

CHAPTER VII

BRIEF REVIEW: POWDER METALLURGY

BREVE REVISÃO: METALURGIA DO PÓ

DOI: 10.51859/ampla.sset.2224-7

José Igor Gonçalves da Silva ¹

Ricardo Francisco Alves ²

Fagner Campos dos Santos ³

Meiryellen de Kássia Honorato da Silva ⁴

Rafael Alexandre Raimundo ⁵

Daniel Araujo de Macedo ⁶

Gudson Nicolau de Melo ⁷

¹ Doutorando do curso de Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

² Pós-Doutorando do Departamento de Engenharia e Energias Renováveis – UFRN.

³ Mestrando do curso de Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

⁴ Mestranda do curso de Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

⁵ Pós-Doutorando do Departamento de Física – UFRN.

⁶ Professor do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro de Tecnologia – CT – UFPB.

⁷ Professor do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro de Tecnologia – CT - UFPB.

ABSTRACT

Metallic parts manufacturing employs various techniques, with powder metallurgy (PM) standing out for its effectiveness in producing advanced materials with precise control over chemical composition and microstructure. PM involves the processes of compaction and sintering of metallic powders, offering a versatile method that reduces waste and enhances material density and properties. Recently, PM has been explored for producing high-entropy alloys (HEAs) and composites reinforced with SiC and WC, demonstrating significant potential for industrial applications in the medical, automotive, aerospace, and technological sectors. PM enables the production of parts with high durability, precision, and low cost, but requires careful monitoring of process parameters, such as powder homogenization and sintering conditions, to ensure the quality of physical and mechanical properties. This article reviews the fundamentals and characteristics of PM, its advantages and disadvantages, and analyzes recent advances in the production of HEAs and ceramic composites, highlighting the findings from recent scientific research.

Keywords: Powder Metallurgy. High-Entropy Alloys (HEA). Compaction and Sintering. Reinforced Composites. Mechanical Properties.

RESUMO

A fabricação de peças metálicas emprega diversas técnicas, dentre as quais a metalurgia do pó (MP) se destaca pela sua eficácia na produção de materiais avançados com controle preciso sobre composição química e microestrutura. A MP, caracterizada pelas etapas de compactação e sinterização do pó metálico, é uma técnica versátil que reduz resíduos e melhora o controle sobre a densidade e propriedades do material. Recentemente, o uso da MP tem sido explorado na fabricação de ligas de alta entropia (HEA) e compósitos reforçados com SiC e WC, evidenciando seu potencial para aplicações industriais nos setores médico, automotivo, aeroespacial e tecnológico. A MP oferece a possibilidade de produzir peças com alta durabilidade, precisão e a baixo custo, mas requer um monitoramento cuidadoso dos parâmetros do processo, como a homogeneização do

pó e as condições de sinterização, para assegurar a qualidade das propriedades físicas e mecânicas das peças. Este artigo revisa os fundamentos e características da MP, suas vantagens e desvantagens, e analisa os avanços recentes na produção de HEAs e compósitos cerâmicos,

destacando os resultados encontrados nas investigações científicas atuais.

Palavras-chave: Metalurgia do Pó. Ligas de Alta Entropia (HEA). Compactação e Sinterização. Compósitos Reforçados. Propriedades Mecânicas.

1 INTRODUÇÃO

A fabricação de peças metálicas utiliza diversas técnicas, incluindo usinagem, forjamento, fundição de pressão, estampagem e metalurgia do pó (MP). Esta última é promissora na produção de materiais avançados, oferecendo controle preciso sobre a composição química e microestrutura, sendo viável para fabricar peças complexas a baixo custo e com alta precisão (Akbarpour et al., 2019; Chouhan et al., 2024; Gummadi & Alanka, 2023; Karan et al., 2021; Sadhu et al., 2023; Satishkumar et al., 2020; Saxena et al., 2023).

A MP é versátil e eficaz, destacando-se pela inovação rápida, uso de pós metálicos e não metálicos, ausência de fase líquida, redução de resíduos, controle dos poros, produção em série e precisão na composição do grão. Esses atributos tornam-na objeto de muitos estudos recentes e de grande importância industrial (Chouhan et al., 2024; Dhanashekar et al., 2020; Karan et al., 2021; Que et al., 2024; Satishkumar et al., 2020; Saxena et al., 2023).

A MP envolve duas etapas: compactação e sinterização. Na primeira, o pó é moldado a temperatura ambiente. Na segunda, o material é aquecido abaixo do ponto de fusão, reduzindo a porosidade e aumentando a densidade, resultando em maior resistência mecânica (Karan et al., 2021; Maclin John Vasanth et al., 2020; Saxena et al., 2023; B. Zhang et al., 2024).

O sucesso da MP depende de monitoramento rigoroso dos parâmetros de processo, como homogeneização do pó, pressão de compactação e temperatura de sinterização (Dhanashekar et al., 2020; Sankhla et al., 2022; Saxena et al., 2023). Estudos recentes exploram seu uso na produção de compósitos de matriz metálica e ligas de alta entropia (HEA), especialmente reforçadas com SiC e WC (Akbarpour et al., 2023; Chouhan et al., 2024; Maclin John Vasanth et al., 2020; Sadhu et al., 2023; Satishkumar et al., 2020; Xu et al., 2023; B. Zhang et al., 2024).

HEAs fabricadas por MP são candidatas promissoras para aplicações industriais nos setores médico, automotivo, aeroespacial e tecnológico, devido às

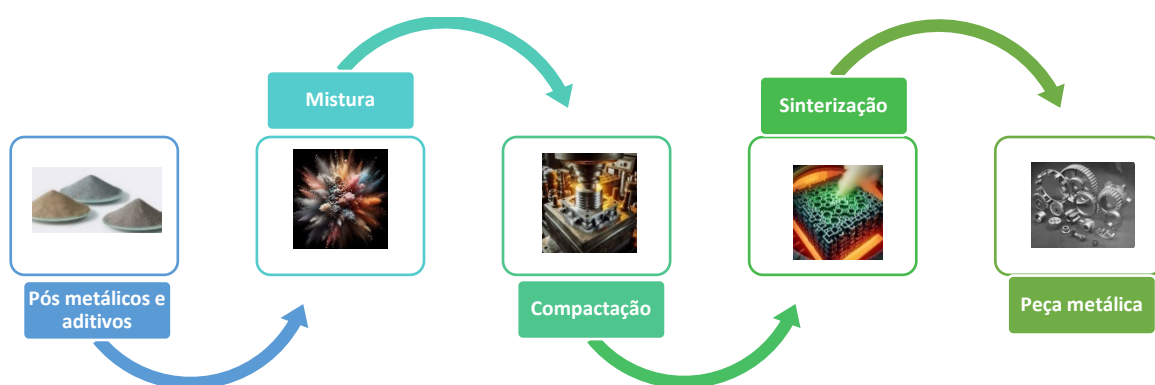
suas propriedades superiores como alta dureza, resistência, leveza e microestrutura simples (Karan et al., 2021; B. Zhang et al., 2024). Este artigo revisará a síntese por MP, suas vantagens e desvantagens, características técnicas e a produção de HEAs reforçados com SiC e WC, além dos principais resultados de pesquisas recentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Metodologia e processamento

A metalurgia do pó é uma técnica de metalurgia que promove a mistura de vários metais na forma de pó com ajuda de um processo de moagem, seguido de prensagem no molde de peça e sinterização do material (Akbarpour et al., 2019; Maclin John Vasanth et al., 2020). Há várias formas de obtenção desse pó e da uniformidade de distribuição do reforço nesse material, todas com o objetivo de se obter um material homogêneo (Gummadi & Alanka, 2023; Saxena et al., 2023). A compactação é muito importante para a obtenção da geometria correta do produto, promover dureza, resistência e interfere na porosidade (Sankhla et al., 2022; Saxena et al., 2023). A sinterização é a fase final do processo e é responsável por reduzir a umidade do material compactado através de um forno com controle de atmosfera, é a etapa de consolidação da microestrutura (Akbarpour et al., 2023; Maclin John Vasanth et al., 2020; Rodriguez-Contreras et al., 2021; Z. Wang et al., 2023; B. Zhang et al., 2024).

Figura 1. Processo de fabricação pela rota da MP.



Fonte: Autor

2.1.1 Preparação do Pó Metálico

A mistura é a fase inicial da técnica de MP e desempenha um papel fundamental, além de influenciar diretamente nas propriedades finais dos materiais

produzidos (Saxena et al., 2023; B. Zhang et al., 2024). As propriedades desejadas, densidade e composição química da peça metálica dependem diretamente de uma manipulação e metodologia adequada para se obter a homogeneização e a composição desejada. Além disso, a utilização de agentes volatilizantes e lubrificantes na preparação do pó influenciarão diretamente no tempo e qualidade da mistura (Gummadi & Alanka, 2023; Que et al., 2024; Saxena et al., 2023). Os métodos de obtenção dos pós, distinguem-se na aplicabilidade e característica, na Tabela 1, descrevemos uma breve abordagem sobre cada método.

Tabela 1. Tipos de preparação de pós-metálicos

PREPARAÇÃO	CARACTERÍSTICA E APLICAÇÃO
Atomização (Maclin John Vasanth et al., 2020)	A pulverização com água, ionização de gás ou liberação de gás difuso gera pequenas gotas que se solidificam, formando pós esféricos ou quase esféricos. Este processo ocorre em atmosferas de argônio, ar ou nitrogênio, resultando em uma distribuição de tamanho de partícula em faixa estreita (Gummadi & Alanka, 2023).
Moagem mecânica	Conhecido como moagem de alta energia, utiliza força mecânica para moer materiais sólidos em pó por impacto, compressão e atrito. Este método reduz o tamanho das partículas e promove a mistura de diversos materiais.
Redução Química (Maclin John Vasanth et al., 2020)	A redução de compostos químicos ou óxidos metálicos forma pós-metálicos, podendo ser realizada em estado sólido ou solução, utilizando óxidos ou halogênios (Gummadi & Alanka, 2023).
Precipitação Química	A precipitação de soluções metálicas para produção de pós ocorre quando íons metálicos se convertem em sólidos insolúveis com aditivos precipitantes. As condições da reação determinam o tamanho e a forma das partículas resultantes.
Moagem a laser	A vaporização de material sólido com um feixe de laser produz um aerossol de partículas finas, sendo uma metodologia viável para materiais difíceis de moer por métodos convencionais.

Fonte: (Gummadi & Alanka, 2023; Maclin John Vasanth et al., 2020)

2.1.1.1 Características dos pós-metálicos

Durante o processo de compactação, vários fatores influenciam no êxito da consolidação da peça. As características dos pós que dever ser acompanhadas com atenção para o sucesso da síntese estão a seguir (Chiaverini, 2001):

- a) Pureza e composição química: Essenciais para a obtenção de material de alta qualidade, determinando as propriedades mecânicas, térmicas e químicas da peça sinterizada.
- b) Microestrutura da partícula: Uma microestrutura uniforme assegura a consistência das propriedades, influenciando a resistência, densidade e

ductilidade da peça. A estrutura cristalina (monocristalina ou policristalina) e o tamanho do grão são cruciais.

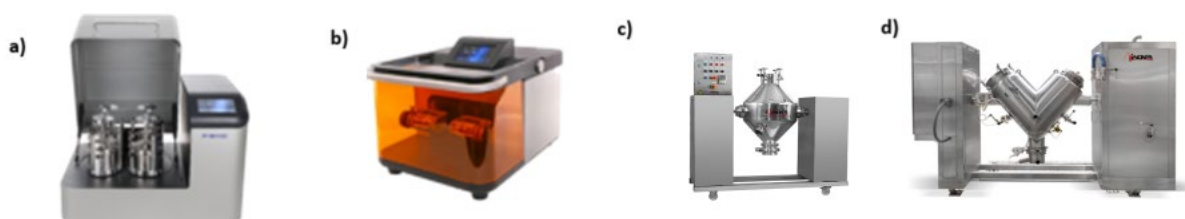
- c) Tamanho da partícula e composição granulométrica: Interferem na compactação uniforme e sinterização. Pós mais finos promovem maior densificação, enquanto partículas alongadas podem aumentar a porosidade.
- d) Porosidade: Alta porosidade reduz a resistência e densidade do material, comprometendo as propriedades mecânicas.
- e) Densidade Aparente: A massa do pó dividida pelo volume da amostra. Densidades maiores tendem a ter mais compatibilidade e resistência
- f) Velocidade de Escoamento: Interfere na compactação devido à segregação de partículas. Fatores como atrito, formato, tamanho das partículas e condições ambientais afetam essa velocidade.
- g) Superfície Específica: Áreas de superfície maiores facilitam a difusão de átomos durante a sinterização, crucial para uma microestrutura homogênea e propriedades consistentes.
- h) Compressibilidade: A capacidade de compactação do pó melhora seu transporte e manuseio, evitando a formação de pontos frágeis antes da sinterização.
- i) Resistência Verde: Refere-se à resistência da peça após compactação e antes da sinterização, garantindo que o material mantenha o formato do molde durante o processo.

2.1.1.2 Mistura dos Pós

A mistura de pós pode ocorrer de diversas formas, dentre elas destacamos a mistura mecânica (mistura por agitação), mistura por pulverização, mistura por fluidização (para mistura de pós finos e delicados), mistura por tambor rotativo (para pós de alta viscosidade e uniformidade do material final), mistura por vórtices (mistura de alta velocidade) (Gummadi & Alanka, 2023; Saxena et al., 2023).

Na Figura 2, podemos ver alguns equipamentos que são usados para misturar esses pós a depender do material da matriz e do material reforço que será disperso sobre ele. Sendo o moinho de bolas um dos mais utilizados por ser de fácil utilização e boa eficiência (Gummadi & Alanka, 2023).

Figura 2 - Equipamentos úteis para mistura de pós-metálicos: a) Moinho de bolas planetário (MB40 – Essencis Technologies), b) Moinho de bolas de bancada (GT300 - Essencis Technologies), c) Moinho de Bicônico (MBC misturador de cone duplo - Ixoxpa) e d) Misturado tipo V (Inoxpa).



Fonte: (FCT Systeme GmbH, 2024)

A etapa da mistura é essencial para garantir a homogeneidade da composição química e a uniformidade do material final e essa qualidade é influenciada por uma série de fatores, incluindo o formato e tamanho das partículas, duração da mistura, tipo de misturador, presença de aglutinante e atmosfera de processo (Maclin John Vasanth et al., 2020; Sankhla et al., 2022; Satishkumar et al., 2020; B. Zhang et al., 2024). Além disso, dependendo das condições de operação e elementos do equipamento, como a forma do agitador, velocidade, atmosfera e temperatura da mistura, podem ocorrer alterações no tamanho e forma das partículas, incluindo quebra e formação de partículas compostas (Gummadi & Alanka, 2023). Esses aspectos devem ser cuidadosamente considerados para garantir uma mistura homogênea e uniforme dos pós, fundamental para o sucesso dos processos subsequentes na metalurgia do pó.

A moagem de bolas, Figura 2 a) e b), é amplamente reconhecida como um método altamente eficaz para o processamento de pós na metalurgia do pó, como evidenciado por publicações recentes (Gummadi & Alanka, 2023; Karan et al., 2021; Sadhu et al., 2023; Sankhla et al., 2022; Satishkumar et al., 2020). Sua popularidade se deve à sua operacionalidade simplificada e aos resultados consistentemente positivos que proporciona.

O processamento uniforme de partículas de pós, sem agregação, é essencial para garantir mínima porosidade e máxima densidade após a sinterização. Para evitar a aglomeração molecular, recomenda-se misturar por longos períodos a baixa rotação (150-300 rpm) e utilizar uma relação esfera/pó de cerca de 10:1, dependendo da composição do pó (Akbarpour et al., 2019; Chouhan et al., 2024; Dhanashekar et al., 2020; Gummadi & Alanka, 2023; Maclin John Vasanth et al., 2020; Que et al., 2024).

Aditivos ligantes também ajudam na moagem, minimizando a segregação e promovendo uma mistura homogênea (Rodriguez-Contreras et al., 2021).

Alguns trabalhos utilizam a moagem de bolas em rotações elevadas por tempos menores, mas isso pode ter consequências negativas, como o rompimento das arestas vivas das partículas e a formação de partículas compostas indesejadas (Que et al., 2024; Sankhla et al., 2022). O moinho de bolas também melhora as peças metálicas ao permitir a adição de reforços na forma de pós cerâmicos, como SiC, TiC e WC, promovendo a dispersão uniforme na matriz metálica (Akbarpour et al., 2019, 2023; Huang et al., 2024; Sadhu et al., 2023; Satishkumar et al., 2020; Xu et al., 2023).

2.1.1.3 Reforço cerâmico em HEAs

Os parâmetros de moagem necessário para formar o compósito como materiais cerâmicos como SiC e WC são muito variado e dependente da composição da matriz metálica, facilmente encontrado na literatura principalmente para compósito de liga de alumínio (Sadhu et al., 2023).

Os compósitos de HEAs com reforço cerâmico, facilitados por técnicas como a moagem de bolas planetária, apresentam características proeminentes que incentivam seu estudo e utilização industrial (Karan et al., 2021; Velo et al., 2018; Y. Wang et al., 2024; B. Zhang et al., 2024). As HEAs são soluções sólidas monofásicas compostas por cinco ou mais elementos principais em proporções quase equimolares e percentual atômico entre 5 e 35% (Y. Wang et al., 2024; P. Zhang et al., 2022). Suas excelentes propriedades funcionais e a possibilidade de substituir ligas metálicas mais onerosas e pesadas tornam as HEAs candidatas ideais para a indústria automotiva e aeroespacial (Huang et al., 2024; Karan et al., 2021; Y. Wang et al., 2024; Zhou et al., 2018).

Os reforços das matrizes metálicas podem ser de natureza orgânica, como Redmud e Flyash, ou inorgânica, como óxidos, nitratos, carbetos e outros, sendo adicionados aos pós do compósito em proporções menores, conforme suas características específicas (Saxena et al., 2023). Devido a propriedades como alta dureza, alta temperatura de fusão e resistência mecânica, a adição de materiais de reforço cerâmicos como SiC, WC e TiC às HEAs é frequentemente estudada para atender as demandas da engenharia moderna (Y. Wang et al., 2024). A metalurgia do pó (MP) confere uma boa dispersão dos reforços na matriz metálica, podendo utilizar

lubrificantes secos para diminuição de atrito (Maclin John Vasanth et al., 2020; Xu et al., 2023).

Tabela 2 - Reforço à HEA pela rota da metalurgia do pó e seus principais resultados

MATRIZ	REFORÇO	PROPRIEDADE	RESULTADOS	REFERÊNCIA
HEA – CoCrFeNiMn	SiC	Possui alta resistência e dureza. Também é resistente ao ácido, álcalis e sais fundidos até 800°C	Melhora na resistência ao escoamento, a compressão e reduziu a plasticidade.	(Saxena et al., 2023; P. Zhang et al., 2022)
HEA - AlCoCrFeNiTi	WC	Alta resistência e dureza, resistência ao escoamento e desgaste superficial.	Maior densidade relativa e melhores propriedade mecânica	(Y. Wang et al., 2024)
HEA – CoCrFeNiMn	WC		Apresentou aumento da microdureza.	(Velo et al., 2018)
HEA – FeCoCrNi	WC		Apresentou aumento da microdureza.	(P. Zhang et al., 2022)
HEA – CoCrFeNi	WC		Aumento da dureza de 336,4 HV para 632,5 HV, além de melhora na resistência à corrosão.	(Xu et al., 2023)
HEA - AlCoCrFeNi	WC		Aumento da resistência ao desgaste e dureza, conseqüentemente ocorreu a redução da ductibilidade. Além disso, o efeito de galvanização foi potencializado	(Xu et al., 2023)
HEA - CoCrFeNiMn	TiC	Resistente ao desgaste.	Apresentou melhora da resistência	(P. Zhang et al., 2022)
HEA - AlCoCrFeNi	TiC		A microdureza do revestimento aumentou, assim como a resistência ao desgaste e a corrosão	(Huang et al., 2024; Saxena et al., 2023)

A aplicação de lubrificante reduz o atrito entre o pó compactado e a parede interna do molde de compactação, sendo indispensável. Compreender seus efeitos na mistura é essencial, pois um uso inadequado pode impactar negativamente a velocidade de escoamento e os resultados da sinterização (Chiaverini, 2001). Estearatos metálicos e polímeros são comumente utilizados para melhorar a fluidez dos pós e reduzir o desgaste das matrizes.

2.1.2 Compactação

Após a preparação do pó metálico, este é transferido para um molde resistente e devidamente lubrificado, onde um equipamento aplica tensão para consolidar o formato da peça e produzir o que é conhecido como compactado verde (CV) (Chouhan et al., 2024; Gummadi & Alanka, 2023; Maclin John Vasanth et al., 2020; Saxena et al., 2023).

A compactação pode ser realizada a quente ou a frio. A compactação a quente envolve prensagem a altas temperaturas, sendo utilizada para fabricar materiais funcionais multicamadas e melhorar a resistência ao impacto, tenacidade e microdureza (Chouhan et al., 2024). A compactação a frio, realizada à temperatura ambiente, elimina menos poros mas é mais favorável ao meio ambiente por não requerer aquecimento (Sadhu et al., 2023).

A temperatura e a umidade do ambiente de compactação requerem atenção. Temperaturas muito altas podem levar à aglomeração dos pós, enquanto temperaturas muito baixas podem reduzir a plasticidade dos materiais ou levá-los à região vítrea. A umidade pode causar oxidação e comprometer a qualidade da peça metálica (Chiaverini, 2001).

O sucesso dessa etapa da metalurgia do pó (MP) depende de fatores como a granulometria dos pós, a geometria e condição das matrizes, a aplicação de pressão e a lubrificação do sistema (Sankhla et al., 2022). A distribuição uniforme dos pós na matriz é essencial para garantir densidade homogênea e dureza na peça final. Além disso, a pressão aplicada deve ser cuidadosamente controlada para evitar a quebra das partículas, a espessura do CV ou a formação de porosidade indesejada (Gummadi & Alanka, 2023; Sankhla et al., 2022).

Aumentar a tensão de compactação reduz poros, deforma o pó, leva a ligações mecânicas das partículas, aumenta a região de contato entre as moléculas e viabiliza a soldagem (Akbarpour et al., 2023; Gummadi & Alanka, 2023). Esse aumento pode sofrer influência do tamanho, formato e resistência das partículas da matriz e do reforço (Sankhla et al., 2022). Na compactação a quente, aumentar a temperatura pode melhorar a tenacidade e microdureza, contribuindo para uma melhor ligação entre o reforço e a matriz (Chouhan et al., 2024).

A densificação é alcançada de forma mais eficiente quando a compactação e a sinterização ocorrem simultaneamente, conhecida como sinterização assistida, pois

a difusão do grão durante a sinterização é realizada sob condições de pressão (Sadhu et al., 2023). Na Tabela 3, apresentamos diversos métodos de compactação utilizados para moldar os pós em peças sólidas. Alguns dos principais tipos de compactação incluem:

Tabela 3. Metodologias de compactação do pó (Chiaverini, 2001; Saxena et al., 2023)

COMPACTAÇÃO	DESCRIÇÃO
Compactação Uniaxial	O pó no molde recebe uma pressão unidirecional ao longo de um eixo específico. Isso resulta na formação de peças com formato simples, como cilindros ou prismas.
Compactação Isostática a Quente (HIP)	É aplicado pressão isostática, ou seja, uniforme em todas as direções, sobre os pós em um recipiente selado e em temperatura que varia de 480 a 1700°C. Permitindo a produção de peças mais complexas e de densidade mais uniforme.
Compactação Isostática a Frio (CIP)	Segue o procedimento do HIP, mas a temperatura ambiente. Isso resulta em uma densificação menos uniforme, mas ainda permite a produção de peças com formas complexas, com boa resistência a um consumo menor de energia.
Compactação por Extrusão	Os pós são colocados em um cilindro que contém um êmbolo. A aplicação de pressão sobre os pós faz com que eles sejam forçados através de uma matriz com um formato específico, resultando na formação de peças com seção transversal constante e comprimento variável.
Compactação por Injeção de Pó (MIM)	É a combinação da metalurgia do pó com a tecnologia de moldagem por injeção de plástico. Os pós são misturados com um aglutinante termoplástico e injetados em um molde, depois são compactados e sinterizados para formar peças com alta precisão dimensional e complexidade geométrica.

A escolha da metodologia de compactação depende das propriedades dos materiais, da precisão dimensional requerida, das condições de processamento disponíveis e da geometria da peça. As prensas podem variar sua sobrecarga dependendo da profundidade e complexidade da peça para fornecer ao CV uniformidade de densidade, classificando-se como de ação simples, dupla, com sistema de retirada, de movimento duplo ou rotativas (Chiaverini, 2001; Gummadi & Alanka, 2023).

2.1.3 Sinterização

A fase final da metalurgia do pó (MP) compreende o aquecimento do compactado verde (CV) em condições de tempo e atmosfera controladas (argônio, nitrogênio ou vácuo), a uma alta temperatura, mas abaixo do ponto de fusão dos principais elementos químicos (Gummadi & Alanka, 2023; Maclin John Vasanth et al.,

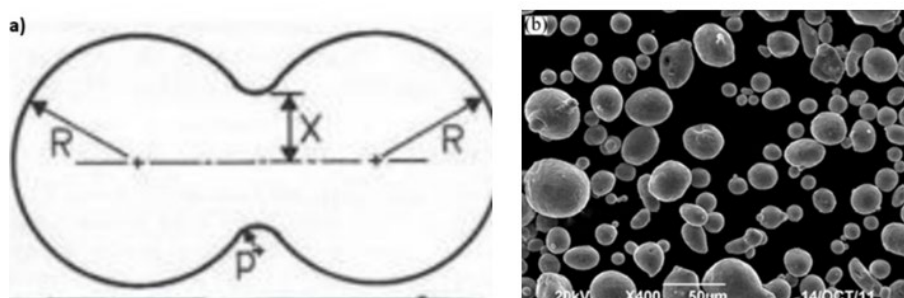
2020; Y. Wang et al., 2024). Este aquecimento resulta na formação de ligações entre as partículas e na consolidação do material compactado em uma estrutura sólida.

Durante a sinterização, ocorre um aumento no contato entre as partículas do CV, mudando a geometria interna e nas dimensões do material. Essa contração inicial contribui para o aumento da densidade do material sinterizado e é influenciada pelo tamanho das partículas (Gummadi & Alanka, 2023). Além disso, os poros modificam seu formato de poliédrico para esférico, impactando significativamente a microestrutura do material (Rodriguez-Contreras et al., 2021).

A atmosfera durante a sinterização é um fator crucial, pois pode influenciar significativamente o processo. Atmosferas controladas, geralmente compostas por gases inertes ou redutores, são utilizadas para evitar a oxidação dos materiais metálicos e promover uma densificação mais eficiente (Gummadi & Alanka, 2023). Além disso, é essencial controlar a taxa de aquecimento e resfriamento para evitar a formação de trincas e distorções nas peças sinterizadas (Chiaverini, 2001).

Os defeitos cristalinos no material facilitam o transporte de material através do processo de difusão, aumentando o contato entre as partículas e iniciando a formação de ligações entre elas (Chiaverini, 2001; Zhou et al., 2018). Como consequência, ocorre o empescoçamento entre as partículas adjacentes, consolidando a estrutura do material.

Figura 3 - a) Relação do contato entre partícula e a b) MEV, partícula do pó de alumínio



Fonte: a) (Y. Wang et al., 2024; Z. Wang et al., 2023), b) (X. X. Wang et al., 2015)

Durante a sinterização, forma-se o contorno de grão no pescoço das partículas, gerando uma diferença de curvatura que concentra lacunas entre a curvatura e a superfície plana, favorecendo o fluxo de difusão (Chiaverini, 2001). À medida que os átomos se difundem do contorno de grão para o pescoço, as lacunas seguem no sentido oposto, aproximando o centro das partículas e promovendo a contração

(Chiaverini, 2001). Esse processo reduz os poros e aumenta a densidade do material final (Maclin John Vasanth et al., 2020).

Ao concluir a sinterização, as peças adquirem suas propriedades finais, como densidade, resistência mecânica e condutividade elétrica. A qualidade desse processo é fundamental para garantir a obtenção de peças com as propriedades desejadas e a conformidade com os requisitos de projeto (Gummadi & Alanka, 2023; Maclin John Vasanth et al., 2020; Z. Wang et al., 2023).

A sinterização pode ser classificada em estado sólido, estado líquido, síncrono ou por reação (Gummadi & Alanka, 2023; Velo et al., 2018; P. Zhang et al., 2022). Destaque para a Sinterização por Plasma Spark (SPS) e a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) (Chouhan et al., 2024; Sankhla et al., 2022; Z. Wang et al., 2023). A SPS proporciona à peça metálica uma microestrutura ultrafina, alta dureza e maior densidade relativa, facilitando a rápida ligação interfacial e crescimento por altas taxas de aquecimento (Y. Wang et al., 2024; Xu et al., 2023).

Figura 4 - SPS – Fast



Fonte: (FCT Systeme GmbH, 2024)

2.2 Propriedades e Aplicação

A metalurgia do pó é uma técnica muito versátil uma grande variedade de propriedades e aplicações, devido a isso a grande quantidade de pesquisas recentes (Dhanashekar et al., 2020; Karan et al., 2021; Maclin John Vasanth et al., 2020; Rodriguez-Contreras et al., 2021; Sadhu et al., 2023; Sankhla et al., 2022; Satishkumar et al., 2020; Saxena et al., 2023; Velo et al., 2018; Y. Wang et al., 2024; Z. Wang et al., 2023). A amplitude de materiais com composição química complexas e propriedades específicas (ligas, cerâmico e materiais porosos), o controle de tamanho e morfologia, a densificação das peças e propriedades que podem ser

customizadas são fatos que ressaltam o quanto essa técnica é promissora (Chiaverini, 2001). Essa técnica pode ser usada para diversas aplicações como Componentes Automotivos, Eletrônicos e Dispositivos de Energia, Indústria Biomédica, Ferramentas e Equipamentos Industriais e Aplicações Aeroespaciais e de Defesa (Akbarpour et al., 2019; Chouhan et al., 2024; Dhanashekar et al., 2020; Gummadi & Alanka, 2023; Karan et al., 2021; Maclin John Vasanth et al., 2020; Sankhla et al., 2022; Saxena et al., 2023; X. X. Wang et al., 2015; Y. Wang et al., 2024; Z. Wang et al., 2023; P. Zhang et al., 2022). Algumas dessas propriedades e aplicações são norteadas pela:

2.2.1 Caracterização da microestrutura

No estudo da caracterização da peça sintetizada por MP é conveniente realizar a análise do material, visando a busca por informações da composição química e da estrutura cristalina, através da Difração de Raio-X (DRX) (Karan et al., 2021; Sankhla et al., 2022; Saxena et al., 2023). É a confirmação que se obteve a composição da síntese desejada. Além disso, a microestrutura dos materiais pode ser caracterizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com lentes que pode ampliar a imagem em 100.000 vezes e microscopia óptica que amplia 1000 vezes, permitindo uma análise detalhada da distribuição de fases, tamanho de grão e porosidade (Gummadi & Alanka, 2023; Sankhla et al., 2022).

Nos estudos das propriedades mecânicas e microestrutural dos CMM e das HEAs, a combinação dos formatos e tamanho das partículas resultaram na melhoria de dispersão das moléculas dos pós-metálicos (Gummadi & Alanka, 2023). Moléculas em micro e nanoescala produz uma microestrutura mais arrojada e quando dotadas de distribuição variadas na distribuição no pó resultam em melhor compactação e melhores resultados após compactação e sinterização (Gummadi & Alanka, 2023).

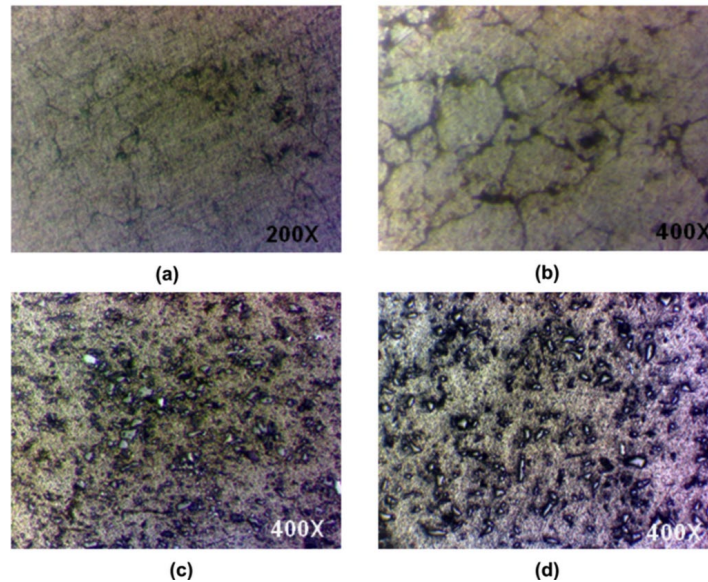
2.2.2 Morfologia

O estudo da morfologia é realizado através da análise das formas tamanho e distribuição das partículas das partículas e das peças metálicas. Sendo muito importante para o entendimento e justificativa das propriedades mecânicas, térmicas e elétricas do material.

As partículas de reforço, como o SiC, são dispersas por toda matriz metálica agindo como núcleo sólido e reforçando a microestrutura, melhorando as propriedades mecânicas como pode ser visto na Figura 5. O mesmo acontece com o

WC e o TiC, alterando a ductibilidade e resistência da matriz metálica (Gummadi & Alanka, 2023; Huang et al., 2024; Zhou et al., 2018).

Figura 5 - (a) e (b) Al-CMM sem reforço, (c) com 15% de SiC e (d) 20% de SiC



Fonte: (Sankhla et al., 2022)

2.2.3 Comportamento de desgaste

Esta análise é conduzida com o propósito de avaliar a resistência ao desgaste dos materiais fabricados por meio da metalurgia do pó, permitindo a determinação da capacidade desses materiais de resistir aos processos tribológicos de desgaste (Maclin John Vasanth et al., 2020). A dispersão de forma homogênea de reforços na matriz também proporciona a melhora dessa propriedade, assim como o tipo de matriz e a interface matriz-reforço (Akbarpour et al., 2019). Essa avaliação é essencial para a otimização do design e dos materiais das peças para atender a aplicações específicas.

2.2.4 Microdureza/dureza

A investigação da dureza e microdureza é essencial para compreender a capacidade de um material de resistir à deformação plástica e à penetração superficial. Estas análises fornecem insights fundamentais para o desenvolvimento de materiais, servindo como base sólida para justificar sua aplicabilidade e relevância. A quantificação e classificação dessas propriedades são conduzidas por meio dos testes Vickers ou Knoop, possibilitando uma avaliação precisa e detalhada das

características mecânicas do material sintetizado pela rota da MP (Velo et al., 2018; Y. Wang et al., 2024).

A agregação e o crescimento da segunda fase dispersa, partícula do pó da matriz mais finas e a presença de material de reforço na matriz são componentes que podem elevar a dureza e microdureza da peça metálica (Maclin John Vasanth et al., 2020; X. X. Wang et al., 2015; Y. Wang et al., 2024).

A dispersão de partículas duras durante a moagem do pó, resulta em um composto que resultará em uma peça de maior dureza, pois passa a resistir a parte dos esforços sofridos pela peça sinterizada com mais eficiência (Sankhla et al., 2022).

2.2.5 Resistência a corrosão

A resistência à corrosão dos materiais produzidos por metalurgia do pó é avaliada por testes de imersão em diferentes meios corrosivos, como soluções ácidas ou alcalinas. Esses testes permitem determinar a estabilidade química dos materiais e sua capacidade de resistir à deterioração causada pela corrosão, garantindo sua durabilidade em ambientes propícios a oxidação.

A análise minuciosa desses fatores complementa a compreensão das propriedades e aplicações dos materiais produzidos por metalurgia do pó, possibilitando o desenvolvimento de materiais mais avançados e adaptados às necessidades específicas de cada setor industrial.

A liga de titânio é altamente resistente a corrosão (Rodriguez-Contreras et al., 2021). HEAs também apresentam resistência satisfatória ao desgaste por oxidação (B. Zhang et al., 2024). Assim, um material que apresenta excelentes propriedades mecânicas e boa resistência a corrosão são HEAs com dispersão do reforço de TiC sintetizado pela rota da MP (Huang et al., 2024).

2.3 Desafios e Perspectivas Futuras

Motivada pelo avanço tecnológico ou pela demanda de materiais mais eficientes e sustentáveis, a metalurgia do pó está diretamente relacionada com desafios futuros como: o desenvolvimento de novos materiais com propriedades superiores, maior resistência, durabilidade, condutividade elétrica e térmica; a melhoria dos processos de fabricação; a sustentabilidade e redução de impactos ambientais, especialmente no que diz respeito ao uso da matéria-prima; a integração

com tecnologias emergentes e aplicações avançadas em diversos setores da indústria.

Esses desafios e perspectivas para o futuro da metalurgia do pó estão estreitamente ligados à inovação, sustentabilidade e adaptação às demandas do mercado. Para isso se concretizar é de grande importância o investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento, em educação, na colaboração entre indústria e academia, e o aproveitamento de tecnologias emergentes. A metalurgia do pó tem o potencial de continuar desempenhando um papel significativo na fabricação de materiais avançados e na solução de desafios tecnológicos globais.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metalurgia do pó (MP) é uma metodologia robusta e versátil para a produção de materiais avançados com propriedades controladas. Técnicas como moagem mecânica, compactação e sinterização permitem obter produtos com microestruturas homogêneas e propriedades mecânicas, térmicas e elétricas superiores. A atenção aos parâmetros de processo, como taxa e tempo de aquecimento, tempo de resfriamento, temperatura de sinterização, pressão de compactação, aglomerantes e aditivos, é crucial para garantir a qualidade das propriedades físicas e mecânicas das peças resultantes, influenciando significativamente o sucesso do processo (Dhanashekar et al., 2020; Saxena et al., 2023).

A mistura e homogeneização adequadas dos pós-metálicos são fundamentais para assegurar a uniformidade da distribuição e a qualidade do material final. A compactação deve ser cuidadosamente planejada para evitar a formação de poros e garantir a uniformidade de densidade. Uma compactação correta viabiliza uma sinterização de sucesso e reduz o risco de fratura durante o manuseio da peça (Karan et al., 2021; Maclin John Vasanth et al., 2020).

A sinterização em atmosfera controlada e na temperatura adequada, geralmente cerca de 75% da temperatura de fusão, pelo tempo correto, promove o contato entre as partículas e a diminuição dos poros. Esse processo de difusão atômica consolida o material, formando uma estrutura sólida e coesa, resultando em maior resistência e densidade (B. Zhang et al., 2024).

A produção de peças complexas com alta precisão e baixo custo é facilitada pelas etapas de compactação e sinterização. O reforço na forma de pó, misturado pela técnica de moagem, melhora significativamente a resistência, dureza, resistência

ao escoamento e propriedades tribológicas das peças metálicas (Sadhu et al., 2023; Satishkumar et al., 2020).

A MP é uma metodologia metalúrgica vantajosa para o avanço tecnológico e industrial, permitindo a síntese de novos materiais com alta precisão e versatilidade. As ligas de alta entropia (HEAs) reforçadas com materiais cerâmicos pela rota da MP têm sido obtidas com sucesso, apresentando morfologias capazes de suportar uma variedade de esforços, resistir ao desgaste e à corrosão, além de baixa porosidade, alta densidade e uniformidade estrutural (Akbarpour et al., 2023; Chouhan et al., 2024).

A rota da MP para sintetizar ligas de alta e média entropia, reforçadas com carbetos ou outros tipos de reforço, é um campo promissor de pesquisa, ainda amplamente inexplorado, com grande potencial para futuras inovações (Xu et al., 2023).

A contínua pesquisa e inovação na metalurgia do pó são essenciais para explorar seu potencial máximo e atender às demandas crescentes por materiais avançados em diversas aplicações industriais. A colaboração entre cientistas, engenheiros e indústrias é fundamental para impulsionar o desenvolvimento contínuo nesse campo.

REFERÊNCIAS

- Akbarpour, M. R., Gazani, F., Mousa Mirabad, H., Khezri, I., Moeini, A., Sohrabi, N., & Kim, H. S. (2023). Recent advances in processing, and mechanical, thermal and electrical properties of Cu-SiC metal matrix composites prepared by powder metallurgy. *Progress in Materials Science*, 140(April). <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101191>
- Akbarpour, M. R., Najafi, M., Alipour, S., & Kim, H. S. (2019). Hardness, wear and friction characteristics of nanostructured Cu-SiC nanocomposites fabricated by powder metallurgy route. *Materials Today Communications*, 18(October 2018), 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.11.001>
- Chiaverini, V. (2001). *Metalurgia do Pó* (A.-A. B. De Metalurgia (Ed.); 4th ed.). Abm - Assoc. Bras. De Metalurgia.
- Chouhan, M., Thakur, L., & Kumar, P. (2024). Parametric optimization and impact behaviour of AA7075/SiC FGM fabricated by hot compaction powder metallurgy process. *Materials Today Communications*, 38(December 2023), 107833. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107833>
- Dhanashekar, M., Loganathan, P., Ayyanar, P., Mohan, S. R., & Sathish, T. (2020). Mechanical and wear behaviour of AA6061/SiC composites fabricated by

powder metallurgy method. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1008–1012. <https://doi.org/https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221478531933559X>

FCT Systeme GmbH. (2024). https://www.fct-systeme.de/en/content/Spark_Plasma_Sinteranlage_Typ_HP_D_HHPD/~nm.12~nc.32/Spark-Plasma-Sinteranlage-Typ-HP-D--HHP-D.html

Gummadi, J., & Alanka, S. (2023). A review on titanium and titanium alloys with other metals for biomedical applications prepared by powder metallurgy techniques. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.387>

Huang, J., Luo, F., Zhao, Y., & Shi, W. (2024). Preparation of AlCoCrFeNi/W-TiC HEA composite coating by laser cladding. *Materials Today Communications*, 39(February), 108677. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108677>

Karan, Pachauri, P., Kumar, A., & Maurya, M. (2021). Effect of powder metallurgy on high entropy alloy materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4026–4033. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.529>

Maclin John Vasanth, K., Lokendar Ram, P. S., Pon Anand, V., Prabu, M., & Rahul, S. (2020). Experimental investigation of mechanical and tribological properties of Aluminium metal matrix composites fabricated by powder metallurgy route - A review. *Materials Today: Proceedings*, 33, 1058–1072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.057>

Que, L., Han, R., Dai, M., Su, J., Guo, Y., Xu, X., Jian, X., & Zhou, Z. (2024). Powder-Metallurgical Construction of Graphene-like Nanosheet Network Reinforced Cu Composite towards Balanced High-performance. *Carbon*, 119121. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119121>

Rodriguez-Contreras, A., Punset, M., Calero, J. A., Gil, F. J., Ruperez, E., & Manero, J. M. (2021). Powder metallurgy with space holder for porous titanium implants: A review. *Journal of Materials Science and Technology*, 76, 129–149. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.005>

Sadhu, K. K., Mandal, N., & Sahoo, R. R. (2023). SiC/graphene reinforced aluminum metal matrix composites prepared by powder metallurgy: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 91(November 2022), 10–43. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.026>

Sankhla, A. M., Patel, K. M., Makhesana, M. A., Giasin, K., Pimenov, D. Y., Wojciechowski, S., & Khanna, N. (2022). Effect of mixing method and particle size on hardness and compressive strength of aluminium based metal matrix composite prepared through powder metallurgy route. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.094>

Satishkumar, P., Mahesh, G., Meenakshi, R., & Vijayan, S. N. (2020). Tribological characteristics of powder metallurgy processed Cu-WC/SiC metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 459–465. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.449>

- Saxena, A., Saxena, K. K., Jain, V. K., Rajput, S. K., & Pathak, B. N. (2023). A review of reinforcements and process parameters for powder metallurgy-processed metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.227>
- Velo, I. L., Gotor, F. J., Alcalá, M. D., Real, C., & Córdoba, J. M. (2018). Fabrication and characterization of WC-HEA cemented carbide based on the CoCrFeNiMn high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 746, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.292>
- Wang, X. X., He, M., Zhu, Z., Xue, K. M., & Li, P. (2015). Influence of twist extrusion process on consolidation of pure aluminum powder in tubes by equal channel angular pressing and torsion. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 25(7), 2122–2129. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63823-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63823-7)
- Wang, Y., Wang, R., Lv, F., Wang, L., & Chen, Z. (2024). Effects of milling time and sintering temperature on the mechanical properties of 8 wt% WC/AlCoCrFeNiTi0.5 high entropy alloy matrix composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 976(August 2023), 173203. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173203>
- Wang, Z., Tan, Y., & Li, N. (2023). Powder metallurgy of titanium alloys: A brief review. *Journal of Alloys and Compounds*, 965(April), 171030. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171030>
- Xu, Z., Li, Q. Y., Li, W., & Li, D. Y. (2023). Microstructure, mechanical properties, and wear behavior of AlCoCrFeNi high-entropy alloy and AlCrFeNi medium-entropy alloy with WC addition. *Wear*, 522(December 2022). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204701>
- Zhang, B., Huang, Y., Dou, Z., Wang, J., & Huang, Z. (2024). Refractory high-entropy alloys fabricated by powder metallurgy: Progress, challenges and opportunities. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 9(2), 100688. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2024.100688>
- Zhang, P., Chen, J., & Cheng, Q. (2022). Microstructure and sliding wear behavior of (AlCoCrFeNi)_{1-x}(WC)_x. *Ceramics International*, 48(13), 19399–19411. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.238>
- Zhou, R., Chen, G., Liu, B., Wang, J., Han, L., & Liu, Y. (2018). Microstructures and wear behaviour of (FeCoCrNi)_{1-x}(WC)_x high entropy alloy composites. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 75(November 2017), 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.03.019>