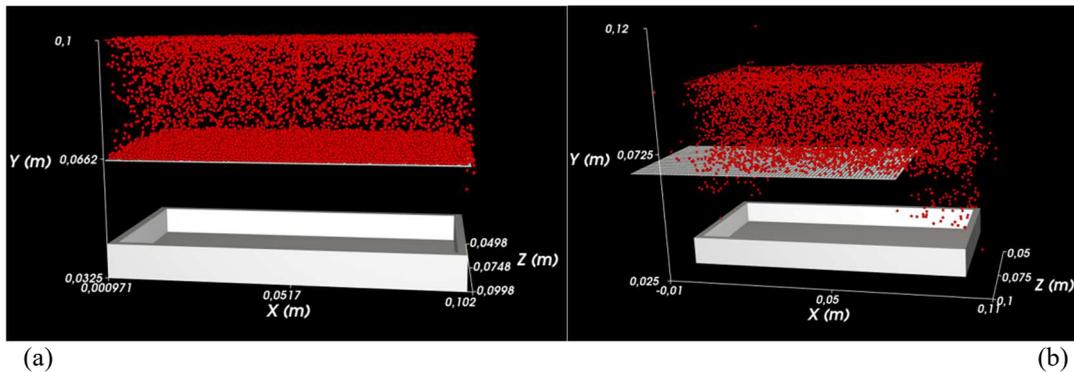
Figura 7 – Setup no software ANSYS ROCKY.



Fonte: próprios autores.

Para realizar a simulação computacional, alguns pontos para otimizá-la foram observados, como a mudança na escala das peneiras metálicas, o leito e o diâmetro do pó foram alterados, assim como algumas propriedades generalizadas foram usadas de acordo com os padrões do software, além de adotar como peneira fixa a *mesh32*. O desenvolvimento das simulações, começou a partir da modelagem 3D das estruturas base e de interesse na pesquisa – *mesh* e leito, após isso, inserção dos parâmetros e dados pré estabelecidos do pó e propriedades das modelagem dentro do software, para daí rodar a simulação. A Figura 8a apresenta o pó pronto para iniciar seu escoamento através da peneira por gravidade, enquanto a Figura 8b mostra o sistema vibrando, permitindo assim um escoamento mais homogêneo através da peneira.

Figura 8 – Frames das simulações realizadas, sendo, (a) escoamento por gravidade e (b) escoamento por gravidade com vibração no dispositivo, respectivamente.



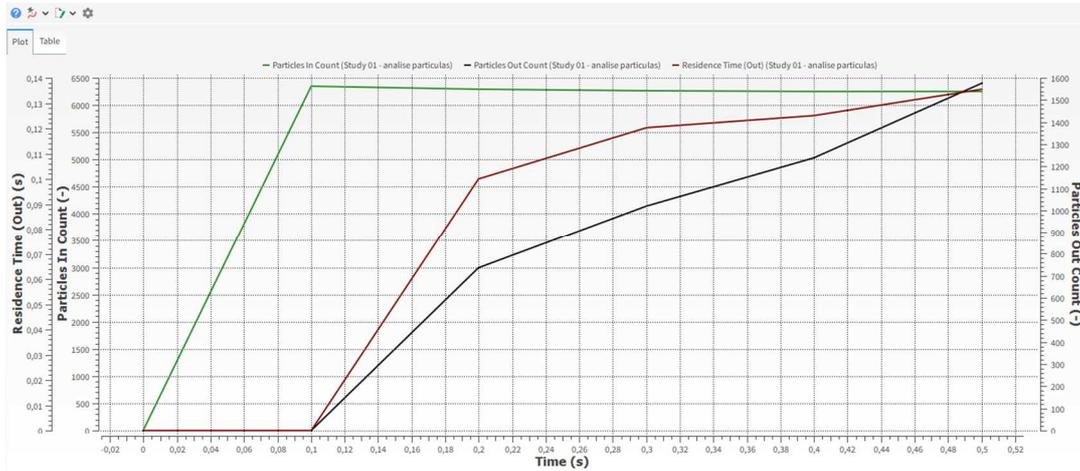
Fonte: próprios autores.

Resultados e Discussão

A partir das simulações realizadas no software ANSYS ROCKY foi possível representar o modelo de escoamento dos pós de carboneto de tungstênio e avaliar seu desempenho comparativo quando sujeito ou não a vibração. No gráfico da Figura 9, temos a relação entre saída e tempo de residência das partículas pelo tempo. O tempo de residência se caracteriza pelo tempo em que uma partícula permanece no sistema em análise, no escoamento por ser uniforme, se caracteriza como tempo médio, ao observar sua curva, observa-se um deslocamento nulo até o intervalo de 0.1s, o que pode indicar algum obstáculo obstruindo a passagem das partículas do pó. A saída das partículas ao

longo do tempo, caracteriza a curva de escoamento do sistema, portanto, ao analisar o gráfico abaixo, é possível observar um fluxo de saída crescente, e um escoamento sem muitos picos, tendendo ao comportamento linear.

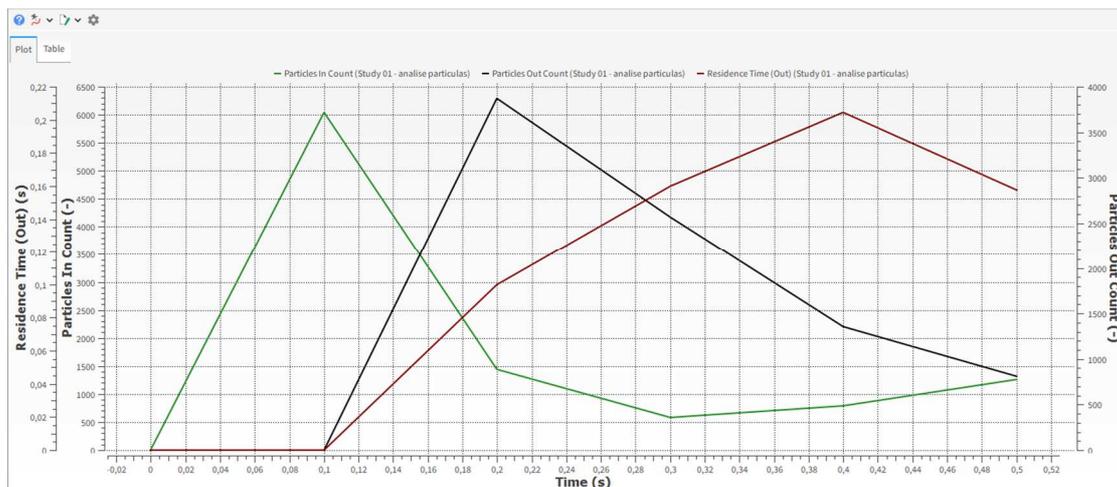
Figura 9 – Saída e tempo de residência das partículas no sistema ao longo do tempo (escoamento).



Fonte: próprios autores.

Os resultados obtidos e apresentados através do gráfico da Figura 10, também representam o tempo de residência e saída das partículas. As vibrações atuam diretamente em ambas as propriedades, afetando principalmente o comportamento dinâmico da partícula quando em contato com a superfície vibrante. No início do gráfico, é possível observar que o tempo de residência é muito pequeno ou nulo, ou seja, quando temos nula ou baixa vibração o tempo de residência é mais longo, no momento em que começam as vibrações o tempo de residência tem seu maior pico, e diminui conforme a vazão, assim como a saída das partículas também aumenta, demonstrando que as vibrações contribuem para a dinâmica e, conseqüentemente, escoamento dos pós.

Figura 10 – Saída e tempo de residência das partículas no sistema ao longo do tempo (vibração).



Fonte: próprios autores.

Conclusões

Apesar do avanço experimental e computacional, esta pesquisa continuará sendo explorada e desenvolvida, e diante de todos os resultados as conclusões tiradas foram:

- As simulações computacionais DEM são grandes otimizadoras e também muito precisas, porém, a capacidade de processamento e recursos computacionais podem ser um empecilho na prática ao pesquisador.
- As frequências de vibrações, tempo de saída e residência das partículas são diretamente proporcionais, no caso de uma vibração menor, o escoamento tende a ser mais uniforme e de melhor análise.
- O estudo da curva de escoamento ajuda a entender a funcionalidade do sistema, tornando mais fáceis futuras mudanças a serem feitas nos parâmetros do projeto, como a vazão mássica e a velocidade das partículas.

Agradecimentos

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

Referências Bibliográficas

- Averardi, A. C. Cola, S.E. Zeltmann, N. Gupta, Effect of particle size distribution on the packing of powder beds: a critical discussion relevant to additive manufacturing, *Materials Today Communications* 24 (2020) 100964.
- Chen, H.; Q. Wei, Y. Zhang, F. Chen, Y. Shi, W. Yan, Powder-spreading mechanisms in powder-bed-based additive manufacturing: experiments and computational modeling, *Acta Mater.* 179 (2019) 158–171.
- Chen, H.; Y. Chen, Y. Liu, Q. Wei, Y. Shi, W. Yan, Packing quality of powder layer during counter-rolling-type powder spreading process in additivemanufacturing, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 153 (2020) 103553.
- 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.
- Ghadiri M.; Pasha M.; Nan W.; Hare C.; Vivacqua V.; Zafar U.; Nezamabadi S.; Lopez A.; Pasha M.; Nadimi S.; (2020). Cohesive Powder Flow: Trends and Challenges in Characterisation and Analysis.
- Gu, D. M. Xia, D. Dai, On the role of powder flow behavior in fluid thermodynamics and laser processability of Ni-based composites by selective laser melting, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 137 (2019) 67–78.
- Haeri, S.; Y. Wang, O. Ghita, J. Sun, Discrete element simulation and experimental study of powder spreading process in additive manufacturing, *Powder Technol.* 306 (2017) 45–54.
- Haeri, S. Optimisation of blade type spreaders for powder bed preparation in additive manufacturing using DEM simulations, *Powder Technol.* 321 (2017) 94–104.
- 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).

- Kushan M. C.; Poyraz O.; Uzunonat Y.; Orak S.; (2018). Systematical review on the numerical simulations of laser powder bed additive manufacturing.
- Lee, Y. S.; P. Nandwana, W. Zhang, Dynamic simulation of powder packing structure for powder bed additive manufacturing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 96 (2018) 1507–1520.
- Ma, Y.; T.M. Evans, N. Philips, N. Cunningham, Numerical simulation of the effect of fine fraction on the flowability of powders in additive manufacturing, *Powder Technol.* 360 (2020) 608–621.
- Maiolini A. S. F. R.; Santos, M.O.; (2023). Caracterização experimental de ligas metálicas refratárias para utilização em manufatura aditiva pela técnica de fusão seletiva a laser em leito de pó metálico (PBF-L).
- 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.
- Markl, M. C. Körner, Powder layer deposition algorithm for additive manufacturing simulations, *Powder Technol.* 330 (2018) 125–136.
- Meier, C.; R.Weissbach, J.Weinberg,W.A.Wall, A.J. Hart, Critical influences of particle size and adhesion on the powder layer uniformity in metal additive manufacturing, *J. Mater. Process. Technol.* 266 (2019) 484–501.
- Miranda F.; Condotta R.; Santos M. O.; Rodrigues D.; Janasi S. R.; Ortega F. S.; Batalha G.F.; (2024). Rheological analysis of cemented carbides and cermets powder for additive manufacture via laser powder bed fusion technique. Disponível em: <https://orcid.org/0000-0003-2867-1028>.
- Nan, W.; M. Ghadiri, Numerical simulation of powder flow during spreading in additive manufacturing, *Powder Technol.* 342 (2019) 801–807.
- Nan, W.; M. Pasha, M. Ghadiri, Numerical simulation of particle flow and segregation during roller spreading process in additive manufacturing, *Powder Technol.* 364 (2020) 811–821.
- 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.
- Parteli, E.J.R.; T. Pöschel, Particle-based simulation of powder application in additive manufacturing, *Powder Technol.* 288 (2016) 96–102.
- Sih, S. S.; J.W. Barlow, The prediction of the emissivity and thermal conductivity of powder beds, *Part. Sci. Technol.* 22 (2004) 427–440.
- Tran, H. C.; Y.-L. Lo, M.-H. Huang, Analysis of scattering and absorption characteristics of metal powder layer for selective laser sintering, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22 (2017) 1807–1817.
- Xiang, Z. M. Yin, Z. Deng, X. Mei, G. Yin, Simulation of forming process of powder bed for additive manufacturing, *ASME J. Manuf. Sci. Eng.* 138 (2016), 081002.
- Xu S.; Araghi M. Y.; Su Y.; (2024). Physics-based modeling of metal additive manufacturing processes: a review.
- Zhaowei Xiang, Mingde Zhang, Ran Yan, Qin Yin, Kaifei Zhang. 2021. Powder-spreading dynamics and packing quality improvement for laser powder bed fusion additive manufacturing. *Powder Technology* 389 (2021) 278–291. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.036>.
- Ziegelmeier, S.; P. Christou, F. Wöllecke, C. Tuck, R. Goodridge, R. Hague, E. Krampe, E. Wintermantel, An experimental study into the effects of bulk and flow behaviour of laser sintering polymer powders on resulting part properties, *J. Mater. Process. Technol.* 215 (2015) 239–250.