

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LIGAS DE NIQUEL OBTIDAS POR METALURGIA DO PÓ¹

Rodrigo Gonzatti²

Vinicius Martins³

Paulo Ricardo Böesch Júnior²

Lírio Schaeffer⁴

Resumo

Os materiais sinterizados a base de níquel possuem ampla utilização comercial devido as suas propriedades únicas, tais como resistência a corrosão, ao desgaste e resistência mecânica a elevadas temperaturas, possuindo baixa expansão térmica, baixa condutividade elétrica e permeabilidade magnética. As superligas a base de níquel são utilizadas principalmente como aplicações aeroespaciais, plantas de geração de energia, reatores de indústrias químicas e também com grande aplicação em matrizes para produção de embalagens de vidro. Este trabalho tem como objetivo utilizar a metalurgia do pó juntamente com técnica metalográfica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ensaios de dureza (HV) para determinar as variações micro-estruturais e de dureza ocorridas corpos de prova com variações nas composições dos elementos de liga adicionados ao Níquel. Observou-se através dos ensaios que as ligas produzidas não atingiram a dureza esperada para a utilização destes materiais.

Palavras-chave: Ligas de níquel; Metalurgia do pó; Sinterização de níquel; Sinterização em estado sólido.

STUDY OF THE BEHAVIOR OF NICKEL ALLOYS OBTAINED BY POWDER METALLURGY

Abstract

The sintered materials based on nickel have wide commercial use due to its unique properties such as corrosion resistance, wear resistance, mechanical strength at low and high temperatures, low thermal expansion, low electrical conductivity and magnetic permeability. The nickel-based superalloys are used primarily in aerospace, power generation plants, chemical reactors and also with great application in production of glass packaging. This work has as goal to use the powder metallurgy technique coupled with metallography, scanning electron microscopy (SEM) and hardness test (HV) to determine the micro-structural changes and hardness of the bodies of proof with variations in the compositions of elements added to nickel alloy. It was observed through the tests that the alloys produced reached not the hardness expected for use these materials.

Key words: Nickel alloys; Powder metallurgy; Sintering of nickel; Solid state sintering.

¹ Contribuição técnica ao 12º Seminário de Metais Não-ferrosos, 31 de outubro a 1 de novembro de 2011, São Paulo, SP.

² Mestrando do PPGEM. Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. . Porto Alegre, RS, Brasil. rgonzatti@yahoo.com.br paulo.boesch@ufrgs.br.

³ Professor do Instituto Federal Sul-rio-grandense – IFSul – Campus Sapucaia do Sul Doutorando do PPGEM. Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. viniushiper@yahoo.com.br.

⁴ Prof. Dr. - Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGEM, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil. schaefer@ufrgs.br.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a metalurgia do pó tem sido um dos processos com emprego crescente na produção de componentes a base de superligas de níquel. Isto é resultado do desejo duplo de melhorar as propriedades e a viabilidade econômica da fabricação destes componentes em comparação com outros métodos, assim como vislumbrar o desenvolvimento de novas microestruturas, que não podem ser obtidas por outros processos tradicionais.⁽¹⁾

O emprego da técnica de “metalurgia do pó” para fabricação de peças de ferro e aço vem se estendendo rapidamente, principalmente porque se tem conseguido aliar a uma das características básicas da referida técnica (ou seja, a obtenção, em grande escala, de peças com dimensões dentro de estreitas tolerâncias), a possibilidade de obterem-se igualmente propriedades mecânicas em faixas de valores comparáveis com as que resultam dos processos metalúrgicos convencionais.⁽²⁾

O desenvolvimento das superligas de níquel começou nos Estados Unidos nos anos 1930. Além de turbinas de jatos, as superligas de níquel encontram aplicações variadas em altas temperaturas, como em motores de foguetes e veículos espaciais em geral, reatores nucleares, submarinos, usinas termoelétricas, equipamento petroquímico, insertos de moldes para embalagens de vidro, por exemplo. Entretanto, a principal aplicação continua sendo em turbinas de jatos de aviação.⁽³⁾

A razão primordial para a existência das superligas de níquel com diferentes composições químicas é a sua excelente resistência mecânica num amplo intervalo de temperaturas. A estrutura cristalina compacta cúbica de face centrada (CFC) da matriz austenítica das superligas de níquel, apresenta grande capacidade de manter resistência à tração, à ruptura e boas propriedades de fluência em temperaturas muito mais altas do que as ligas de matriz cúbica de corpo centrado (CCC) por causa de vários fatores, incluindo o excelente módulo de elasticidade e a alta difusividade que os elementos secundários possuem nesse tipo de matriz. É de grande importância a grande solubilidade de muitos elementos de liga na matriz austenítica e a capacidade de controle da precipitação de fases intermetálicas como a gama linha, que conferem alta resistência mecânica. O endurecimento também pode ser aumentado pela formação de carbeto e também pela dissolução de alguns elementos na matriz (endurecimento por solução sólida).⁽⁴⁾

O campo de aplicação de peças sinterizadas de níquel e suas ligas cresceram consideravelmente, pois elas possuem ótima resistência mecânica com grande faixa de temperaturas de trabalho, ocupando assim com o aço sinterizado um lugar de destaque entre os tipos de materiais utilizados na indústria moderna.⁽⁵⁾ A Tabela 1 apresenta algumas aplicações das ligas de níquel.

Tabela 1. Aplicações de Níquel e suas ligas⁽⁶⁾

METAL/LIGA	APLICAÇÕES
Níquel	Equipamento de processamento de produtos alimentares e de substâncias cáusticas; componentes de dispositivos eletrônicos.
Ligas de Ni-Cu	Equipamento de processamento de produtos de petróleo e petroquímicos; aquecedores de água e trocadores de calor; componentes que entram em contato com a atmosfera e água do mar; válvulas, bombas, parafusos, hélices e fixadores.
Ligas de Ni-Cr	Equipamento de processamento químico; equipamento de tratamento térmico; trocadores de calor, componentes de fornos; componentes de turbinas a gás; componentes de dispositivos eletrônicos.
Ligas de Ni-Cr-Fe	Equipamento de processamento químico; componentes de fornos.
Ligas de Ni-Mo	Componentes de turbinas a gás e de motores aeronáuticos; equipamento de processamento químico.

O objetivo deste trabalho foi analisar as diferentes propriedades de ligas Níquel produzidas por metalurgia do pó, alterando os elementos da liga e sua proporção para avaliar as propriedades físicas como densidade aparente, a verde e das peças sinterizadas juntamente com a contração linear e volumétrica. Realizou-se a micrografia dos pós elementares para avaliar a distribuição granulométrica, metalografia das amostras sinterizadas para avaliar porosidade e microestrutura e ainda mediu-se a dureza.

2 MATERIAIS E METODOS

Adotou-se neste trabalho um procedimento que tem por objetivo comparar cinco diferentes ligas de níquel produzidas a partir de pós elementares (Tabela 2).

Tabela 2. Composições das amostras de ligas de níquel

Amostras	Ni	Fe	Cr	Si	C	Cu	Co
1	bal	-	2,00%	2,00%	-	-	-
2	bal	0,50%	-	2,00%	-	20,00%	-
3	bal	0,30%	-	2,20%	0,04%	4,00%	-
4	bal	2,50%	7,50%	3,50%	0,20%	-	1,50%
5	bal	5,50%	7,50%	4,00%	0,20%	-	-

Foram desenvolvidas estas ligas com o intuito de obter resistência a altas temperaturas almejando alcançar a dureza de aproximadamente 300HV, esta é comumente empregada na indústria de fabricação de moldes para embalagens de vidro. A técnica de processamento adotada foi a metalurgia do pó utilizando uma matriz cilíndrica com diâmetro de 13 mm, pressão de compactação de 1.000 MPa, e a sinterização das peças foi feita com patamar térmico de 1.100 C com taxa de aquecimento de 10 C por minuto em atmosfera com 95% de nitrogênio e 5% de hidrogênio como exibe a Figura 1.

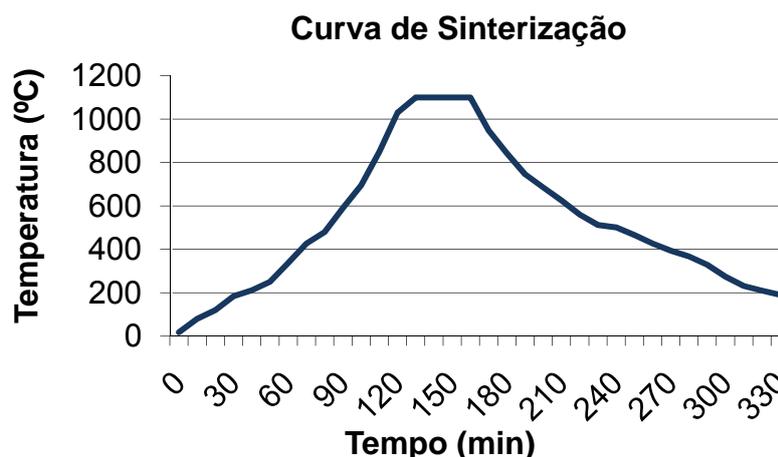


Figura 1. Curva de sinterização.

A densidade teórica de um material é calculada considerando que o mesmo tenha mesmo porosidade zero, onde os defeitos estruturais do sistema cristalino, misturas, múltiplas fases e soluções sólidas são considerados para a realização do cálculo. A

partir desta densidade realizaram-se os cálculos de densidade teóricas das ligas de níquel estudados. A Tabela 3 mostra os valores encontrados de densidade teórica das ligas de níquel, que servirão de base para a avaliação do resultado das amostras sinterizadas.

Tabela 3. Densidade teórica das ligas de níquel

LIGA	DENSIDADE g/cm ³
1	8,28
2	8,31
3	8,30
4	8,19
5	8,14

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os materiais foram analisados com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) com o intuito de analisar a dispersão no tamanho das partículas, homogeneidade e morfologia das misturas. As Figuras das micrografias foram obtidas com magnificação de 1.000x. A Figura 2 apresenta a micrografia do pó de níquel onde é possível visualizar o tamanho da partícula menor que 25 µm disposta de forma aglomerada. A Figura 3 exhibe a micrografia do pó de cromo com tamanho de partícula que varia na faixa de 5 µm a 40 µm.

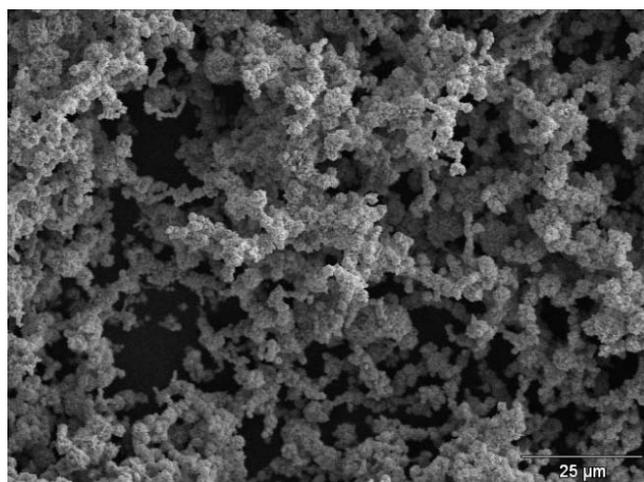


Figura 2. Micrografia pó de Níquel (1.000x).

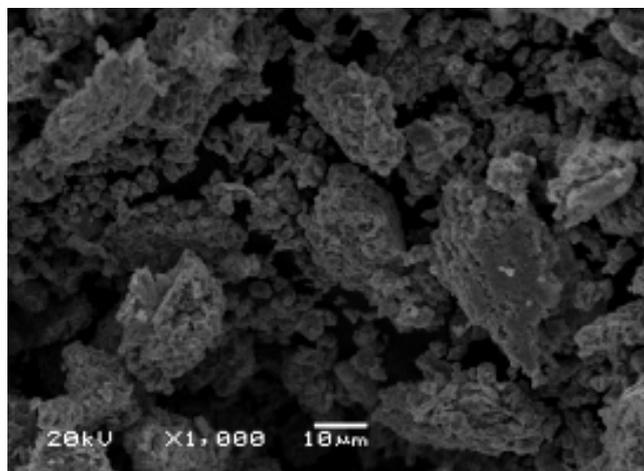


Figura 3. Micrografia pó de Cromo (1.000x).

Na Figura 4 observa-se o pó de silício com partículas esféricas irregulares com variação entre 5 μm e 20 μm com disposição aglomerada. Na Figura 5 pode ser visto o pó de cobre aglomerado com partículas na ordem de 10 μm .

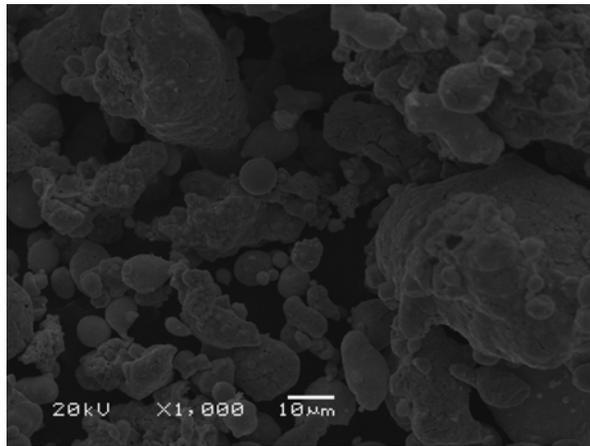


Figura 4. Micrografia pó de Silício (1.000x).

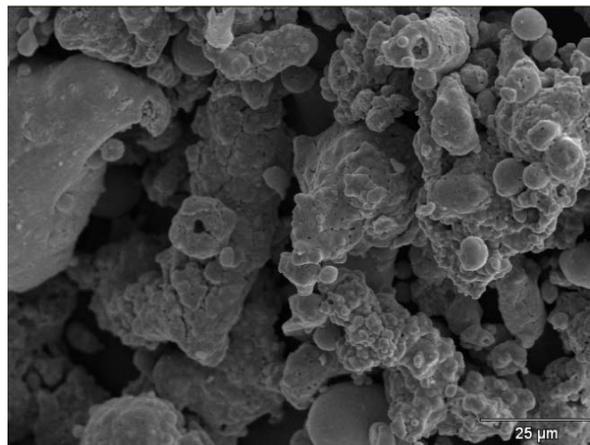


Figura 5. Micrografia pó de Cobre (1.000x).

Pode-se observar o pó de ferro na Figura 6 com partículas de 10 μm em aglomerados irregulares. A Figura 7 mostra a micrografia do pó de cobalto esférico com partículas menores que 5 μm e com aglomerado esférico aproximadamente de 20 μm .

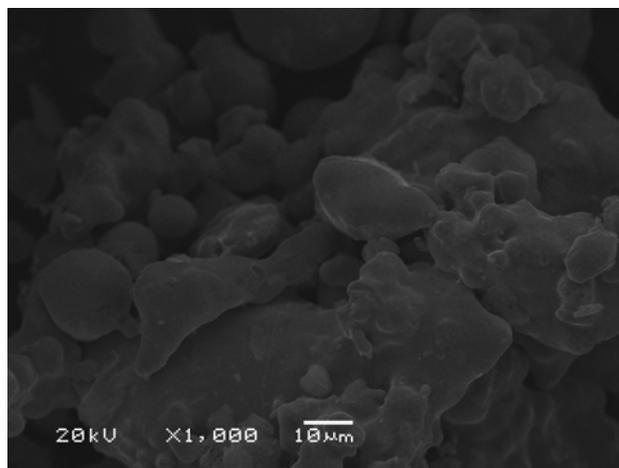


Figura 6. Micrografia pó de Ferro (1.000x).

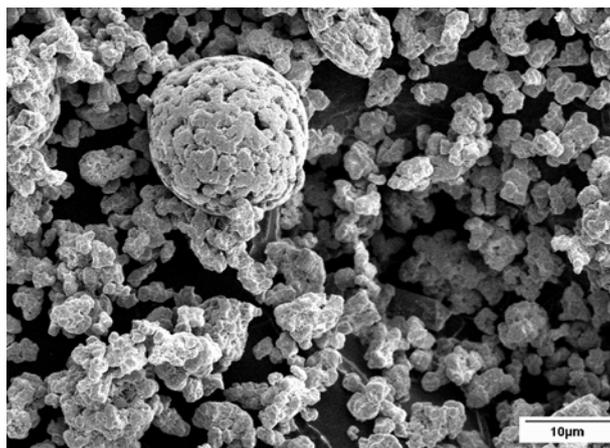


Figura 7. Micrografia pó de Cobalto (1.000x).

A partir dos corpos de prova das ligas produzidos construíram-se algumas tabelas comparativas onde; M: massa do corpo de prova (mm); H: altura do corpo de prova (mm); Ø: diâmetro do corpo de prova (mm); V: volume do corpo de prova (cm³) e ρ: densidade do corpo de prova (g/cm³). As Tabelas 4 a 8 apresentam os valores de massa do corpo de prova, densidade, diâmetro, volume e densidade, sendo os primeiros valores a verde, apenas compactados e os corpos de prova sinterizados.

Tabela 4. Dados comparativos liga 1

LIGA 1									
M verde	M sinterizada	H verde	H sinterizado	Ø verde	Ø sinterizado	V verde	V sinterizado	ρ verde	ρ sinterizado
5,34	5,30	6,22	5,85	12,98	12,28	0,82	0,69	6,49	7,74
4,67	4,62	5,30	5,00	12,98	12,30	0,70	0,60	6,65	7,73

Tabela 5. Dados comparativos liga 2

LIGA 2									
M verde	M sinterizada	H verde	H sinterizado	Ø verde	Ø sinterizado	V verde	V sinterizado	ρ verde	ρ sinterizado
4,98	4,98	5,32	5,35	12,98	12,9	0,70	0,70	7,07	7,30
4,83	4,83	5,17	5,17	12,98	12,9	0,68	0,67	7,07	7,20

Tabela 6. Dados comparativos liga 3

LIGA 3									
M verde	M sinterizada	H verde	H sinterizado	Ø verde	Ø sinterizado	V verde	V sinterizado	ρ verde	ρ sinterizado
5,01	4,98	5,65	5,44	12,98	12,35	0,75	0,64	6,70	7,83
4,42	4,40	5,00	4,76	12,98	12,35	0,66	0,57	6,68	7,75

Tabela 7. Dados comparativos liga 4

LIGA 4									
M verde	M sinterizada	H verde	H sinterizado	Ø verde	Ø sinterizado	V verde	V sinterizado	ρ verde	ρ sinterizado
4,75	4,73	5,61	5,38	12,98	12,34	0,74	0,63	6,39	7,55
4,88	4,86	5,80	5,65	12,98	12,40	0,77	0,66	6,37	7,37

Tabela 8. Dados comparativos liga 5

LIGA 5									
M verde	M sinterizada	H verde	H sinterizado	Ø verde	Ø sinterizado	V verde	V sinterizado	ρ verde	ρ sinterizado
4,81	4,79	5,77	5,72	12,98	12,37	0,76	0,64	6,31	7,47
4,99	4,98	6	5,55	12,98	12,38	0,79	0,68	6,29	7,38

Após sinterização dos corpos de prova através da coleta de dados conseguiu-se chegar a algumas informações muito pertinentes no que diz respeito à produção de peças através da metalurgia do pó convencional, que são a contração linear e contração volumétrica e densidade. As ligas obtiveram estabilidade na densificação durante o processo de sinterização e um aumento significativo da densidade a verde para a densidade do sinterizado. Observa-se que a liga 1 obteve a densidade a verde de aproximadamente 6,55 g/cm³ e passaram para 7,74 g/cm³ representando uma densificação de 93,42 ± 0,06%. A liga 2 de níquel obteve a densidade a verde de aproximadamente 7,07 g/cm³ e passaram para 7,25 ± 0,05 g/cm³ representando uma densificação de 87,24 ± 0,6% sendo a liga com menor densidade relativa. Na liga 3 o percentual de densificação após a sinterização foi de 93,84 ± 0,59% sendo esta a liga que obteve o melhor. A liga 4 obteve a densidade a verde de aproximadamente 6,38 g/cm³ e passaram para aproximadamente 7,44 g/cm³ representando uma densidade relativa de 92,09 ± 0,1% sendo a que manteve a maior estabilidade. A densificação de 91,22 ± 0,55% resultante na sinterização da liga 5. A Tabela 9 apresenta resumidamente nos percentuais de densificação da ligas de níquel sinterizadas.

Tabela 9. Dados comparativos liga 5

Liga	Densidade Relativa (%)	
	Amostra 1	Amostra 2
1	93,48	93,36
2	87,85	86,64
3	94,34	93,37
4	92,19	89,99
5	91,77	90,66

A Tabela 10 apresenta as contrações lineares e volumétricas das peças produzidas por metalurgia do pó.

Tabela 10. Contração linear e volumétrica da liga de níquel sinterizadas

Liga	Contração Linear (%)		Contração Volumétrica (%)	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
1	5,9	5,7	16,5	14,6
2	-0,6	0,0	0,0	1,5
3	3,7	4,8	14,7	13,6
4	4,1	2,6	14,9	14,3
5	0,9	7,5	15,8	13,9

A Tabela 10 apresenta os valores de contração linear e volumétrica com muita variação, sendo atribuído a quantidade e composições de metais em diferentes proporções, pois cada metal se comporta de uma maneira durante a sinterização. Os dados apresentados nesta tabela são extremamente importantes para realizar o projeto do ferramental de uma peça com aplicação específica. A Figura 8 mostra a microestrutura da liga 1 onde é possível observar poros distribuídos homogeneamente sobre a superfície com magnificação de 100x.

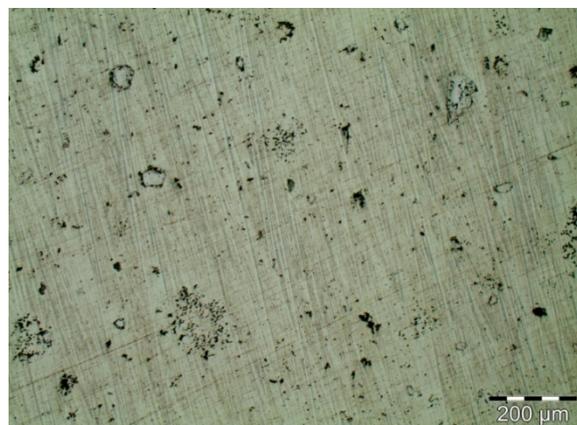


Figura 8. Metalografia da liga 1 ampliada 100X.

A Figura 9 exibe a metalografia da liga 2 com magnificação de 100x onde pode-se observar poros maiores com elevada quantidade justificando a baixa densidade relativa obtida pela liga exibida na Tabela 9.

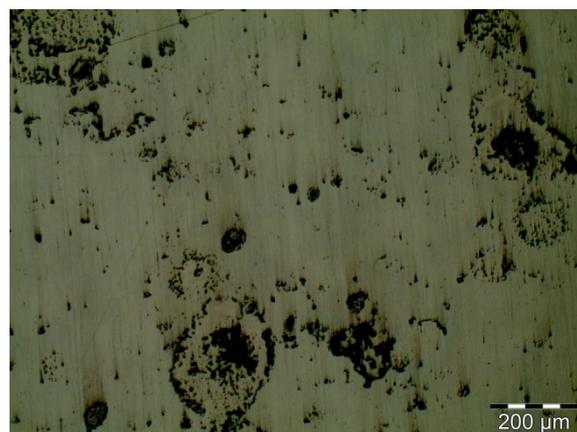


Figura 9. Metalografia da liga 2 ampliada 100X.

Observa-se na Figura 10 que a liga obteve a melhor densificação, pois, tem a menor porosidade exibindo poros pequenos e bem distribuídos.

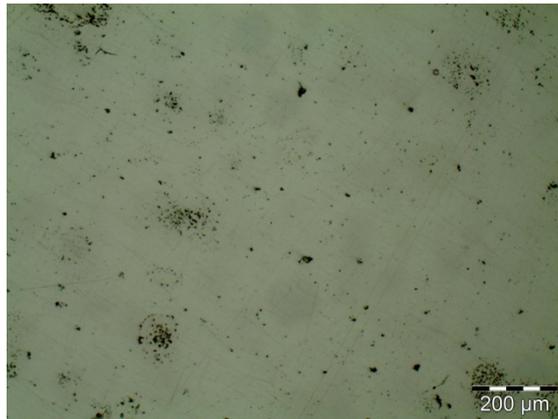


Figura 10. Metalografia da liga 3 ampliada 100X.

A Figura 11 apresenta a metalografia da liga 4 com poros praticamente esferoidizados e homoganeamente distribuídos.

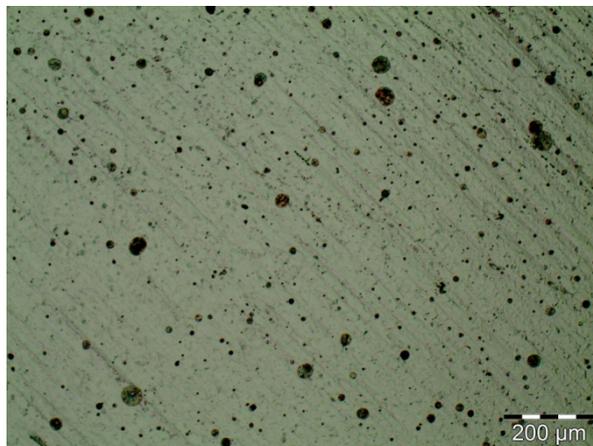


Figura 11. Metalografia da liga 4 ampliada 100X.

A Figura 12 exibe a metalografia com magnificação de 100x da liga 5 com poros homoganeamente distribuídos sobre a superfície da amostra.

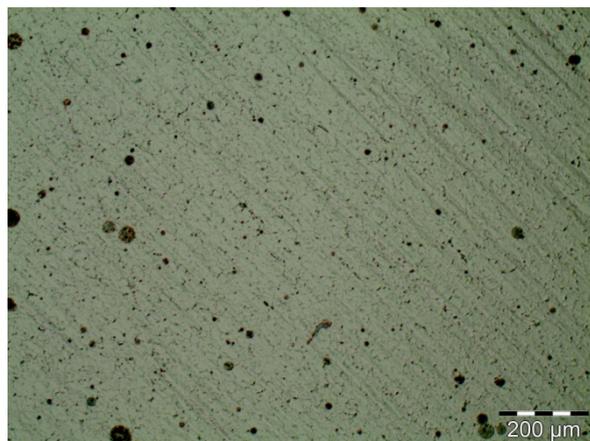


Figura 12. Metalografia da liga 5 ampliada 100X.

A Tabela 11 demonstra os valores mensurados de micro dureza das amostras estudadas das ligas de níquel, onde a liga 2 apresenta o melhor resultado.

Tabela 11: Micro dureza de amostras das ligas de níquel

t=5s	Liga 1	Liga 2	Liga 3	Liga 4	Liga 5
HV 100g/5s	98,11	200,65	100,58	120,36	139,15

Esta dureza elevada comparada com as outras ligas de níquel estudadas deve-se ao alto percentual de cobre por sua molhabilidade com o metal base. Este resultado mostra-se promissor no estudo, pois os valores encontrados de micro-dureza são o dobro em comparação com o resultado de duas ligas estudadas.

4 CONCLUSÃO

A importância de estudos de ligas níquel é conhecida desta a década de 1950 do século XX, porém, há poucos estudos sobre as ligas de níquel por metalurgia do pó. Com o intuito de avaliar as ligas de níquel obtidas por este processo de fabricação comparando com as fundidas realizou-se este trabalho. Pode concluir-se que a compactação de 1.000 Mpa em temperatura ambiente foi a adequada, pois, mesmo com uma pressão de compactação elevada a densidade relativa máxima obtida foi de 94% e sinterizada com atmosfera redutora, sendo necessário realizar sinterização a vácuo para aumentar a densificação. Outro fator que valida a curva de sinterização foi o aumento significativo da densidade a verde para a densidade do sinterizado. A partir dos resultados obtidos conclui-se que a utilização da metalurgia do pó para a obtenção de ligas de níquel é viável, havendo maior necessidade de estudo visando o melhoramento das propriedades mecânicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o Instituto Federal Sul-rio-grandense (IFSul) e as instituições de apoio financeiro como CNPq e CAPES.

REFERÊNCIAS

- 1 Níquel disponível em: <http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-assuntos.php?cod_secao=13>. Acesso em: 02/01/2011
- 2 CHIAVERINI, V.; Metalurgia do pó. São Paulo, Brasil: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2001 4ª Ed. P. 184 -187
- 3 SILVA, O.M.M., MÁXIMO, F. LOURENÇO, N.J.; GRAÇA, M.L.A. Caracterização metalográfica de uma superliga a base de níquel. IAE/AMR, SENAI/FGT, FEG/UNESP, IAE - Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Materiais Praça Mal. Eduardo Gomes 50, São José dos Campos – SP, 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 24 a 28 de Novembro de 2008, Porto de Galinhas, PE, Brasil.
- 4 SIMS, C.T.; HAGEL, W.C.; “The Superalloys”, John Wiley & Sons, New York, 1972, p. 1-565.
- 5 Níquel e ligas de níquel disponível em: <<http://metallurgyfordummies.com/nickel-and-nickel-alloys/>>. Acesso em: 25/05/2011
- 6 BRESCIANI FILHO, E.; Seleção de Metais não ferrosos; Editora da Unicamp; 2a Edição; 1997; pg. 89-99.
- 7 Ligas de cobre-níquel Disponível em: <<http://www.copper.org/education/homepage.html>>. Acesso em 15/05/2011