

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA
PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO DA LIGA
70Fe-25Ni-5Al₂O₃ PELO PROCESSO DE
METALURGIA DO PÓ**

Rafael Resende Lucas

Pindamonhangaba - SP
2018

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA
PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO DA LIGA
70Fe-25Ni-5Al₂O₃ PELO PROCESSO DE
METALURGIA DO PÓ**

Rafael Resende Lucas

Projeto de Monografia apresentado à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para graduação
no Curso Superior de Tecnologia em Processos
Metalúrgicos.

Área de concentração: Materiais e Metalurgia.
Prof. Orientador: Dr. José André Marin de Camargo

Pindamonhangaba - SP
2018

L933e

Lucas, Rafael Resende.

Estudo do efeito da variação da pressão de compactação da liga 70Fe-25Ni-5Al₂O₃ pelo processo de metalurgia do pó / Rafael Resende Lucas / FATEC Pindamonhangaba, 2018. 30f.: il.

Orientador: Professor Dr. José André Marin de Camargo
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2018

1. Metalurgia do pó. 2. Liga experimental. 3. Sinterização.
I. Lucas, Rafael Resende. II. Camargo, José André Marin de.
III. Título.

CDD 669

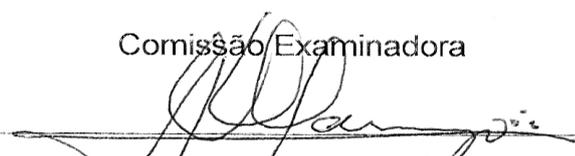
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

"ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DE PRESSÃO NA ETAPA DE COMPACTAÇÃO DA IGA 70Fe-25Ni_5Al2O3 PELO PROCESSO DE MATALURGIA DO PÓ"

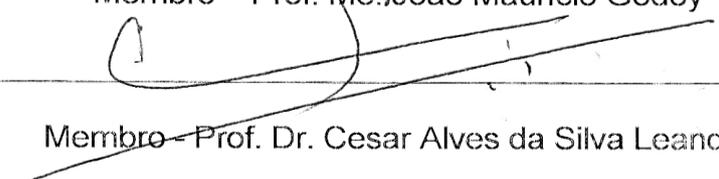
RAFAEL RESENDE LUCAS

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, para graduação no Curso Superior de Tecnologia em Tecnologia em Processos Metalúrgicos.

Comissão Examinadora


Orientador – Prof. Dr. José André Marin de Camargo


Membro – Prof. Me. João Maurício Godoy


Membro – Prof. Dr. Cesar Alves da Silva Leandro

Pindamonhangaba, 28 de Junho de 2018.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Claudineia Eunice Resende e Sebastião Lucas, e a minha namorada Luana Menezes da Silva.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria concluído se não fosse pelo apoio de pessoas e instituições fora da Fatec Pindamonhangaba, sendo assim, agradeço:

À minha família, em especial minha mãe Claudineia Eunice Resende e Sebastião Lucas pelos sábios conselhos que me deram.

À Luana Menezes da Silva, minha namorada, pela paciência e por entender como este projeto é de grande importância em minha vida.

Ao meu professor orientador Dr. José André Marin de Camargo pela orientação durante o andamento do trabalho de graduação.

Ao professor Dr. José Vitor Candido de Souza, por conseguir as amostras necessárias para este projeto pudesse ser concluído, e por conceder seu tempo para me passar parte de seu conhecimento na área deste trabalho.

Ao professor coordenador Me. João Maurício Godoy, por fornecer alguns materiais para a confecção das amostras e na parte de preparação metalográfica e pelo apoio moral para a conclusão deste projeto.

Ao Professor Dr. Jorge Luiz Rosa pelo auxílio para a obtenção das imagens de microscopia eletrônica de varredura.

Ao corpo de auxiliares docentes da Fatec Pindamonhangaba pelo apoio técnico durante o preparo das amostras e manuseio dos equipamentos nos laboratórios.

Ao corpo docente da Fatec Pindamonhangaba que durante os três anos de graduação transmitiram seus conhecimentos, permitindo assim que eu pudesse aplicar meus conhecimentos obtidos neste trabalho de graduação.

“Se enxerguei mais longe, foi porque me apoiei sobre os ombros de gigantes...”

Sir Isaac Newton (1643-1727)

LUCAS, R. R. **Estudo do efeito da variação da pressão de compactação da liga 70Fe-25Ni-5Al₂O₃ pelo processo de metalurgia do pó.** 2018. 30 pg. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos). Faculdade de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2018.

RESUMO

A metalurgia do pó é um processo de confecção de peças de baixa até alta complexidade geométrica, muito utilizada para materiais que possuem alto ponto de fusão (como certas ligas metálicas e até mesmo cerâmicas). Este processo vem ganhando cada vez mais espaço no ramo industrial devido as suas vantagens que é o aproveitamento de matéria prima (em torno de 95 a 97%), obtenção de peças com tolerâncias bem estreitas entre outros. A liga utilizada é constituída de 70% de ferro (Fe), 25% de níquel (Ni) e 5% de alumina (Al₂O₃). Foram confeccionadas amostras (compactadas uniaxialmente e isostaticamente), todas sinterizadas na temperatura de 1350 °C por 1 hora. Sendo então analisadas as densidades pelo princípio de Arquimedes, a microdureza em Vickers (HV), microscopia óptica, e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise de densidade demonstrou que todas amostras apresentaram densidade bem inferior a densidade teórica da liga calculada (7,72 g/cm³), sendo das amostras uniaxial 4,36 g/cm³ (56,46% da densidade teórica) e as isostáticas 4,44 g/cm³ (57,50% da densidade teórica). Pela análise de microdureza as amostras compactadas pelo processo isostático apresentaram em média maior dureza que as submetidas somente pelo processo uniaxial, sendo 379,7 HV (isostáticas) e 361,51 HV (uniaxiais), mas é possível verificar que as amostras uniaxiais possuem maior variação em dureza, podem ter pontos com dureza superior as amostras isostáticas. Nas imagens obtidas pela microscopia óptica é possível observar fases vidradas, além dessas fases, em certos pontos são vistas bolhas que são características de materiais cerâmicos, poros também são bastante visualizados. Pela microscopia eletrônica de varredura, foi possível observar claramente a superfície das amostras, sendo que a amostra compactada isostaticamente apresentou uma superfície mais homogênea e com poros menores e mais fechados do que a amostra compactada uniaxialmente.

Palavras-chave: metalurgia do pó, liga experimental, sinterização.

LUCAS, R. R. **Study of the effect of the compression pressure variation of the alloy 70Fe-25Ni-5Al₂O₃ by the process of powder metallurgy.** 2018. 30 pg. Graduation Project (Technology Course in Metallurgical Processes). Faculdade de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2018.

ABSTRACT

Powder metallurgy is a low-to-high geometric complexity process, much used for materials that have a high melting point (such as certain metal alloys and even ceramics). This process has been gaining more and more space in the industrial sector due to its advantages that is the use of raw material (around 95 to 97%), obtaining parts with very narrow tolerances among others. The alloy used is 70% iron (Fe), 25% nickel (Ni) and 5% alumina (Al₂O₃). Samples (uniaxially and isostatically compacted) were made, all sintered at a temperature of 1350 °C for 1 hour. The densities were then analyzed by the Archimedes principle, Vickers microhardness (HV), optical microscopy, and scanning electron microscopy (SEM). Density analysis showed that all samples had a density well below the theoretical density of the calculated alloy (7.72 g/cm³), with uniaxial samples being 4.36 g/cm³ (56.46% of theoretical density) and the isostatic 4,44 g/cm³ (57.50% theoretical density). By the microhardness analysis, the samples compacted by the isostatic process showed on average a greater hardness than those submitted only by the uniaxial process, being 379.7 HV (isostatic) and 361,51 HV (uniaxial), but it is possible to verify that the uniaxial samples have a greater variation in hardness, may have points with hardness higher than isostatic samples. In the images obtained by optical microscopy it is possible to observe glazed phases, besides these phases, in certain points are seen bubbles that are characteristic of ceramic materials, pores are also quite visualized. By scanning electron microscopy, it was possible to clearly observe the surface of the samples, and the isostatically compacted sample presented a more homogeneous surface and with smaller and more closed pores than the uniaxially compacted sample.

Key words: powder metallurgy, experimental alloy, sintering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Consumo de energia e aproveitamento de matéria prima	15
Figura 2	Representação de atomização do metal líquido	16
Figura 3	Esquema de forno de sinterização tipo esteira	18
Figura 4	Cálculo da área da endentação do penetrador	22
Figura 5	Embutidora	26
Figura 6	Lixadeira de bancada	27
Figura 7	Politriz circular	27
Figura 8	Balança analítica Shimadzu	28
Figura 9	Microscopia da liga 70Fe-25Ni-5Al ₂ O ₃ compactada uniaxialmente próximo a borda (superior) e próximo a linha central (inferior) do corpo de prova	32
Figura 10	Microscopia da liga 70Fe-25Ni-5Al ₂ O ₃ compactada isostaticamente	33
Figura 11	MEV das amostras compactadas.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Ligas Fe-Ni moles magneticamente	19
Tabela 2	Ligas Fe-Ni com dilatação térmica controlada	19
Tabela 3	Composição química do ferro reduzido em pó	23
Tabela 4	Massas dos corpos de prova sinterizados	29
Tabela 5	Valores de microdureza	29
Tabela 6	Porcentagem da uniformidade da microdureza das amostras	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 METALURGIA DO PÓ	15
2.1.1 Atomização	16
2.1.2 Mistura e homogeneização	16
2.1.3 Compactação	17
2.1.4 Sinterização	17
2.2 LIGAS Fe-Ni	18
2.3 MATERIAIS CERÂMICOS	20
2.3.1 Alumina	20
2.4 MICROSCOPIA CONVENCIONAL	20
2.4.1 Corte	21
2.4.2 Embutimento	21
2.4.3 Lixamento	21
2.4.4 Polimento	21
2.4.5 Ataque químico	21
2.5 MICRODUREZA	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 MOAGEM E HOMOGENEIZAÇÃO	24
3.2 COMPACTAÇÃO	24
3.3 SINTERIZAÇÃO	24
3.4 CORTE	25
3.5 EMBUTIMENTO	25
3.6 LIXAMENTO E POLIMENTO	26
3.7 ATAQUE QUÍMICO	28
3.8 ANÁLISES	28
3.8.1 Análise de densidade	28
3.8.2 Análise de microdureza	29
4 RESULTADOS OBTIDOS	30
4.1 DENSIDADE	30
4.2 MICRODUREZA	31
4.3 MICROSCOPIA CONVENCIONAL	32

4.3.1 Amostras compactadas uniaxialmente	32
4.3.2 Amostras compactadas isostaticamente	33
4.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	34
5 CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

A metalurgia do pó (MP) é um processo de confecção de peças usando materiais dos mais diversos tipos, inclusive materiais com alto ponto de fusão, como certas ligas metálicas e cerâmicas.

O processo tem entre seus objetivos principais o máximo de aproveitamento de matéria prima e/ou produção de peças com tolerância dimensional muito estreita.

Este processo no caso de materiais metálicos ferrosos e não ferrosos, consiste em adquirir pó da liga desejada, a mistura do pó metálico com elementos ligantes, o que garante a resistência a verde da peça e logo depois vem a compactação, após o processo de compactação ocorre a sinterização que promove a evaporação do lubrificante adicionado na compactação e a difusão atômica nas superfícies de contato, provocando a união efetiva entre as partículas da liga, a sinterização pode entregar a peça acabada ou semi acabada.

Em sua abrangência, a metalurgia do pó possui muitos parâmetros a serem analisados para obter diversas propriedades mecânicas, mas neste trabalho busca-se responder: o que ocorre, com a dureza, a densidade e a morfologia da peça sinterizada quando se varia a pressão de compactação.

O objetivo geral desta monografia será analisar o efeito resultante pela variação de pressão na etapa de compactação dos pós; o objetivo específico é analisar os resultados sobre os corpos de prova sinterizados por diferentes métodos, sendo eles: microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaio de microdureza, verificar morfologia das amostras via microscopia convencional e microscopia eletrônica de varredura.

No mercado nacional e internacional muitos processos de conformação mecânica como a usinagem, forjamento, extrusão entre outros apresentam certas limitações, em questão de aproveitamento de matéria (que no caso da usinagem é em torno de 50%) e quantidade elevada de etapas para se obter o produto final. Diante disso a MP possui uma grande vantagem que é o aproveitamento de matéria prima (em torno de 95 ~ 97%), e poucas etapas para conseguir o produto final, porém entre poucas limitações pode-se citar que o processo só é viável para uma quantidade elevada de peças produzidas, para justificar o valor do seu ferramental (BRITO, 2007).

Para o desenvolvimento deste trabalho serão realizadas revisões bibliográficas, sendo estas artigos científicos, teses e dissertações; será realizado também em laboratórios da própria instituição Fatec Pindamonhangaba, como: laboratório químico, laboratório metalográfico e o laboratório de microscopia para se utilizar o MEV (microscópio eletrônico de varredura).

Esta monografia é constituída de cinco capítulos, sendo assim, o primeiro é o capítulo introdutório ao assunto da metalurgia do pó, mostrando sua importância no mercado nacional e internacional, suas vantagens em comparação com outros processos de conformação. No segundo capítulo será abordado mais a fundo sobre os processos realizados neste trabalho, como: as etapas da MP, os ensaios realizados para verificar a diferença do parâmetro estudado. No terceiro capítulo será a vez dos materiais utilizados e os métodos aplicados. No quarto capítulo é o de resultados de discussões, será dividido em aproximadamente cinco tópicos, para os resultados do MEV, microdureza, microscopia convencional e a análise de densidade dos corpos de prova. No quinto capítulo será a conclusão desta monografia e a resposta para a pergunta realizada neste capítulo: o que ocorre com uma peça sinterizada quando se varia a pressão de compactação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 METALURGIA DO PÓ

A metalurgia do pó (MP) é um processo de fabricação de peças metálicas, onde seus principais objetivos são a economia de material, tolerância dimensional excepcional das peças acabadas, produção de grandes lotes em períodos relativamente baixos em comparação com demais processos e economia de energia, sendo que este processo requer menos etapas do que processos como usinagem, forjamento, entre outros (BRITO, 2007).

Segundo o Grupo setorial de metalurgia do pó, o aproveitamento de matéria prima no processo de sinterização é de 95% contra 50% do processo de usinagem, assim como na figura 1.

Figura 1 – Consumo de energia e aproveitamento de matéria prima



Fonte: Grupo Setorial de Metalurgia do Pó.

Mas em compensação o processo de MP possui uma limitação que é o custo do processo, que só é viável se as peças a serem confeccionadas puderem ser feitas apenas por tal processo, ou, a quantidade de peças for alta, assim como para a indústria automobilística, de buchas auto lubrificantes, etc.

O processo de MP é constituído de etapas, sendo estas: produção de pós, a mistura e homogeneização dos pós, a compactação e a sinterização, raramente há a necessidade de se fazer algum processo de usinagem ou retífica em peças sinterizadas (CHIAVERINI, 2001).

Segundo Sanderow (1990) apud Filho *et al.* (2000) o processo de metalurgia do pó voltado para aços ferramenta foi iniciado devido as necessidades de empresas fabricantes de

ferramentas e clientes destas buscando melhorias na microestrutura, assim melhorando os processos com estas ferramentas.

2.1.1 Atomização

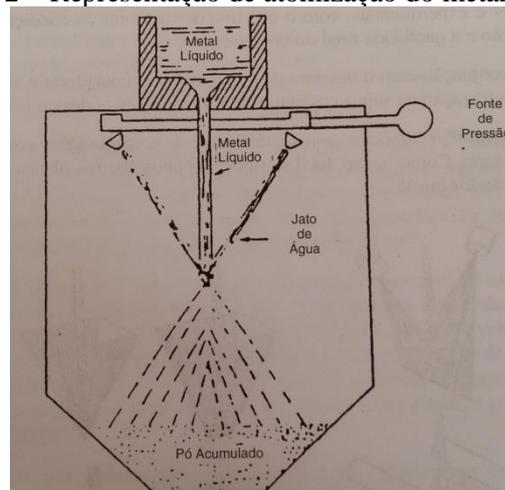
A atomização é o método dominante no quesito produção de pós metálicos, com ele é possível obter pós pré-ligados de alumínio, latão, ferro fundido, aços baixa liga, superligas, entre outros (CHIAVERINI, 2001).

Porém há possibilidade de obtenção de pós de outras maneiras, como: eletrólise, moagem, entre outros.

O processo de atomização ocorre com metal desejado ainda no estado líquido. A temperatura de atomização depende do material ou liga estudada, o metal é vazado por um pequeno orifício e resfriado com jato de água com pressão de 3,5 a 21 MPa ou gás inerte pressurizado com 7 MPa (LOBO, 2014).

Conforme a figura 2 é possível verificar como que ocorre o processo de atomização do metal.

Figura 2 – Representação de atomização do metal líquido.



Fonte: (CHIAVERINI, 2001)

O resultado da atomização são partículas extremamente finas, com granulometria inferiores a 200 μm (CHIAVERINI, 2001).

2.1.2 Mistura e homogeneização

Este processo consiste em colocar o pó seco da liga metálica desejada juntamente com aglomerante (para facilitar a criar mais pontos de contato entre as partículas) e lubrificante (para

facilitar a retirada da matriz) e geralmente o lubrificante mais utilizado é o estearato de zinco ($C_{36}H_{70}O_4Zn$) que sua concentração na massa do pó metálico é em torno de 0,5 a 1,5% (CHIAVERINI, 2001).

2.1.3 Compactação

A etapa de compactação é de extrema importância no processo da MP, pois ele garante a “resistência a verde” ao material para que seja manuseado, confere a peça sua forma quase final, e a densidade a verde da peça; podendo ser realizada em matriz rígida fechada ou matriz isostática em matriz flexível (BRITO, 2007).

A etapa de compactação pode ser subdividida nos efeitos causados nos pós durante a aplicação de pressão, sendo as etapas: 1) as partículas do pó metálico são rearranjadas de forma a eliminar partes dos vazios entre as partículas; 2) envolvendo a deformação plástica das partículas; 3) as partículas do pó ficam frágeis devido ao encruamento, se quebram e formam partículas menores (CHIAVERINI, 2001).

No processamento de compactação uniaxial as etapas são da seguinte maneira: ocorre o enchimento do molde com pó metálico, o punção superior desce contra o molde preenchido pelo pó, ocorre aplicação de pressão no pó pelo punção, há a retirada do punção, e finalmente a ejeção do corpo compactado (MOURA, 2015).

2.1.4 Sinterização

A sinterização é a etapa mais importante do processo de metalurgia do pó, pois ela garante a resistência, dureza e densidade final a peça; a temperatura da etapa de sinterização ocorre entre 2/3 a 3/4 da temperatura de fusão da liga considerada (CHIAVERINI, 2001).

Para Brito (2007) a sinterização é um processo de união das partículas do material termicamente ativado, fazendo as partículas adquirirem resistência mecânica.

Dependendo do material, durante a etapa de sinterização adota-se uma atmosfera protetora para evitar ou minimizar alguma reação termoquímica no compactado verde, remover camadas óxidas formadas no compactado e também fornecendo elementos de liga as peças (CHIAVERINI, 2001).

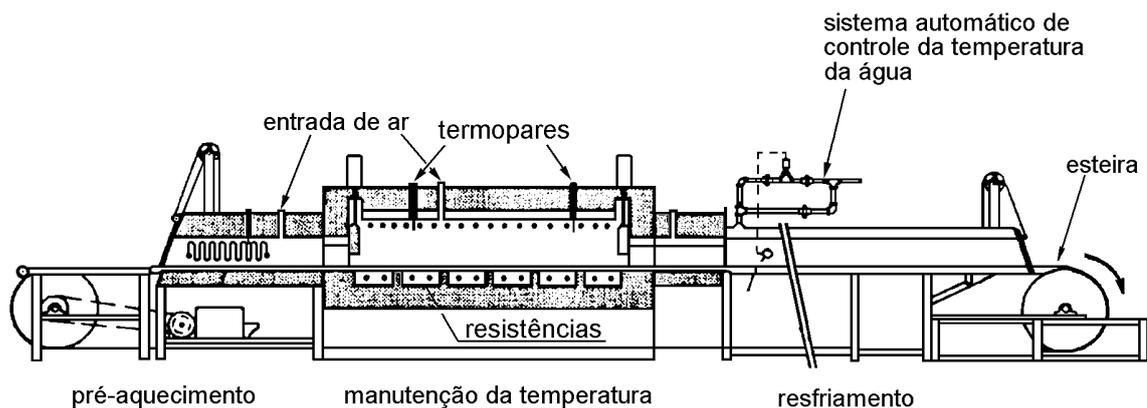
Pode-se afirmar que no primeiro estágio da etapa de sinterização, ocorre o aumento de pontos de contatos entre as partículas compactadas do metal, resultando assim em mudanças dimensionais, tendo uma contração volumétrica próximo de 40% de seu volume antes de

sinterizado ou 16% linearmente, podendo ser aumentado devido a temperatura do processo ou tempo de permanência no forno (TELECURSO 2000).

Em questão aos fornos utilizados, eles podem ser do tipo contínuo (esteira, empurrador, soleira de roletes) e do tipo intermitente (caixa, sino, tubo, mufla e alta frequência), sendo o tipo contínuo esteira o mais utilizado industrialmente para peças pequenas (CHIAVERINI, 2001).

Assim na figura 3 é possível ver o esquema do forno contínuo esteira, e suas principais zonas por onde os compactados passam para serem sinterizados.

Figura 3 – Esquema de forno de sinterização tipo esteira.



Fonte: (CHIAVERINI, 2001)

2.2 LIGAS Fe-Ni

Ligas metálicas que contenham um alto teor de níquel possuem uma ampla empregabilidade em diversos componentes mecânicos, como termopares, resistências elétricas, peças que exigem alta resistência à corrosão a temperaturas elevadas, entre outros (CALLISTER, 2016).

O níquel com alto teor de pureza possui elevada resistência à corrosão tanto que seu emprego é indicado para tanques de indústrias químicas, para produtos alcalinos ($\text{pH} > 7$); outra característica que justifica sua utilização é sua elevada ductilidade mesmo em temperaturas abaixo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, sua estrutura é cúbica de face centrada (CFC), sendo, esta, liga podendo ser conformada a quente ou a frio, a liga a base de ferro-níquel é tecnicamente conhecida como Permalloy, sendo descoberta em 1916, a liga possui excelentes propriedades magnéticas, quando uma corrente é induzida nesta liga a variação desta corrente é extremamente baixa na

saída demonstrando assim que a liga possui uma baixa perda desta; este tipo de liga aceita um alto teor de níquel adicionado, podendo ser no máximo de 80% (SILVA, 2010).

Na tabela 1 são apresentadas as ligas ferro-níquel mais utilizadas para projetos que envolvem propriedades magnéticas.

Tabela 1 – Ligas Fe-Ni moles magneticamente

		Composição química diretriz				
		% Fe	% Ni	% Si	% Mo	% Cu
NiFe37	PERMENORM 3601KS	base	37	-	-	-
NiFe50	PERMENORM 5000H2	base	50	-	-	-
NiFe75	MUMETALL	base	75	-	3,5	4,5
3060	TRAFOPERM N3	base	-	3,5	-	-

Fonte: (SILVA, 2010)

Ligas de ferro-níquel contendo 36% de níquel possui baixo coeficiente de dilatação térmica e é conhecido tecnicamente como Invar, sendo sua utilização na manufatura de elementos mecânicos de precisão, elementos para eletrônica e produção de válvulas (SILVA, 2010).

Ligas na faixa Fe-42% Ni a Fe-46% Ni possuem coeficiente de dilatação maior do que a com 36% de níquel, porém a faixa em que esta dilatação permanece inalterada é maior também; adicionando outros elementos de liga como o cobalto (Co), amplia-se o campo de temperaturas em que o componente pode atuar sem sofrer dilatação; ligas deste tipo são conhecidas como Kovar (SILVA, 2010).

Na tabela 2 veem-se as principais ligas de ferro-níquel com dilatação térmica controlada.

Tabela 2 – Ligas Fe-Ni com dilatação térmica controlada

	Composição química diretriz			
	% Fe	% Ni	% Cr	% Co
Ni SPAN C	base	42,0	5,50	-
ASTM F30-77	base	46,0	-	-
VALOVIT S11	base	51,0	1,0	-
KOVAR A	base	28,0	-	17,0

Fonte: (SILVA, 2010)

Ligas a base de ferro, níquel ou cobalto com elemento de liga o cromo são denominadas “superligas”, por possuírem baixo coeficiente de dilatação térmica e apresentarem excelente resistência mecânica e a corrosão a temperaturas superiores a 540 °C (SILVA, 2010).

O molibdênio e o tungstênio são empregados como elementos de ligas para que haja a produção das superligas endurecidas por solução sólida; e para que não haja a formação de carboneto de cromo no contorno de grão usa-se o nióbio e ou titânio (SILVA, 2010).

De acordo com as características que estas ligas apresentam, sua empregabilidade pode ser nos setores petroquímicos, como em tubulações, trocadores de calor, turbinas a gás e projetos que levam em consideração corrosão sob tensão (SILVA, 2010).

2.3 MATERIAIS CERÂMICOS

Materiais cerâmicos podem ser encontrados desde objetos domiciliares, como pisos, louças, pias, etc, até componentes estruturais em equipamentos de alta tecnologia, como proteções de cápsulas de retorno de foguetes espaciais.

Sendo geralmente constituídos de elementos metálicos e não metálicos (sendo na maioria óxidos, nitretos e carbetos), tendo sua rigidez mecânica compatível com muitos metais, porém outra característica desse material é sua fragilidade (apresentando alta suscetibilidade a fratura) e sua extrema dureza (CALLISTER, 2016).

2.3.1 Alumina

A alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3), é amplamente utilizada para a obtenção do alumínio metálico, mas também possui diversas outras aplicações, como: selos mecânicos, placas para fornos, abrasivos, isolantes elétricos, esferas para moagem entre muitos outros; devidos suas características de boa resistência a corrosão, alta dureza, isolante elétrico, boa estabilidade térmica, entre outros (CERTEC).

2.4 MICROSCOPIA CONVENCIONAL

O procedimento de microscopia convencional é realizado por emissão luz branca dentro do microscópio, quando esta luz reflete uma superfície plana de uma determinada amostra, revela fases localizadas em sua microestrutura (COLPAERT, 1959).

Mas para se analisar a microestrutura da amostra, é necessário seguir alguns passos, sendo basicamente 8, como: seleção da amostra a ser analisada, corte (dependendo de suas dimensões), pré lixamento (remover rebarbas), embutimento, lixamento, polimento, ataque químico, e por final a análise da microestrutura (NOGUEIRA, 2015).

2.4.1 Corte

O corte da amostra pode ser realizado através de serra de fita, serra de arco, torno mecânico, ou em equipamentos próprios do laboratório metalográfico, como a cut-off ou cortadeiras (COLPAERT, 1959).

2.4.2 Embutimento

O embutimento consiste em prender a amostra desejada (quando esta apresentada uma dimensão pequena) em um material polimérico de baixo ponto de fusão (baquelite ou resina transparente), este processo auxilia para que haja o perfeito posicionamento da amostra na lixadeira e na politriz e também para que a amostra não rasgue o tecido no polimento (NOGUEIRA, 2015).

2.4.3 Lixamento

Neste processo, são utilizadas lixas abrasivas de diferentes granulometrias, geralmente as mais utilizadas são de 180, 220, 330, 400, 600, 800, 1200, 1500 e 2000 mesh; deve-se trocar de lixa apenas quando todos os riscos do lixamento estiverem no mesmo sentido, e na troca deve-se virar a amostra aproximadamente 90° (COLPAERT, 1959).

2.4.4 Polimento

O polimento ocorre logo em seguida a última lixa (normalmente 2000 mesh), é realizado com um pano de feltro ao qual aplica-se pouquíssima quantidade de pasta abrasiva (alumina, óxido de cromo, pasta de diamante); para ferros fundidos comuns e aços, a alumina mais empregada é a de número 2, para aços de baixo teor de carbono e ligas macias, utiliza-se a de número 3; quando houver a necessidade de troca de material abrasivo para melhorar o polimento, deve-se seguir a mesma recomendação que no lixamento, além da troca do pano de polimento (COLPAERT, 1959).

2.4.5 Ataque químico

Segundo Mannheimer (2002) apud Nogueira (2015), o ataque químico trata-se de uma corrosão em pontos específicos na superfície da amostra com reagentes adequados para cada objetivo, sua função principal é delinear os contornos de grãos dos microconstituintes, diferenciar diversas fases existentes.

Para Colpaert (1959), o ataque é realizado com a imersão, aplicação ou esfregação de um reagente corrosivo em uma superfície plana e polida da amostra em questão e a concentração do reagente utilizado, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, natureza do próprio

material podem afetar a duração do ataque químico; mas na média a duração deste procedimento ocorre em torno de 5 a 15 segundos com a peça imersa.

2.5 MICRODUREZA

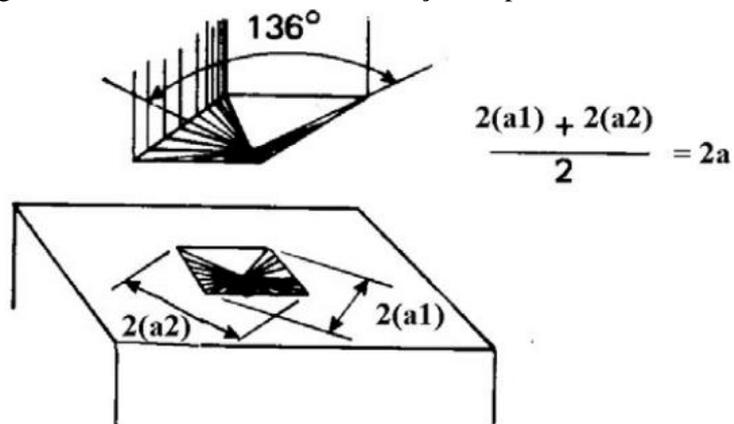
Segundo Larsson (1998) apud Dias (2004) o ensaio de microdureza Vickers é bastante empregado para caracterizar diversos materiais, como: metais, cerâmicas, polímeros, compósitos e camadas depositadas por tratamentos superficiais.

Para Callister (2016) o penetrador confeccionado em diamante industrial, possui angulação de 136° entre suas faces, sendo assim no formato de uma pirâmide de base quadrada; independente da carga aplicada (respeitando limites) ao valor obtido de dureza será sempre o mesmo.

Após o penetrador aplicar a indentação na superfície da amostra, a leitura da dureza é lida da seguinte maneira: mede-se uma diagonal da marca $2(a_1)$, e logo mede-se a segunda diagonal $2(a_2)$; soma-se as diagonais e subtrai por 2, assim se obtém o valor da área da indentação (SOUZA, 2000).

A figura 4 demonstra o cálculo realizado para verificar a área do losango marcado pelo penetrador de diamante.

Figura 4 – Cálculo da área da endentação do penetrador



Fonte: (SOUZA, 2000)

Segundo Souza (2000) para se obter o valor da dureza Vickers (HV) realiza-se o seguinte cálculo:

$$HV = \frac{2F \sin(136^\circ/2)}{(2a)^2} = 1,854 \frac{F}{(2a)^2}$$

Sendo: F (força aplicada em kgf) e d (área da endentação deixada pelo penetrador).

A partir dos resultados da dureza Vickers, pode-se ter um valor contínuo de 5 até 1000 kgf/mm²; como a marcação na superfície da amostra pequena usa-se um microscópio acoplado ao equipamento para se medir as diagonais com precisão (SOUZA, 2000).

Segundo Alves (2016) o ensaio possui muitas vantagens operacionais, sendo elas: a escala sem interrupções tendo valores na ordem acima de 100 HV (como acontece em ensaios como Rockwell e Brinell); pode ser realizado em peças já acabadas, pois não a inutilizam; precisão na medida (pois utiliza o microscópio acoplado ao equipamento).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados para este trabalho foram ferro reduzido em pó da fabricante Nox Lab Solutions; níquel em pó e alumina (Al₂O₃) fornecidas pelo professor José Vitor Cândido de Souza, ferro e o níquel e a alumina são os elementos de liga das amostras; as composições químicas do ferro está contida na tabela 3.

Tabela 3 – Composição química do ferro reduzido em pó

As%	Mn%	Zn%	Cu%	Fe%
0,00005	0,03	0,003	0,002	99,3

Fonte: Nox Lab Solutions

As etapas seguintes descritas serão para obtenção das amostras de Fe-Ni-Al₂O₃ e preparação das mesmas, para análise metalográfica, sendo: moagem e homogeneização, compactação, sinterização (para a obtenção das amostras), corte, embutimento, lixamento e polimento (para a preparação das amostras).

As etapas de obtenção das amostras para este trabalho ocorreram nos laboratórios do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) realizadas pelo professor Dr. José Vitor Cândido de Souza.

3.1 MOAGEM E HOMOGENEIZAÇÃO

A proporção utilizada para a moagem e homogeneização dos pós metálicos para a obtenção da liga foi de 70% de ferro reduzido em pó, 25% de níquel em pó e 5% de alumina (Al_2O_3) em pó, esta mistura foi recomendada pelo professor Dr. José Vitor; a moagem ocorreu por meio de um moinho de alta energia por cerca de 2 horas, sendo a moagem realizada a seco, pois se fosse via úmido poderia ocasionar oxidação da mistura, proporção volumétrica de esferas foi a mesma do material a ser moído.

Após moagem, a mistura foi desaglomerada em almofariz e peneirada em peneira 125 mesh.

3.2 COMPACTAÇÃO

A compactação ocorreu primeiramente com compactação uniaxial com uma carga de 500 kgf sob uma matriz com diâmetro de 10 mm, demonstrando assim uma pressão de 62,47 MPa, oito amostras foram submetidas a esta carga, e destas oito, quatro foram submetidas ainda a prensagem isostática de 350 MPa, que consiste em colocar as peças uniaxiais dentro de um molde flexível de borracha e este molde é colocado dentro de um vaso de pressão com fluido e aplica-se pressão sobre este fluido para que o molde seja prensado por igual em todas direções, enquanto que as outras amostras foram sinterizadas diretamente. Durante o processo de prensagem uniaxial foi adicionado 4% em massa de álcool polivinílico para favorecer o processo.

3.3 SINTERIZAÇÃO

A etapa de sinterização ocorreu em um forno sem controle de atmosfera (mufla), com taxa de aquecimento em $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, sendo a sinterização ocorrendo a $1350\text{ }^\circ\text{C}$ (LEMAITRE, 1997) por uma hora assim como no gráfico 1 e seu resfriamento ocorrendo de acordo com a inércia do forno. Assim como já observado em outras literaturas, lembrando que todas as amostras foram sinterizadas nas mesmas condições, para que somente a variação de compactação seja avaliada.

Gráfico 1 – Gráfico de sinterização das amostras



Fonte: Do Autor.

As amostras para serem sinterizadas foram colocadas em um cadinho de alumina com cama de pó na mesma composição das amostras, para que as amostras não sofressem tanto com a atmosfera não controlada do forno.

3.4 CORTE

Após a obtenção das amostras pelo processo de metalurgia de pó, foi necessário a preparação das mesmas para as futuras análises com o microscópio; o corte das amostras ocorreu nas cortadeiras com disco diamantado, localizada nas dependências da Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho (UNESP- Guaratinguetá).

O corte foi realizado longitudinalmente para verificar se houve ou não variação de densidade nos corpos de prova e se houve a criação da zona neutra (área com menor densidade).

3.5 EMBUTIMENTO

A finalidade do embutimento é facilitar o manuseio das amostras durante o processo de lixamento, polimento e ataque químico que ocorrem posteriormente; neste trabalho o embutimento realizado foi o a quente, no laboratório de metalografia da Fatec Pindamonhangaba, assim como na figura 6.

Figura 5 – Embutidora.



Fonte: Do Autor.

3.6 LIXAMENTO E POLIMENTO

O processo de lixamento tem por finalidade diminuir as irregularidades na superfície da amostra deixadas durante o processo de corte da cortadeira; as lixas são confeccionadas de materiais abrasivos depositados sobre papel.

Para a preparação das amostras embutidas foram utilizadas lixas com granulometria diferentes, sendo: 180, 220, 320, 400, 600, 1200 e 2000 mesh, sendo a lixa de 180 a primeira para remover irregulares do corte e garantir único sentido de lixamento, o mesmo foi realizado com as outras lixas movendo as amostras em 90° em relação a última lixa.

Foi utilizada a lixadeira de bancada da fabricante Arotec modelo Aropol 2V, assim como na figura 8, foi utilizado água constante para garantir que nenhuma partícula solta prejudicasse o lixamento.

Figura 6 – Lixadeira de bancada



Fonte: Do Autor.

A função do polimento é garantir uma superfície plana e polida da amostra em que se deseja analisar; o polimento ocorreu até que não houvesse mais riscos resultantes do processo de lixamento.

O equipamento utilizado para este processo foi um politriz circular da fabricante Arotec modelo Aropol 2V para pasta de diamante, assim como na figura 9.

Figura 7 – Politriz circular



Fonte: Do Autor.

Com pasta de diamante 3 e 1 micron, logo após seguida de polimento com alumina 3 microns.

3.7 ATAQUE QUÍMICO

O reagente utilizado para o ataque químico foi o Nital 3%, sendo na mistura uma proporção de 97% de álcool etílico e 3% de ácido nítrico.

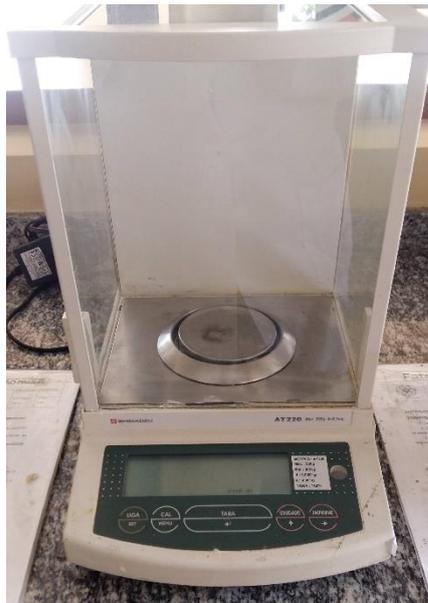
3.8 ANÁLISES

Como já citado anteriormente, algumas análises foram realizadas para verificar a diferença das amostras com compactação isostática e com somente uniaxial, as análises de densidade (antes da preparação metalográfica dos corpos de prova), microscopia convencional, microdureza e microscopia eletrônica de varredura (MEV) respectivamente.

3.8.1 Análise de densidade

O procedimento de análise de densidade ocorreu conforme princípio de Arquimedes, a análise ocorreu no laboratório de química da Fatec Pindamonhangaba. Primeiramente foram medidas as massas dos CDP's com isostática e sem isostática em uma balança analítica da marca Shimadzu modelo AY220 conforme figura 10, e depois com o auxílio de uma proveta graduada com água destilada foram medidos os volumes dos corpos de prova.

Figura 8 – Balança analítica Shimadzu



Fonte: Do Autor.

Com a medição das massas dos corpos de prova, obteve-se os dados contidos na tabela

4.

Tabela 4 – Massas dos corpos de prova sinterizados.

Massa dos CDP's (g)		
	Sem Isostática	Com Isostática
x1	2,6696	2,4204
x2	2,5753	2,5722
x3	2,6067	2,1188
x'	2,6172	2,3705

Fonte: Do Autor.

E com auxílio de uma proveta, foi medido o volume de cada amostra.

3.8.2 Análise de microdureza

O procedimento para a medição da microdureza das amostras ocorreu primeiramente com o as amostras já cortadas, embutidas, lixadas e polidas para se obter uma superfície mais plana, e o aparelho utilizado foi um microdurômetro da marca Mitutoyo, com carga de 1,0 kgf com aplicação da carga por 5 segundos, em cada amostra houve vinte indentações aleatórios para se calcular uma média, os valores obtidos estão contidos na tabela 5.

Tabela 5 – Valores de microdureza.

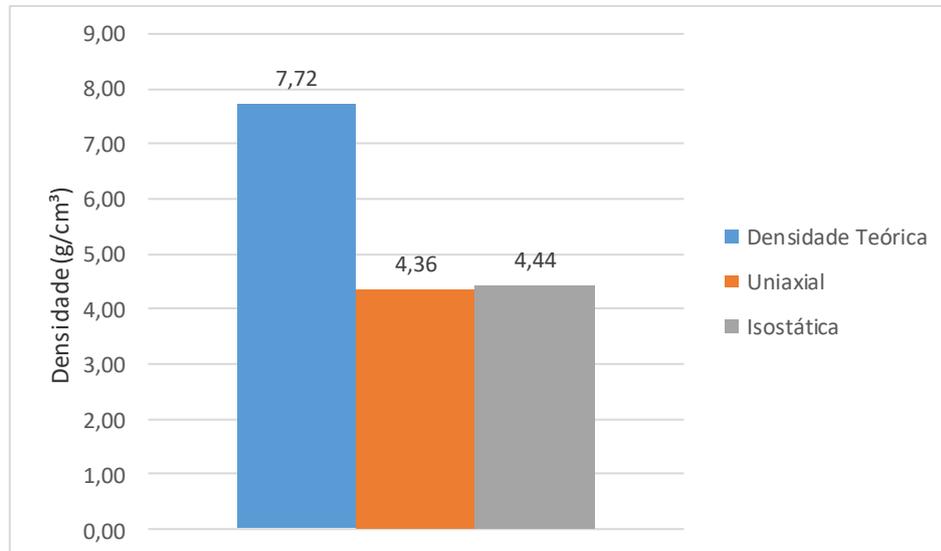
Amostragem de microdureza das amostras		
Pontos	Dureza Uniaxial (HV)	Dureza Isostática (HV)
1	72,3	106
2	103	193
3	216	252
4	219	283
5	282	299
6	305	340
7	312	351
8	332	395
9	362	397
10	377	398
11	393	403
12	393	408
13	408	419
14	423	423
15	480	431
16	482	434
17	486	467
18	512	474
19	526	536
20	547	585

Fonte: Do Autor.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 DENSIDADE

Gráfico 2 – Comparação de densidades



Fonte: Do Autor.

De acordo com o gráfico é evidente que as amostras compactadas isostaticamente possuem densidade ligeiramente maior (4,44 g/cm³) do que as amostras compactadas somente com uniaxial (4,36 g/cm³). Porém ambas possuem densidade muito inferior a densidade teórica calculada (aproximadamente 7,72 g/cm³), sendo um resultado já esperado devido a porosidade contida nas amostras.

Sendo que a densidade das amostras compactadas uniaxialmente representam 56,46% da densidade teórica e as amostras compactadas isostaticamente representam 57,50% da densidade teórica. Demonstrando assim que a compactação isostática apresenta maior eficiência com densidade mais homogênea que a compactação uniaxial (MORAIS, *et al* 2016).

4.2 MICRODUREZA

Com a microdureza obtida na tabela 5 e com o auxílio do software Excel, foi possível determinar a média e desvio padrão de cada amostra, sendo estes apresentados na tabela 6.

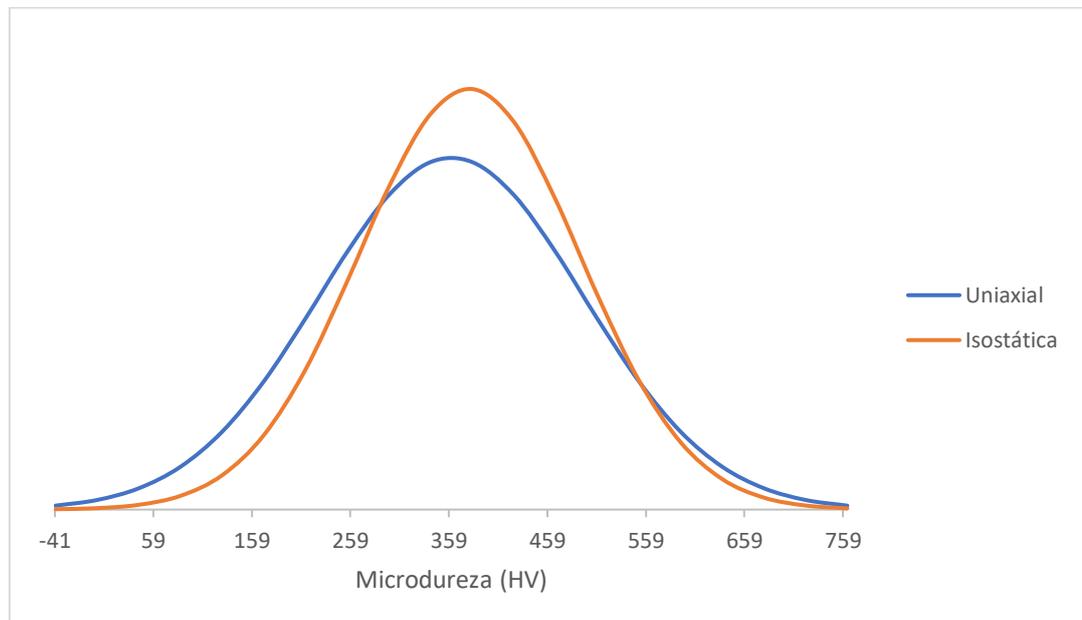
Tabela 6 – Porcentagem da uniformidade da microdureza das amostras

	Uniaxial	Isostática
$\mu \pm 1,0\sigma$	65%	75%
$\mu \pm 2,0\sigma$	100%	95%
$\mu \pm 3,0\sigma$	100%	100%

Fonte: Do Autor.

Com esses dados levantados foi possível plotar um gráfico curva de Gauss, assim como no gráfico 3.

Gráfico 3 –Curva de Gauss



Fonte: Do Autor.

De acordo com a tabela 6 e o gráfico 3, é evidente que a amostra compactada isostaticamente apresenta dureza maior que a amostra compactada somente pelo processo uniaxial, sendo em média 379,7 HV para a amostra isostática e 361,5 HV para a amostra compactada somente uniaxialmente. Porém é possível verificar também tanto na tabela 5 que em certos pontos a dureza da amostra prensada uniaxialmente apresenta dureza maior, isso conforme Chiaverini (2001) é a região onde os punções tocam nas amostras durante a compactação.

As medições de dureza da amostra foi de extrema complexidade, devido à grande parte da área superficial de análise das amostras apresentarem muitos poros e também pelo fato dos

materiais cerâmicos apresentarem fragilidade e serem altamente suscetíveis ao trincamento quando forçados com penetradores agudos como no caso do método Vickers (CALLISTER, 2016).

4.3 MICROSCOPIA CONVENCIONAL

4.3.1 Amostras compactadas uniaxialmente

Figura 9 – Microscopia da liga 70Fe-25Ni-5Al₂O₃ compactada uniaxialmente próximo a borda (superior) e próximo a linha central (inferior) do corpo de prova.



Fases vidradas e bolhas, característicos de materiais cerâmicos, como no caso a alumina (Al₂O₃) causou em várias partes das amostras.



Poros.

Fonte: Do Autor.

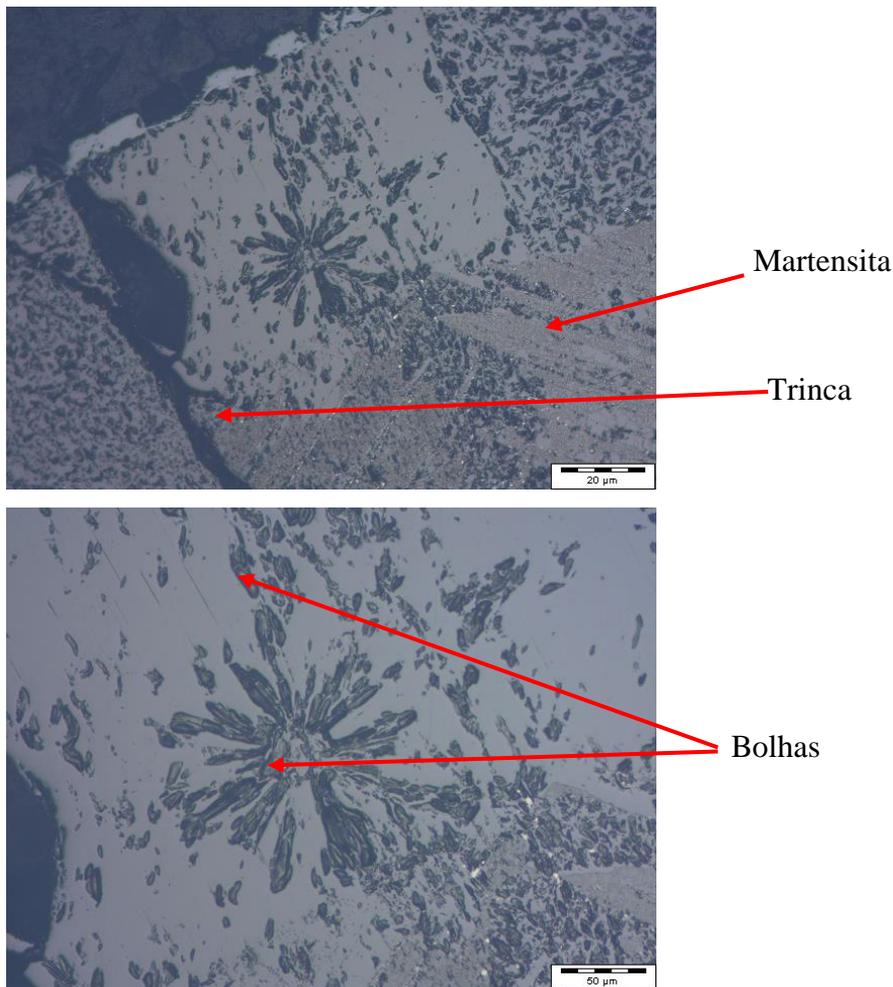
Nas imagens obtidas pelo processo de microscopia convencional é possível verificar fases vidradas e bolhas, sendo essas características de materiais cerâmicos (SILVA, s.d.).

Outra característica muito importante e visível em materiais sinterizados são os poros, sendo estes os principais causadores da densidade das amostras apresentarem densidade real muito inferior a densidade teórica da liga calculada.

Pela compactação uniaxial é possível visualizar na linha média da peça uma zona com baixo teor de densificação (tanto que aparece um grande vazio), conhecida como zona neutra (CHIAVERINI, 2001).

4.3.2 Amostras compactadas isostaticamente

Figura 10 - Microscopia da liga 70Fe-25Ni-5Al₂O₃ compactada isostaticamente.



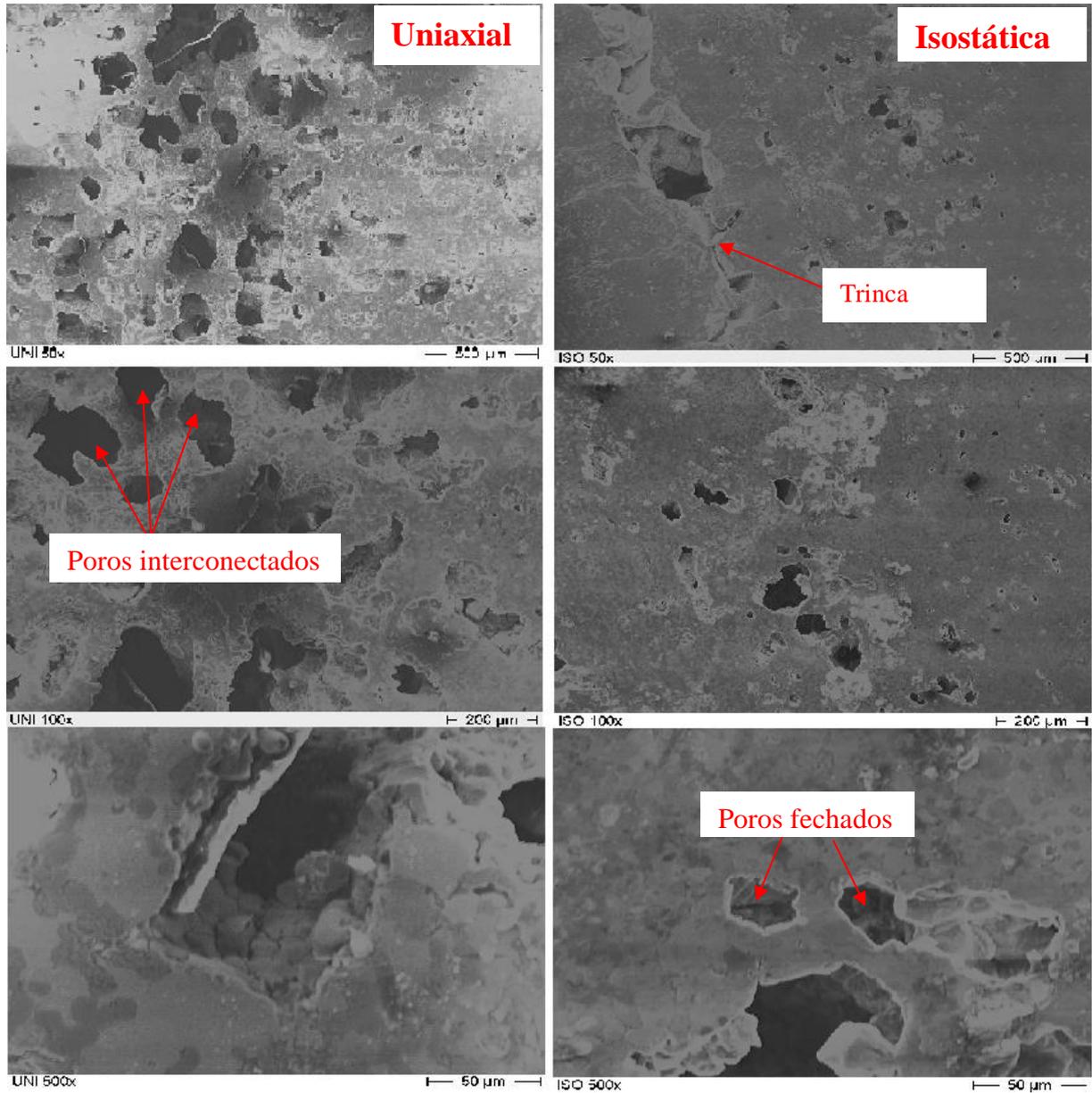
Fonte: Do Autor.

Além de poros, que são característicos de materiais sinterizados; bolhas e fases vidradas que são característicos de materiais cerâmicos, como no caso as amostras que são compostas de 5% de alumina (Al₂O₃) em sua composição, uma outra característica muito importante em materiais cerâmicos encontrada na amostra foram trincas próximas de fases martensíticas, evidenciando assim a baixa ductilidade das amostras.

Visualmente, as amostras apresentaram microestrutura predominantemente ferrítica-martensítica (NASCIMENTO, 1997).

4.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Figura 11 – MEV das amostras compactadas.



Fonte: Do Autor.

É possível verificar que a amostra compactada uniaxialmente apresenta maior volume de poros do que a amostra compactada isostaticamente, e visivelmente os poros da amostra isostática são menores também, enquanto os poros da amostra uniaxialmente aparentam ser interligados os da amostra isostática são mais fechados, com a figura 11 é possível também verificar que a superfície da amostra compactada isostaticamente apresenta maior homogeneidade.

5 CONCLUSÃO

Pela análise de densidade foi possível verificar uma ligeira diferença entre os processos de compactação, sendo que em média as amostras compactadas isostaticamente apresentaram 57,50% da densidade teórica da liga, enquanto as compactadas somente uniaxialmente apresentaram 56,46%, sendo estes resultados já esperados devido a peças sinterizadas apresentarem vazios internos (poros), diminuindo assim sua densidade.

Outra ligeira diferença também obtida foi na análise de microdureza, onde as amostras compactadas isostaticamente apresentaram em média 379,7 HV, enquanto que a dureza das amostras uniaxiais foi em média 361,5 HV. Embora houve ligeiras diferenças tanto na densidade como na microdureza das amostras, as amostras compactadas isostaticamente apresentaram maior uniforme estatisticamente, sendo que na casa de $1,0\sigma$ apresentou 75%, contra 65% das amostras uniaxiais. Pode-se inferir que a alumina foi uma grande causadora do aumento da dureza das amostras, essa dureza também foi evidenciada pela certa resistência do material em ser lixado durante a preparação metalográfica. E como demonstrado em literaturas anteriores, materiais cerâmicos apresentam grande dureza e fragilidade proporcional, como demonstrado nas figuras 11 e 12 com as trincas.

Com as análises microscópicas óptica e eletrônica de varredura, foi possível observar maiores diferenças entre as compactações uniaxial e isostática sendo observados os poros resultantes de cada uma, sendo que a compactação isostática permite que os poros sejam menores e tendem a ser mais fechados, assim permitindo uma superfície mais homogênea das amostras.

As amostras compactadas isostaticamente pelo fato de terem sido “bi-compactadas” com uma pressão na casa de 5,6 vezes maior que as amostras compactadas uniaxialmente, deveriam teoricamente apresentar valores maiores de densidade e dureza, porém com os valores obtidos é possível explicar que é mais viável produzir peças somente pela compactação uniaxial, evitando desperdício de tempo e maquinário.

Há efetivamente uma relação direta entre a pressão adotada de compactação com as propriedades mecânicas do material, porém existe uma tendência dessas propriedades se estabilizarem, ou seja, mesmo aplicando-se mais pressão aos corpos de prova, suas propriedades serão praticamente as mesmas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, V. H. C. *et al.* **Efeito da temperatura de sinterização nas ligas Fe-30Ni-2Mo e Fe-30Ni-1Mo obtidas por metalurgia do pó.** Artigo Técnico. In: Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais. Natal. 2016.
- BOICKO, A. L. **Estudo da união de componentes de ligas ferrosas por sinterização.** Dissertação. Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2011.
- BRITO, F. I. G.; MEDEIROS, K. F.; LOURENÇO, J. M. **Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó.** Artigo Técnico. Centro Federal de Educação Tecnológica. Natal. 2007.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução.** 9ª ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016.
- CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do pó.** 4ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. pg. 10 – 19.
- COLPAERT, H. Micrografia. In: COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1959.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. Considerações gerais. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparações de amostras.** 1ª ed. Porto Alegre: Edipucrs: 2007. pg. 9 – 10.
- DIAS, A. M. S. **Análise numérica do processo de fratura no ensaio de indentação vickers em um uma liga de carboneto de tungstênio com cobalto.** Tese. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2004.
- FILHO, E. S. J. **Processamento, usinagem e desgaste de ligas sinterizadas para aplicações automotivas.** Tese. Curso de Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais, IPEN. São Paulo. 2006.
- FILHO, F. A.; *et al.* **Metalurgia do pó empregada na fabricação de ferramentas de aço rápido.** Artigo. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo. 2000.

LEMAITRE, J.; *et al.* **Synthesis, sintering and expansion of $\text{Al}_{0.8}\text{Mg}_{0.6}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_5$: a low-thermal-expansion material resistant to thermal decomposition.** Artigo Técnico. In: Journal of materials science 32. 1997.

LOBO, C. J. S. **Estudo das propriedades mecânicas de ligas Fe-Ni e Fe-Ni-Mo processadas por metalurgia do pó.** Tese. Curso de Engenharia e Ciências dos Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2014.

MORAIS, M. M.; *et al.* **Modelagem da densificação de esferas cerâmicas verdes prensadas isostaticamente.** Artigo. In: 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Águas de Lindóia. 2016.

MOURA, R. S. C.; CORRÊA, A. Z. A. **Comparação de compressão isostática e compressão uniaxial na obtenção da liga NiTi por metalurgia do pó.** TCC. Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. 2015.

NASCIMENTO, Rubens M. de. **Uniões $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ e Fe-Ni-Co/ Al_2O_3 por brasagem com metal ativo.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1997.

NETO, João B. R. *et al.* **Produção e caracterização de uma liga Fe-Ni obtida por processamento coloidal aquoso e reação de estado sólido.** Artigo técnico. In: Revista Matéria. 2016.

NOGUEIRA, L. R. **Estudo de reagentes para revelação microestrutural da liga inconel 625.** Monografia. Fatec Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2015.

PEREIRA, L. A. T. **Desenvolvimento de processos de reciclagem de cavacos de zircaloy via refusão em forno elétrico a arco e metalurgia do pó.** Tese. Curso de Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais, IPEN. São Paulo. 2014.

SANTOS, C. N. **Aspectos cristalográficos da transformação martensítica de uma liga Fe-27%Ni.** Tese. Curso de Doutorado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2008.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços ferramenta, inoxidáveis e ligas especiais.** In: _____. **Aços e Ligas Especiais.** 3ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010. Cap 7. Pg 363-470.

SILVA, Arlindo. **Materiais cerâmicos.** Slide (Aula). [s.l.]. Disponível em: <professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17341/.../Cerâmicas.pdf>. Acesso em: 03/05/2017.

SOARES, J.P.P. *et al.* **Efeito da variação de pressão na etapa de compactação da liga FE-NI-MO no processo da metalurgia do pó.** In: Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais. Natal. 2016.

SOUZA, S. A. Dureza Vickers. In: _____. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos.** 5ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

SENAI. **Processos de fabricação: aula 65.** Vídeo. São Paulo [s.d.]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=T1K_KJICf2w&t=479>. Acesso em: 30/06/2017.

VLACK, L. H. V. Ferro fundido, concreto, madeira e conjugados. In: _____. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais.** 4ª ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984.