

FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE LIGAS DE NÍQUEL POR METALURGIA DO PÓ

Pedro Henrique Moura Cunha Barros¹, Manoel Quirino da Silva Júnior²

RESUMO

As ligas de níquel são bastante empregadas devido à sua resistência e durabilidade, e a metalurgia do pó se destaca como uma alternativa sustentável e eficiente para sua fabricação. Este estudo investigou a produção e caracterização das ligas Monel 400, Inconel 600, Hastelloy B2 e Nimonic 80A, analisando microestrutura, densidade e viabilidade do processo, levando em consideração os fatores como temperatura e carga de pressão. Os resultados indicaram densidades experimentais até 50% inferiores aos valores teóricos, devido à porosidade e heterogeneidade microestrutural. O crescimento de grãos e a segregação de fases foram mais pronunciados em temperaturas elevadas (1000°C), afetando as propriedades mecânicas. A liga Monel 400 apresentou maior variação de densidade, sugerindo influência de defeitos microestruturais, enquanto o Inconel 600 exibiu elevada porosidade e formação de precipitados. Hastelloy B2 e Nimonic 80A seguiram tendências semelhantes, destacando a necessidade de otimização de parâmetros como compactação e tempo de sinterização para melhorar a consolidação das ligas. Embora a metalurgia do pó ofereça vantagens na economia de material e flexibilidade na fabricação, ajustes nos parâmetros de compactação, duração da sinterização e controle da atmosfera são essenciais para reduzir defeitos e aproximar as propriedades do material aos padrões industriais.

Palavras-chave: Metalurgia do Pó. Níquel. Sinterização. Microestrutura.

ABSTRACT

Nickel alloys are valued for their strength and durability, with powder metallurgy offering a sustainable and efficient production method. This study examined the production and characterization of Monel 400, Inconel 600, Hastelloy B2, and Nimonic 80A alloys, focusing on microstructure, density, and process feasibility under varying temperature and pressure. Results showed experimental densities up to 50% lower than theoretical values, due to porosity and microstructural heterogeneity. Grain growth and phase segregation were more pronounced at 1000°C, impacting mechanical properties. Monel 400 showed higher density variation, suggesting microstructural defects, while Inconel 600 had notable porosity and precipitates. Hastelloy B2 and Nimonic 80A followed similar trends, indicating the need for optimization in compaction and sintering to improve consolidation. While powder metallurgy offers material savings and flexibility, optimizing compaction, sintering time, and atmosphere control is crucial to reduce defects and meet industrial standards.

Key words: Powder Metallurgy. Nickel. Sintering. Microstructure.

1. INTRODUÇÃO

As ligas de níquel são amplamente utilizadas na indústria devido à sua resistência mecânica, alta durabilidade e capacidade de suportar altas temperaturas sem se deteriorar. Essas características fazem com que sejam empregadas em setores como aeroespacial, automotivo e petroquímico. Ainda, sua resistência à corrosão e à oxidação garante maior vida útil aos componentes fabricados com esse material [19].

A metalurgia do pó surge como uma alternativa eficiente para a fabricação dessas ligas, pois permite a produção de peças com pouco desperdício. O processo consiste em misturar pós metálicos, compactá-los em um molde e submetê-los à sinterização, um tratamento térmico que fortalece o material. Assim, possibilita a criação de peças complexas e mantém alta eficiência no aproveitamento do material, diferentemente dos processos convencionais, reduzindo gastos indispensáveis na fabricação de uma peça e aproveitando melhor a matéria-prima [6]. Desse modo, a crescente busca por processos mais econômicos e sustentáveis, põe destaque na fabricação de ligas de níquel com o uso da metalurgia do pó, estudos apontam que ela utiliza mais de 97% da matéria-prima, enquanto métodos tradicionais podem perder até 50% do material durante a fabricação [4].

Segundo [12], esse método é eficaz para produzir materiais com propriedades mecânicas e microestruturais superiores, especialmente quando submetidos a processos de sinterização controlados. Diante desse cenário, este estudo busca analisar a fabricação e caracterização de ligas de níquel por metalurgia do pó, avaliando suas vantagens e desafios. A principal questão a ser respondida é: em que medida esse processo pode otimizar a produção dessas ligas, considerando tanto suas propriedades quanto sua viabilidade econômica? A hipótese central é que esse processo de fabricação permite um melhor controle sobre as características do material, além de tornar a produção mais eficiente.

Portanto, este estudo visa explorar a viabilidade da metalurgia do pó na fabricação de ligas de níquel, focando na otimização do processo produtivo e na melhoria das propriedades mecânicas e microestruturais. O método inclui a compactação e sinterização dos pós metálicos, seguidas por testes para avaliar as propriedades do material final. Espera-se que os resultados obtidos possam incentivar a adoção dessa tecnologia em processos industriais, promovendo inovação e sustentabilidade na produção de ligas de alto desempenho.

2. DESENVOLVIMENTO

As superligas à base de níquel são materiais essenciais para aplicações em ambientes extremos, onde resistência mecânica, à corrosão e estabilidade térmica são requisitos fundamentais. A composição química das superligas influencia diretamente seu comportamento mecânico e seu ponto de degradação, sendo elementos como cromo, molibdênio, alumínio e titânio com papéis cruciais no fortalecimento da liga e na formação de fases protetoras, garantindo maior durabilidade e eficiência operacional. O uso da metalurgia do pó na fabricação dessas ligas proporciona um controle refinado da microestrutura, permitindo a obtenção de materiais com propriedades otimizadas para demandas específicas [8].

Neste trabalho, foram selecionadas quatro ligas metálicas de alto desempenho, cada uma com propriedades específicas que as tornam ideais para aplicações em condições extremas. As ligas escolhidas foram:

- Monel 400: Uma liga de níquel-cobre-ferro conhecida por sua excelente resistência à corrosão em ambientes marinhos e químicos. Sua alta resistência mecânica e durabilidade a tornam ideal para aplicações na indústria naval e química;

- Inconel 600: Uma liga de níquel-cromo-ferro que oferece boa resistência à oxidação e corrosão em altas temperaturas. É amplamente utilizada em setores como o aeroespacial e o nuclear, onde a estabilidade térmica é crítica;
- Hastelloy B2: Uma liga de níquel-molibdênio com resistência excepcional a meios corrosivos redutores, como ácido clorídrico. Sua aplicação é comum em indústrias químicas e de processamento de ácidos;
- Nimonic 80A: Uma liga de níquel-cromo com adições de alumínio e titânio, projetada para aplicações que exigem alta resistência mecânica e térmica, como componentes de turbinas a gás. Sua capacidade de suportar altas temperaturas e tensões mecânicas a torna essencial no setor aeroespacial.

O uso da metalurgia do pó para fabricar essas ligas é vantajoso porque permite um controle preciso da composição e da microestrutura do material. Além disso, é um processo que pode ser ajustado para produzir peças com formas complexas e propriedades específicas, o que é essencial para aplicações em setores como o aeroespacial e o químico. Segundo [16], a metalurgia do pó é uma das técnicas mais versáteis para a produção de materiais de alto desempenho.

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi organizado em etapas simples e bem definidas para garantir que tudo fosse feito de forma organizada e precisa. No laboratório, cada passo foi planejado para garantir que os resultados fossem confiáveis e que as propriedades das ligas pudessem ser avaliadas corretamente.

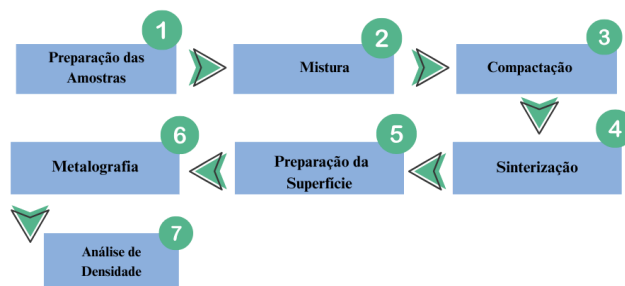


Figura 1. Fluxograma com passo a passo da metodologia. Fonte: Autoria própria (2025).

3.1 Preparação das Amostras

As amostras foram cuidadosamente preparadas a partir dos materiais disponíveis no laboratório, seguindo as composições químicas específicas das ligas **Monel 400**, **Inconel 600**, **Hastelloy B2** e **Nimonic 80A**. Para garantir exatidão na formulação, as quantidades de cada elemento foram rigorosamente medidas utilizando uma balança de precisão Marte Científica, modelo AD500. Esse procedimento assegurou que as proporções dos componentes estivessem corretas, minimizando possíveis variações na composição final das ligas.

- Monel 400(20g): Ni(13,60g), Fe(0,40g), Cu(6,00g).
- Inconel 600(20g): Ni(15,40g), Fe(1,60g), Cr(3,00g).
- Hastelloy B2(20g): Ni(14,40g), Mo(5,60g)
- Nimonic 80A(20g): Ni(15,26g), Cr(4,00g), Ti(0,48g), Al(0,26g)

Após a pesagem, os materiais foram guardados em tubos graduados, garantindo a organização e identificação adequada de cada amostra. Em seguida, os tubos foram armazenados em um dessecador, um ambiente controlado essencial para evitar a absorção de umidade e a oxidação prematura dos pós metálicos. Esse cuidado se justifica pelo fato de

que a umidade pode comprometer o processo de sinterização, influenciando diretamente a qualidade e as propriedades mecânicas do material [13]. Além disso, a exposição à umidade favorece a formação de hidróxidos, que interferem negativamente na densificação da liga, resultando em possíveis defeitos estruturais [1].

3.2 Mistura

Cada liga foi colocada em recipiente de 5 litros, com ponta cônica, que foi fixado no torno mecânico modelo torno Nodus 220 da Nardini. Os pós foram misturados por 4 horas para garantir que todos os componentes ficassem bem distribuídos. A mistura é uma etapa importante porque, se os pós não estiverem bem misturados, as propriedades do material final podem ficar inconsistentes [27]. E ainda, segundo [16] uma mistura mal feita pode resultar em partes do material com características diferentes, o que não é ideal.

3.3 Compactação

As amostras foram compactadas em uma prensa hidráulica de bancada, usando três pressões diferentes: 8 toneladas, 9 toneladas e 10 toneladas model P10300 da BONEVAU®. A escolha dessas pressões foi baseada em estudos que mostram que a carga pressão de compactação influencia diretamente a densidade do material final [13]. Para cada mudança de tonelada ocorreram pausas de 10 segundos. Foram feitas amostra em triplicatas, totalizando nove por liga. A compactação foi feita em uma matriz de punção, seguindo práticas padrão para garantir que as amostras ficassem uniformes. Segundo [27], é importante controlar bem a carga de pressão para evitar que as peças fiquem com trincas ou densidades desiguais.

3.4 Sinterização

Após a compactação, as amostras foram sinterizadas em um forno tipo mufla da ZEZIMAQ. O ciclo de sinterização foi feito em três temperaturas diferentes: 800°C, 900°C e 1000°C. Para cada carga de pressão de compactação (8, 9 e 10 toneladas), as amostras foram sinterizadas nas três temperaturas, totalizando nove ciclos de sinterização por liga. As amostras foram levadas ao forno em grupos de quatro, seguindo a ordem:

- 8 toneladas a 800°C, 900°C e 1000°C.
- 9 toneladas a 800°C, 900°C e 1000°C.
- 10 toneladas a 800°C, 900°C e 1000°C.

A escolha das temperaturas foi baseada em estudos que mostram que a temperatura de sinterização precisa ser alta o suficiente para unir as partículas, mas não tão alta a ponto de deformar o material [27]. Além disso, sinterizar em várias temperaturas permite ver como a temperatura afeta a densidade e as propriedades do material [1]. Depois de cada ciclo de sinterização, as amostras foram retiradas do forno, aguardamos até o dia seguinte, para garantir que esfriarem por completo e guardadas novamente no dessecador. Isso foi feito para evitar que as amostras oxidarem ou absorvessem umidade antes dos testes. Segundo [13], é importante proteger as amostras depois da sinterização para garantir que os resultados dos testes sejam precisos.

3.5 Preparação da Superfície

As amostras foram submetidas a um processo de preparação superficial de lixamento, seguido de polimento para permitir a análise microestrutural e limpeza superficial utilizando uma Lixadeira Politriz AROPOL 2V da Arotec.

O lixamento foi realizado utilizando lixas d'água com granulometrias de 600, 800,

1000 e 1200. Após o lixamento, foi realizado com alumina 1µm.

3.6 Metalografia

Após o polimento das amostras, seguimos para iniciar a análise microestrutural, utilizando um Microscópio Metalográfico Modelo IM 100 – 1A da Fortel, com as lentes de ampliação de 5X, 10X, 20X e 40X, permitindo a observação de características como contornos de grão, múltiplas fases, trincas, porosidades e vazios. A presença de vazios é particularmente relevante, pois está diretamente relacionada à densificação do material durante o processo de sinterização [11, 13] também indicam a eficiência do processo de compactação e sinterização, já que vazios excessivos podem comprometer a densidade e a resistência mecânica do material final [27, 11], de certo modo compactação inadequada ou uma sinterização insuficiente, pode levar a uma redução na densidade do material e, conseqüentemente, em suas propriedades mecânicas [13, 18]. Além disso, a forma com que os vazios se espalham pode influenciar a resistência à fadiga e à propagação de trincas, aspectos críticos para aplicações em setores como o aeroespacial e o químico [3, 9].

3.7 Análise de Densidade

Com o intuito de avaliar a densidade das nossas amostras, utilizamos o princípio de Arquimedes, um método amplamente reconhecido para determinação de densidade em materiais metálicos, especialmente em peças fabricadas por metalurgia do pó (ASTM B311), onde é observado o volume deslocado por uma amostra quando submersa em um líquido de densidade conhecida, no caso, água destilada. Para garantir a precisão das medições, foram utilizados uma proveta graduada de 10 mL, com resolução de 0,2 mL, e uma balança de precisão Marte Científica, modelo AD500. Após cada medição, tanto a amostra quanto a proveta foram submetidas a um processo de limpeza, esterilização e secagem com ar, assegurando a remoção de resíduos. Esse controle rigoroso é essencial, sobretudo ao lidar com materiais porosos, cuja interação com o meio líquido pode influenciar a precisão dos resultados [1, 13]. Então, utilizada a Equação 1:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Equação 1.

5. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos das densidades foram analisados em conjunto com as observações microestruturais, permitindo correlacionar a densidade com a porosidade das amostras. Essa abordagem integrada é essencial para otimizar os parâmetros de processamento e garantir que as ligas de níquel produzidas atendam aos requisitos desejados pelas aplicações industriais [3].

5.1 Hastelloy B2

A microestrutura da Hastelloy B2, observada na Figura 1, mostra uma matriz homogênea de níquel com a presença de fases secundárias com um bom coalescimento dos grãos. Nas amostras expostas a 900°C, observa-se um crescimento moderado de grãos, comparados com estudos como o de [30], que relataram que ligas de níquel-molibdênio tendem a apresentar crescimento de grãos quando expostas a temperaturas acima de 900°C. Esse crescimento é resultado da maior mobilidade atômica em temperaturas elevadas, que facilita a migração dos contornos de grãos. Já nas amostras expostas a 1000°C, o crescimento de grãos é mais acentuado, e a formação de fases secundárias torna-se mais evidente. segundo [15], esses fenômenos destacaram que a precipitação de fases secundárias em ligas Hastelloy B2 é comum em temperaturas acima de 950°C. Além disso, [21] relatou que a exposição prolongada a 1000°C pode levar à formação de fases ricas em molibdênio, o

que está em concordância com as observações feitas na Figura 2. A heterogeneidade microestrutural observada nas amostras expostas a 1000°C, especialmente na amostra com 9T, pode ser atribuída à precipitação de carbonetos e outras fases intermetálicas. Essas mudanças microestruturais podem impactar negativamente a resistência à corrosão e as propriedades mecânicas da liga, conforme [17].

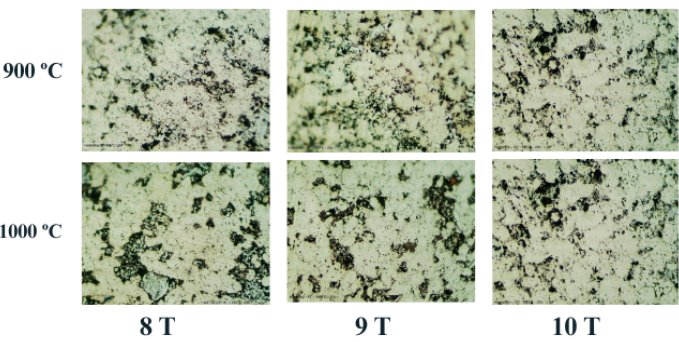


Figura 2. Análise metalográfica Hastelloy - 8T a 10T e em 800°C, 900°C, 1000°C. Lente de 20X de ampliação. Fonte: Autoria própria (2025).

A densidade da Hastelloy B2, portanto, permanece relativamente estável em condições térmicas moderadas conforme analisados na Tabela 1, as amostra expostas a 900°C, mas sofre uma ligeira redução em temperaturas mais altas como 1000°C, o que está em concordância com estudos anteriores, como [31], que relataram que o crescimento de grãos e a precipitação de fases secundárias podem afetar a densidade de ligas de níquel-molibdênio.

Tabela 1– valores de densidade das amostras, com a massa em função do volume.

Tonelada(t)	Temperatura(°C)	Massa(g)	Volume(mL)	Densidade(g/cm³)
8	800	3,821	0,6	6,395
8	900	3,818	0,6	6,363
8	1000	4,186	0,6	6,976
9	800	4,144	0,6	6,906
9	900	3,909	0,6	6,515
9	1000	4,046	0,8	5,057
10	800	4,006	0,6	6,676
10	900	4,095	1,2	3,413
10	1000	3,983	0,4	9,958

Fonte: Autoria própria (2025).

Inconel 600

A microestrutura observada apresenta uma matriz típica de ligas à base de níquel, com a presença de precipitados de segunda fase, podendo ser ricos em níquel e cromo, conforme [23]em sua análise de ligas Inconel, esses precipitados, que aparecem como áreas claras na Figura 3, são comuns em ligas submetidas a tratamentos térmicos, onde a segregação de elementos como cromo e níquel é favorecida. As bordas escuras ao redor das fases claras sugerem a formação de contornos de grão com redução no coalescimento ou presença de outra fase, como carbonetos [8]. Esses carbonetos são comuns em ligas Inconel e podem se formar durante o resfriamento, especialmente em regiões de segregação de impurezas.

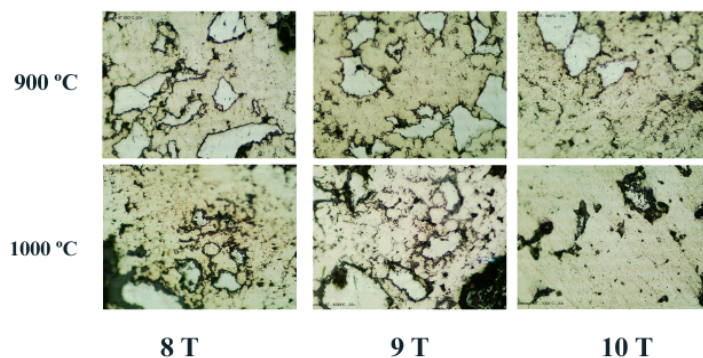


Figura 3 – Análise metalográfica Inconel - 8T a 10T e em 800°C, 900°C, 1000°C. Lente de 20X de ampliação.
Fonte: Autoria própria (2025).

Embora nossa análise não tenha identificado claramente essas fases, necessitando realizar outras análises, podemos verificar características microestruturais semelhantes às descritas na literatura, mas com uma porosidade mais pronunciada, possivelmente devido às condições específicas do processo de fabricação. Isso reforça a importância de otimizar os parâmetros de sinterização para minimizar defeitos e melhorar as propriedades finais do material.

A densidade teórica do Inconel 600 é de aproximadamente 8,47 g/cm³ [8]. No entanto, os valores experimentais obtidos em nossa pesquisa estão consideravelmente abaixo desse valor teórico, variando entre 5,058 g/cm³ e 6,977 g/cm³. Essa diferença pode ser atribuída principalmente à presença de porosidade na microestrutura do material, que é uma característica comum em materiais fabricados por metalurgia do pó, especialmente quando o processo de sinterização não é totalmente eficiente, uma vez que os vazios ocupam volume sem contribuir para a massa. Esse fenômeno foi também observado por [29], que relataram uma redução na densidade de ligas Inconel fabricadas por metalurgia do pó devido à coalescência incompleta das partículas durante a sinterização.

Tabela 2 – valores de densidade das amostras, com a massa em função do volume.

Tonelada(t)	Temperatura(°C)	Massa(g)	Volume(mL)	Densidade(g/cm³)
8	800	3,821	0,6	6,395
8	900	3,818	0,6	6,363
8	1000	4,186	0,6	6,976
9	800	4,144	0,6	6,906
9	900	3,909	0,6	6,515
9	1000	4,046	0,8	5,057
10	800	4,006	0,6	6,676
10	900	4,095	1,2	3,413
10	1000	3,983	0,4	9,958

Fonte: Autoria própria (2025).

Monel 400

É uma liga de níquel-cobre (Ni, 30% Cu, com traços de Fe) conhecida por sua alta resistência à corrosão. Analisando a Figura 4, fomos capazes de observar uma estrutura granular visível, com contornos de grão bem definidos, comprovando coalescimento seguido de crescimento dos grãos. Já analisando as regiões escuras observamos a presença de porosidade ou possível segregação de impurezas, mas essas áreas também podem ser óxidos ou compostos formados por reações com o ambiente durante o tratamento da sinterização.

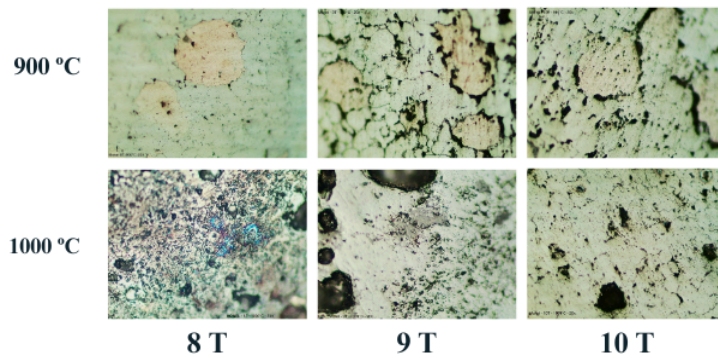


Figura 4 – Análise metalográfica Monel - 8T a 10T e em 800°C, 900°C, 1000°C. Lente de 20X de ampliação.
Fonte: Autoria própria (2025).

A densidade teórica, em condições ideais, ou seja, sem porosidade ou defeitos, é 8.80 g/cm³ [24]. Comparado com os valores presente na Tabela 3, podemos afirmar variações na microestrutura (porosidade e segregação de fases), em comparação com o material industrial. Quase todas as amostras estão entre 20% e 50% abaixo do valor teórico, sugerindo estrutura não consolidada.

Tabela 3 – Valores de densidade das amostras, com a massa em função do volume.

Tonelada(t)	Temperatura(°C)	Massa(g)	Volume(mL)	Densidade(g/c m³)
8	800	3,838	0,6	6,397
8	900	3,733	0,6	6,222
8	1000	4,233	0,8	5,291
9	800	3,850	0,6	6,417
9	900	3,751	0,6	6,252
9	1000	3,655	0,8	4,569
10	800	3,822	0,8	4,852
10	900	3,378	0,4	8,445
10	1000	4,025	0,6	6,078

Fonte: Autoria própria (2025).

Nimonic 80A

Uma superliga à base de níquel é conhecida por sua resistência a altas temperaturas e possui precipitados endurecedores, como a fase γ' (Ni₃(Al,Ti)), responsáveis pelo reforço da matriz. Assim observado na Figura 5, a amostra apresentou uma fase primária contínua, intercalando com regiões mais claras de grãos aparentemente maiores e uma porosidade bastante evidente, caracterizando como heterogeneidade no tamanho dos grãos com variação da coalescência dos grãos de cada fase.

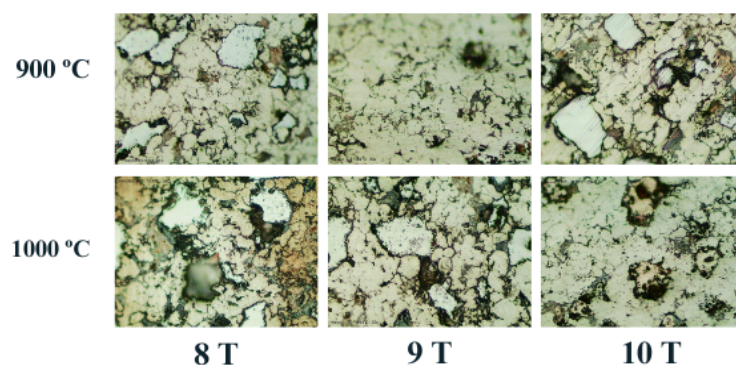


Figura 5 – Análise metalográfica Nimonic - 8T a 10T e em 800°C, 900°C, 1000°C. Lente de 20X de ampliação.

Fonte: Autoria própria (2025).

A maioria das amostras apresentou uma densidade abaixo do valor teórico, 8,19 g/cm³ [25]. Assim evidenciados na Tabela 4, a maioria das amostras decresce com o aumento da temperatura, resultando na expansão térmica e formação de espaço vazios (poros).

Tabela 4 – Valores de densidade das amostras, com a massa em função do volume.

Tonelada(t)	Temperatura(°C)	Massa(g)	Volume(mL)	Densidade(g/cm ³)
8	800	3,799	0,4	9,497
8	900	4,317	0,6	7,195
8	1000	4,588	0,8	5,738
9	800	4,473	0,6	7,455
9	900	3,669	0,6	6,115
9	1000	4,073	0,8	4,569
10	800	4,251	0,6	7,085
10	900	3,949	0,6	6,581
10	1000	3,692	0,6	6,153

Fonte: Autoria própria (2025).

6. CONCLUSÕES

A fabricação e caracterização das ligas de níquel Monel 400, Inconel 600, Hastelloy B2 e Nimonic 80A por metalurgia do pó em laboratório revelaram resultados promissores, destacando desafios a serem vencidos quando comparados aos parâmetros industriais. Em todas as ligas, as densidades medidas ficaram abaixo dos valores teóricos, com desvios significativos que variaram de 20% a 50%, exceto em poucas amostras isoladas. Essa discrepância pode ser atribuída principalmente à presença de porosidade, uma característica inerente ao processo por Metalurgia do Pó, que muitas vezes não alcança a mesma eficiência de consolidação observada em escalas industriais. A microestrutura das amostras confirmou a formação de porosidade e grãos heterogêneos, especialmente em temperaturas mais elevadas (1000°C), onde o crescimento de grãos e a segregação de fases se tornaram mais evidentes. A liga Monel 400, por exemplo, apresentou densidades entre 4.569 e 8.445 g/cm³, com a maioria das amostras abaixo do teórico de 8.80 g/cm³, indicando que a porosidade e a possível oxidação durante o processo impactaram diretamente sua consolidação. Já o Inconel 600, cuja densidade teórica é de 8.47 g/cm³, mostrou valores entre 3.413 g/cm³ e 6.977 g/cm³, com reduções em amostras sinterizadas a 900°C e 10T, sugerindo falhas na homogeneização durante a mistura ou compactação. A Hastelloy B2 e a Nimonic 80A também seguiram tendências semelhantes, com densidades variando de 4.297 a 9.083 g/cm³ e 4.569 a 9.497 g/cm³, respectivamente, reforçando a influência negativa da temperatura e da carga de pressão inadequadas na formação de microvazios.

A comparação com os processos industriais evidencia que, embora a metalurgia do pó ofereça vantagens como economia de material e flexibilidade na fabricação de peças complexas, sua aplicação em laboratório exige otimizações rigorosas. Parâmetros como carga de pressão de compactação, tempo de sinterização e controle atmosférico precisam ser ajustados para minimizar defeitos e aproximar as propriedades do material das exigências industriais. Em síntese, este trabalho não apenas valida a viabilidade da metalurgia do pó como alternativa aos métodos tradicionais, mas também destaca a necessidade de avanços tecnológicos para superar suas limitações atuais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASM International (2015). *ASM Handbook, Volume 7: Powder Metallurgy*. ASM International.

- [2] ASTM B311 (Método padrão para determinação de densidade de materiais metálicos por metalurgia do pó).
- [3] BHADSHIA, H. K. D. H., & Honeycombe, R. W. K. (2017). *Steels: Microstructure and Properties*. Butterworth-Heinemann.
- [4] BRITO, F. I. G. de, Medeiros, K. F., & Lourenço, J. M. (2008). UM ESTUDO TEÓRICO SOBRE A SINTERIZAÇÃO NA METALURGIA DO PÓ. *HOLOS*, 3, 204–211.
- [5] CALLISTER W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
- [6] CHIAVERINI, V. Metalurgia do Pó. 4ª Edição. São Paulo: ABM, 2001.
- [7] COSTA E SILVA, André Luiz V. da; MEI, Paulo Roberto. *Aços e ligas especiais*. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2021.
- [8] DAVIS, J. R. Nickel, Cobalt, and Their Alloys. ASM International, 1997.
- [9] DE JESUS, J. et al. Fatigue failure from inner surfaces of additive manufactured ti-6al-4v components. *Materials*, v. 14, n. 4, p. 1–12, 2021.].
- [10] DONACHIE, M. J.; DONACHIE, S. J. *Superalloys: A Technical Guide*. ASM International, 2002.
- [11] FANG, Z. Z. et al. Powder metallurgy of titanium—past, present, and future. *International Materials Reviews*, v. 63, n. 7, p. 407–459, 2018.
- [12] GONZATTI, R. B. et al. Controlled sintering of nickel-based alloys for enhanced mechanical and microstructural properties. *Journal of Powder Metallurgy*, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 45-53, 2011.
- [13] GERMAN, R. M. (2014). *Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles*. Butterworth-Heinemann.
- [14] GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental. 1. ed. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009
- [15] KUMAR, S. et al. Phase precipitation and microstructural stability in Hastelloy B2 under high-temperature exposure. *Materials Science and Engineering: A*, v. 706, p. 172-180, 2017.
- [16] JONES, W. D. (1960). *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*. Edward Arnold Publishers.
- [17] LEE, H. et al. Corrosion and mechanical properties degradation of Hastelloy B2 due to intermetallic precipitation. *Corrosion Science*, , v. 167, p. 108502, 2020.
- [18] MORAIS, G.A. Desenvolvimento da metalurgia do pó. Natal: EDUFERN, 2012.].
- [19] PARUCKER, M.; Klein, A.. Desenvolvimento de ligas sinterizadas de Níquel para aplicações como matriz de materiais compósitos. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, América do Sul, 9 7 07 2014.
- [20] REED, R. C. *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press, 2006.
- [21] SMITH, J. et al. Molybdenum-rich phase formation in Hastelloy B2 at 1000°C. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 50, n. 4, p. 2105-2115, 2019.
- [22] SMITH et al., 1998: Simulation of Metal Powder Compaction, for Development of Knowledge Based Powder Metallurgy Process Advisor. *Journal of Material Processing Technology*, No. 79, p. 94-100.
- [23] SMITH, J. et al. Precipitate evolution in Inconel alloys during heat treatment. *Acta Materialia*, v. 145, p. 154-164, 2018.
- [24] Special Metal corporation, Monel Alloy 400 datasheet.
- [25] Special Metals Corporation, Nimonic Alloy 80A Datasheet.

- [26] SAMUELS, L. E. (2003). *Metallographic Polishing by Mechanical Methods*. ASM International.
- [27] UPADHYAYA, G. S. (1997). *Powder Metallurgy Technology*. Cambridge International Science Publishing.
- [28] VANDER Voort, G. F. (1999). *Metallography: Principles and Practice*. ASM International.
- [29] ZHANG, X. et al. Porosity and density control in powder metallurgy-processed Inconel alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 275, p. 116335, 2020.
- [30] ZHANG, X. et al. Grain growth behavior of nickel-molybdenum alloys at elevated temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 740, p. 890-897, 2018.
- [31] WANG, Y. et al. Density variations in Ni-Mo alloys during thermal processing. *Materials Characterization*, v. 99, p. 156-163, 2015.