FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE LIGAS DE NÍQUEL POR METALURGIA DO PÓ

Pedro Henrique Moura Cunha Barros[1], Manoel Quirino da Silva Júnior[2]

[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, RN, Brasil (pedro.barros86272@alunos.ufersa.edu.br)
[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, RN, Brasil

Resumo: As ligas de níquel são amplamente utilizadas devido à resistência mecânica e à corrosão. Neste trabalho foram fabricadas as ligas Monel 400, Inconel 600, Hastelloy B2 e Nimonic 80A por metalurgia do pó. A Monel 400 apresentou maior variação de densidade, enquanto o Inconel 600 exibiu elevada porosidade e precipitados. As demais ligas apresentaram comportamento semelhante, indicando necessidade de otimização da compactação e sinterização.

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

INTRODUÇÃO

As ligas à base de níquel possuem ampla aplicação industrial devido à elevada resistência mecânica, estabilidade térmica e resistência à corrosão em ambientes agressivos. Essas características tornam esses materiais essenciais em setores como o aeroespacial, petroquímico, naval e químico, principalmente em componentes submetidos a altas temperaturas e elevadas solicitações mecânicas (Davis, 1997). Aliado a isso, as superligas de níquel apresentam elevada resistência mecânica e estabilidade em altas temperaturas, características que favorecem sua aplicação em componentes submetidos a condições severas de operação (Pollock, 2016).

Entre as principais superligas de níquel utilizadas industrialmente destacam-se o Monel 400, o Inconel 600, o Hastelloy B2 e o Nimonic 80A. O Monel 400 apresenta elevada resistência à corrosão em ambientes marinhos e químicos devido à sua composição rica em níquel e cobre. O Inconel 600 destaca-se pela resistência à oxidação e estabilidade em altas temperaturas, sendo amplamente empregado nas indústrias aeroespacial e nuclear. Já o Hastelloy B2 possui elevada resistência a meios redutores e ácidos, enquanto o Nimonic 80A é utilizado em componentes submetidos a elevadas temperaturas e tensões mecânicas, como turbinas a gás (Reed, 2006).

Nesse cenário, a metalurgia do pó tem se destacado como uma alternativa eficiente para a produção dessas ligas, principalmente pela elevada taxa de aproveitamento da matéria-prima e pela possibilidade de obtenção de microestruturas mais controladas (Chiaverini, 2001). Esse processo consiste na mistura de pós metálicos, compactação e posterior sinterização, promovendo a união das partículas por difusão atômica em altas temperaturas. Em comparação aos métodos convencionais de fabricação, a metalurgia do pó reduz desperdícios, custos de usinagem e consumo energético, além de possibilitar a fabricação de peças com geometrias complexas (Brito et al., 2008).

A eficiência da metalurgia do pó na fabricação de superligas depende diretamente do controle das etapas de processamento, uma vez que parâmetros como pressão de compactação e temperatura de sinterização exercem forte influência sobre a densificação e a microestrutura final do material. Processos inadequados podem resultar em elevada porosidade residual, crescimento excessivo de grãos, precipitação de fases secundárias e heterogeneidade microestrutural, comprometendo propriedades importantes, como resistência mecânica, estabilidade térmica e resistência à corrosão das ligas produzidas (German, 2014). Dessa forma, estudos voltados à caracterização microestrutural e à avaliação da densificação dessas ligas são fundamentais para otimizar o processamento e ampliar sua aplicação tecnológica e industrial.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo fabricar e caracterizar as ligas Monel 400, Inconel 600, Hastelloy B2 e Nimonic 80A por metalurgia do pó, avaliando a influência da compactação e da temperatura de sinterização sobre a densidade e a microestrutura das amostras produzidas.

MATERIAL E MÉTODOS



Figura 1. Apresenta o fluxograma das etapas utilizadas na fabricação e caracterização das ligas produzidas por metalurgia do pó.

As ligas Monel 400, Inconel 600, Hastelloy B2 e Nimonic 80A foram produzidas a partir de pós metálicos de níquel, ferro, cobre, cromo, molibdênio, titânio e alumínio. As massas dos constituintes foram determinadas utilizando balança analítica Marte Científica AD500.

As composições utilizadas foram:

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

Após a pesagem, os pós foram armazenados em dessecador para evitar absorção de umidade e oxidação superficial, fatores que podem comprometer a densificação durante a sinterização (German, 2014). Em seguida, os pós metálicos foram homogeneizados em recipiente cônico de 5 L acoplado ao torno mecânico Nodus 220 (Nardini) durante 4 h. A homogeneização adequada é essencial para evitar heterogeneidades microestruturais e variações nas propriedades finais do material (Upadhyaya, 1997).

Logo depois, as misturas foram compactadas em prensa hidráulica de bancada BONEVAU® P10300 utilizando pressões de 8, 9 e 10 toneladas. Entre cada incremento de carga foi adotado intervalo de 10 s para estabilização da pressão. Foram produzidas triplicatas para cada condição experimental. A compactação foi realizada em matriz metálica de punção, visando obter amostras uniformes e reduzir a formação de trincas e vazios internos (Upadhyaya, 1997).

Essas amostras foram sinterizadas em forno mufla ZEZIMAQ nas temperaturas de 800 °C, 900 °C e 1000 °C. Após o aquecimento, as amostras permaneceram em resfriamento natural até temperatura ambiente e foram posteriormente armazenadas em dessecador. A escolha das temperaturas foi baseada na necessidade de promover difusão atômica suficiente para consolidação das partículas sem provocar deformações excessivas da microestrutura (German, 2014).

As amostras foram submetidas a lixamento sequencial utilizando lixas d'água granulométricas 600, 800, 1000 e 1200 mesh. Em seguida, realizou-se polimento com alumina de 1 µm utilizando lixadeira politriz AROPOL 2V (Arotec). E foi determinada a caracterização microestrutural através de um microscópio metalográfico Fortel IM100-1A utilizando ampliações de 5x, 10x, 20x e 40x. Foram avaliadas características como crescimento de grãos, porosidade, segregação de fases e presença de vazios.

Ainda, a densidade das amostras foi determinada pelo princípio de Arquimedes, conforme ASTM B311, utilizando água destilada como fluido de referência. As medições foram realizadas com auxílio de proveta graduada de 10 mL e balança analítica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises microestruturais demonstraram que os parâmetros de compactação e sinterização influenciaram diretamente a densificação e a homogeneidade das ligas produzidas. As Figuras 2 a 5 evidenciam regiões porosas, crescimento granular e áreas heterogêneas associadas à consolidação incompleta durante o processamento. De maneira geral, observou-se que o aumento da temperatura favoreceu o crescimento dos grãos e intensificou as alterações microestruturais em determinadas amostras.

A liga Hastelloy B2 apresentou microestrutura relativamente homogênea nas amostras sinterizadas a 800 °C e 900 °C, evidenciando bom coalescimento entre partículas metálicas. Entretanto, em 1000 °C verificou-se crescimento acentuado de grãos e maior evidência de fases secundárias, comportamento associado ao aumento da mobilidade atômica em temperaturas elevadas (Kumar et al., 2017). Além disso, observou-se heterogeneidade microestrutural mais intensa nas amostras compactadas a 9 toneladas, sugerindo possível precipitação de fases intermetálicas ricas em molibdênio, conforme descrito por Smith et al. (2019). Essas alterações podem comprometer propriedades mecânicas e resistência à corrosão da liga (Lee et al., 2020).

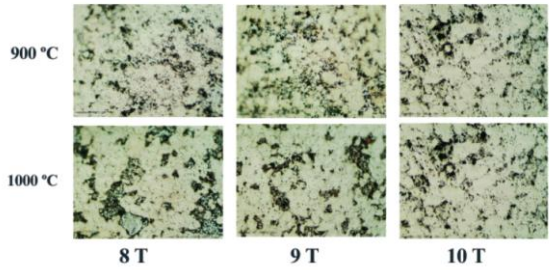

Figura 2. Análise metalográfica Hastelloy - 8T a 10T e em 800°C, 900°C, 1000°C. Lente de 20X de ampliação. Fonte: Autoria própria (2025).

As análises de densidade da Hastelloy B2 demonstraram valores inferiores aos teóricos, indicando presença significativa de porosidade residual. Esse comportamento pode estar relacionado à consolidação incompleta das partículas durante a sinterização, principalmente nas amostras submetidas às maiores temperaturas. Segundo Wang et al. (2015), o crescimento excessivo de grãos em ligas Ni-Mo pode favorecer a formação de vazios internos e reduzir a densificação do material.

Tabela 1. Hastelloy B2 - 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.

No Inconel 600 observou-se matriz típica de ligas à base de níquel com presença de precipitados de segunda fase distribuídos ao longo da microestrutura. As regiões claras observadas nas micrografias indicam possível segregação de elementos como níquel e cromo, enquanto regiões escuras podem estar associadas à presença de carbonetos ou porosidade. Resultados semelhantes foram descritos por Smith et al. (2018) para ligas Inconel submetidas a tratamentos térmicos.

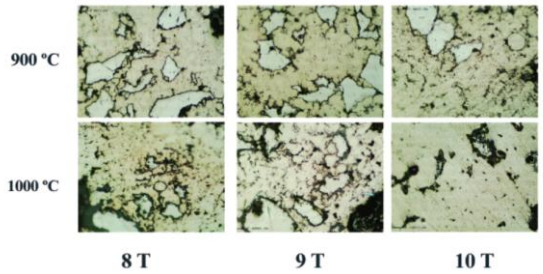

Figura 3. Análise metalográfica Inconel - 8T a 10T e em 800°C, 900°C, 1000°C. Lente de 20X de ampliação. Fonte: Autoria própria (2025).

As amostras de Inconel 600 apresentaram elevada porosidade, especialmente nas condições sinterizadas a 1000 °C. As densidades experimentais variaram entre 5,058 g/cm³ e 6,977 g/cm³, valores significativamente inferiores à densidade teórica da liga, estimada em 8,47 g/cm³ (Davis, 1997). Essa redução indica que o processo de sinterização não promoveu completa consolidação das partículas metálicas, favorecendo a permanência de vazios internos. Zhang et al. (2020) relataram comportamento semelhante em ligas Inconel produzidas por metalurgia do pó, associando a elevada porosidade à coalescência incompleta das partículas durante o aquecimento.

Tabela 2. Inconel 600 - 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.

A microestrutura da liga Monel 400 apresentou contornos de grão bem definidos e crescimento granular mais evidente nas amostras submetidas às maiores temperaturas de sinterização. As regiões escuras observadas nas micrografias sugerem presença de porosidade e possível formação de óxidos decorrentes da interação do material com a atmosfera do forno durante o tratamento térmico. Ademais, observou-se heterogeneidade no tamanho dos grãos, indicando variações locais na difusão atômica e no processo de consolidação.

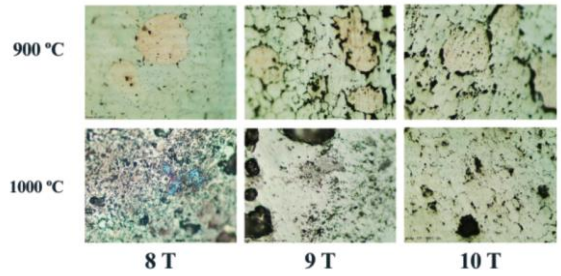

Figura 4. Análise metalográfica Monel - 8T a 10T e em 800°C, 900°C, 1000°C. Lente de 20X de ampliação. Fonte: Autoria própria (2025).

As densidades obtidas para o Monel 400 permaneceram entre 20% e 50% abaixo do valor teórico de 8,80 g/cm³, indicando estrutura parcialmente consolidada e elevada presença de microvazios. Esses resultados evidenciam que, embora a sinterização tenha promovido união entre partículas metálicas, o processo não foi suficiente para eliminar completamente a porosidade residual.

Tabela 3. Monel 400 - 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	3,838	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.

Para o Nimonic 80A observou-se microestrutura heterogênea composta por regiões de diferentes tamanhos de grãos e elevada presença de porosidade. A liga apresentou fases aparentemente contínuas intercaladas por regiões claras associadas ao crescimento localizado de grãos. Em temperaturas mais elevadas, verificou-se aumento da heterogeneidade microestrutural, indicando influência significativa da temperatura sobre a estabilidade da liga.

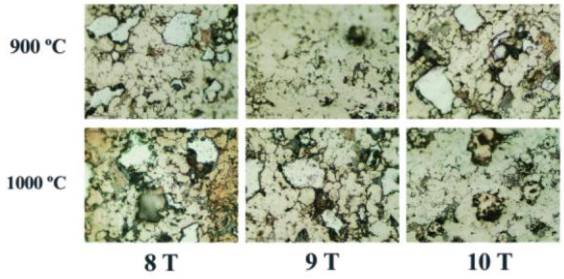

Figura 5 – Análise metalográfica Nimonic - 8T a 10T e em 800°C, 900°C, 1000°C. Lente de 20X de ampliação. Fonte: Autoria própria (2025).

As análises de densidade mostraram redução gradual dos valores experimentais com o aumento da temperatura de sinterização, comportamento possivelmente relacionado à formação de vazios internos e expansão térmica do material. A elevada porosidade observada nas micrografias contribuiu diretamente para a diminuição da densidade final das amostras.

Tabela 4. Nimonic 80A - 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	3,799	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.

Podemos observar que o aumento da temperatura favoreceu a difusão atômica e o crescimento granular das ligas. Entretanto, condições mais elevadas também intensificaram a heterogeneidade estrutural e a formação de vazios internos, principalmente nas ligas Inconel 600 e Nimonic 80A. Esse comportamento confirma que temperaturas excessivas podem comprometer a estabilidade microestrutural das ligas produzidas por metalurgia do pó (German, 2014).

Além da temperatura, a pressão de compactação exerceu influência significativa sobre a densificação das amostras. As amostras compactadas em maiores pressões apresentaram melhor coalescimento entre partículas, embora ainda tenham sido observadas regiões porosas e falhas de consolidação. Segundo Upadhyaya (1997), compactação insuficiente dificulta

a redução dos vazios internos durante a sinterização, comprometendo as propriedades mecânicas finais do material.

Comparando as ligas avaliadas, observou-se que o Monel 400 apresentou maior variação de densidade entre as condições analisadas, indicando sensibilidade mais elevada às alterações dos parâmetros de processamento. O Inconel 600 destacou-se pela elevada porosidade residual, enquanto o Hastelloy B2 apresentou microestrutura relativamente mais homogênea nas temperaturas intermediárias. Já o Nimonic 80A apresentou maior heterogeneidade microestrutural em altas temperaturas, associada ao crescimento localizado de grãos e formação de vazios internos.

De forma geral, todas as ligas avaliadas apresentaram densidades inferiores aos valores teóricos, caracterizando limitações no processo de consolidação empregado. A presença de porosidade residual influenciou diretamente a densificação e as características microestruturais das amostras, afetando potencialmente suas propriedades mecânicas.

Além disso, verificou-se que a combinação entre pressão de compactação e temperatura de sinterização exerceu influência significativa sobre a qualidade final das ligas produzidas. Embora tenha sido observada consolidação parcial das partículas metálicas, as diferenças microestruturais identificadas entre as ligas indicam que cada composição apresenta comportamento específico durante a sinterização, reforçando a necessidade de otimização individual dos parâmetros de processamento para melhorar a eficiência da metalurgia do pó na fabricação de superligas à base de níquel.

CONCLUSÃO

A fabricação das ligas Monel 400, Inconel 600, Hastelloy B2 e Nimonic 80A por metalurgia do pó mostrou-se viável em escala laboratorial. Entretanto, as amostras apresentaram densidades inferiores aos valores teóricos devido à elevada porosidade e consolidação incompleta das partículas metálicas.

As análises microestruturais evidenciaram crescimento de grãos, precipitação de fases secundárias e heterogeneidade estrutural, principalmente nas amostras sinterizadas a 1000 °C. A pressão de compactação e a temperatura de sinterização demonstraram influência direta na densificação e qualidade final das ligas.

Os resultados indicam a necessidade de otimização dos parâmetros de compactação, controle atmosférico e tempo de sinterização para redução da porosidade e melhoria das propriedades mecânicas das superligas produzidas por metalurgia do pó.

Outrossim, a metalurgia do pó demonstrou potencial como alternativa sustentável e economicamente viável para fabricação de ligas especiais, devido ao elevado aproveitamento da matéria-prima e à possibilidade de produção de componentes com geometrias complexas. Dessa forma, estudos futuros envolvendo controle atmosférico, maiores pressões de compactação e análises complementares, como microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X, podem contribuir para melhor compreensão das transformações microestruturais observadas durante o processamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pelo suporte laboratorial, estrutural e acadêmico fornecido para realização deste trabalho, bem como aos docentes e técnicos envolvidos no desenvolvimento das atividades experimentais.

REFERÊNCIAS

BRITO, F. I. G.; MEDEIROS, K. F.; LOURENÇO, J. M. Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó. HOLOS, v. 3, p. 204-211, 2008.

CHIAVERINI, V. Metalurgia do pó. 4. ed. São Paulo: ABM, 2001.

DAVIS, J. R. Nickel, cobalt, and their alloys. Materials Park: ASM International, 1997.

GERMAN, R. M. Sintering: from empirical observations to scientific principles. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.

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.

LEE, H. et al. Corrosion and mechanical properties degradation of Hastelloy B2 due to intermetallic precipitation. Corrosion Science, v. 167, p. 108502, 2020.

POLLOCK, T. M. Alloy design for aircraft engines. Nature Materials, v. 15, n. 8, p. 809-815, 2016.

REED, R. C. The superalloys: fundamentals and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

UPADHYAYA, G. S. Powder metallurgy technology. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 1997.

ZHANG, X. et al. Porosity and density control in powder metallurgy-processed Inconel alloys. Journal of Materials Processing Technology, v. 275, p. 116335, 2020.