



AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS APLICADO A PEÇAS DE FE3%SI OBTIDAS PELO PROCESSO DE MIM

Martins, V. ¹
Tavares, A. T. ²
Wermuth, D. P. ³
Braz, J. ⁴
Wirti, S. G. ⁵
Schaeffer, L. ⁶

Contribuição técnica para apresentação ao 4ª Conferência Internacional de Metalurgia do pó - Brasil/RS, 22 a 24 de Outubro de 2013, Porto Alegre, RS, Brazil.

¹Professor do Instituto Federal Sul rio-grandense IFSul – Campus Sapucaia do Sul. Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. viniciushiper@yahoo.com

²Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. andre.tavares@ufrgs.br

³Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. diego.wermuth@ufrgs.br

⁴Gerente Industrial da Polimetal Metalurgia e Plásticos LTDA. M.Sc. Eng. Metalúrgico. Laboratório de Metalurgia Física (Lamef). Depto. de Metalurgia, UFRG, Porto Alegre, RS, Brasil. jorge.brazf@taurus.com.br

⁵Acadêmica do curso de Engenharia de Energias, vinculado ao Departamento de Metalurgia da UFRGS/LdTM. Porto Alegre, RS, Brasil. sara.wirti@ufrgs.br

⁶Professor Dr.-Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. schaefer@ufrgs.br

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo

Os materiais magnéticos moles à base de ferro com silício (0,3 - 6,0 por cento em peso) são ligas de fácil conformação e processamento. As perdas de energia durante um ciclo de magnetização são baixas e a indução magnética superior. Esse tipo de material é empregado na produção de geradores, transformadores, motores elétricos. O emprego desse material a micro componentes exige um melhor estudo de meios de obtenção, sendo um dos meios de obtenção que se destaca atualmente por possibilitar formas complexas e alta precisão dimensional é o processo injeção de pós metálicos. O presente estudo busca estudar as propriedades físicas e mecânicas de uma carga injetável Fe3%Si e avaliar a densidade a verde e a do sinterizado através do método de Arquimedes. E validade a curva de sinterização através do ensaio de DSC/TGA. Apresentar as propriedades mecânicas de dureza, microdureza e ensaio de tração.

Palavras-chave: Carga injetável Fe3%Si ; Propriedade físicas e mecânicas; Injeção de pós Metálicos.



EVALUATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF APPLIED PARTS FE3% PROCESS IS OBTAINED BY MIM

Abstract

The soft magnetic materials based on iron with silicon (0.3 to 6.0 weight percent) alloys are easy forming and processing. Energy losses during a cycle of magnetization and magnetic induction are low top This type of material is used in the production of generators, transformers, electric motors. The use of this material requires better micro components consider means of obtaining, as a means of obtaining that stands today by enabling complex shapes and high dimensional accuracy is the powder injection molding process. The present study aims to study the physical and mechanical properties of an Fe3% Si feedstock and to evaluate the density of the green and sintered by the method of Archimedes. And the validity sintering curve by testing DSC / TGA. Presenting the mechanical properties of microhardness, hardness and tensile testing.

Key words: Feedstock Fe3% Si; physical and mechanical property; Metal Injection molding.

1 INTRODUÇÃO

O Ferromagnetismo é o fenômeno onde materiais metálicos possuem momento magnético na ausência de um campo externo, como o Ferro α (CCC), Níquel, Cobalto e o Gadolínio. Os materiais ferromagnetismo podem exibir valores de susceptibilidade magnética tão alta como 10^6 , porém, estes possuem uma temperatura crítica, chamada de temperatura de Curie (T_c), que acima desta perdem o fenômeno ferromagnetismo e tornam-se paramagnéticos. A Equação 1 exibe a relação entre a densidade de fluxo magnético e a magnetização (M) para um material ferromagnético (1, 2,3).

$$B = \mu_0 M \quad \text{Eq (1)}$$

A Magnetização de um corpo é uma medida de seu momento magnético por uma unidade de volume. A magnetização de saturação é o aumento máximo do valor de magnetização (4, 5). A Figura 1 exibe algumas curvas de magnetização.

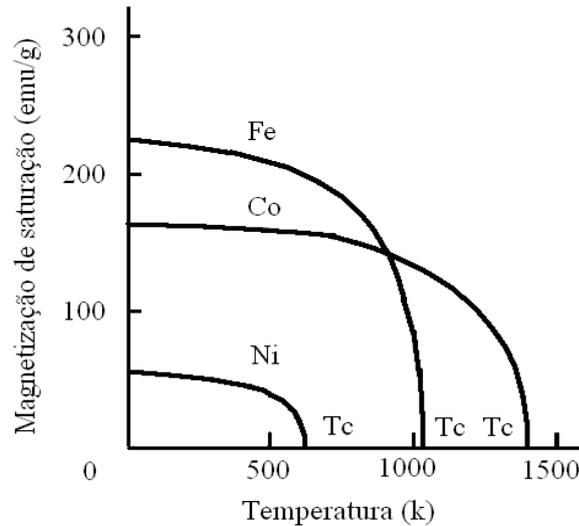


Figura 1: Magnetização de saturação X Temperatura do FE, Co, Ni (6).

O silício possibilita eliminar o carbono, como também, o oxigênio de do aço, sendo assim, consegue-se aumentar a permeabilidade inicial, a diminuição da força coercitiva, como também, a diminuição das perdas por histerese e por correntes de Foucault. Possui propriedades isolantes e sendo adicionado ao ferro para formar uma liga consegue-se um material com adequada resistência elétrica, por estas razões citadas, as chapas constituintes de máquinas elétricas são de ferro-silício, (7). A Figura 2A exibe o diagrama de fase do ferro-silício completo e a Figura 2B apresenta o diagrama de fase simplificado, que interessa a este trabalho.

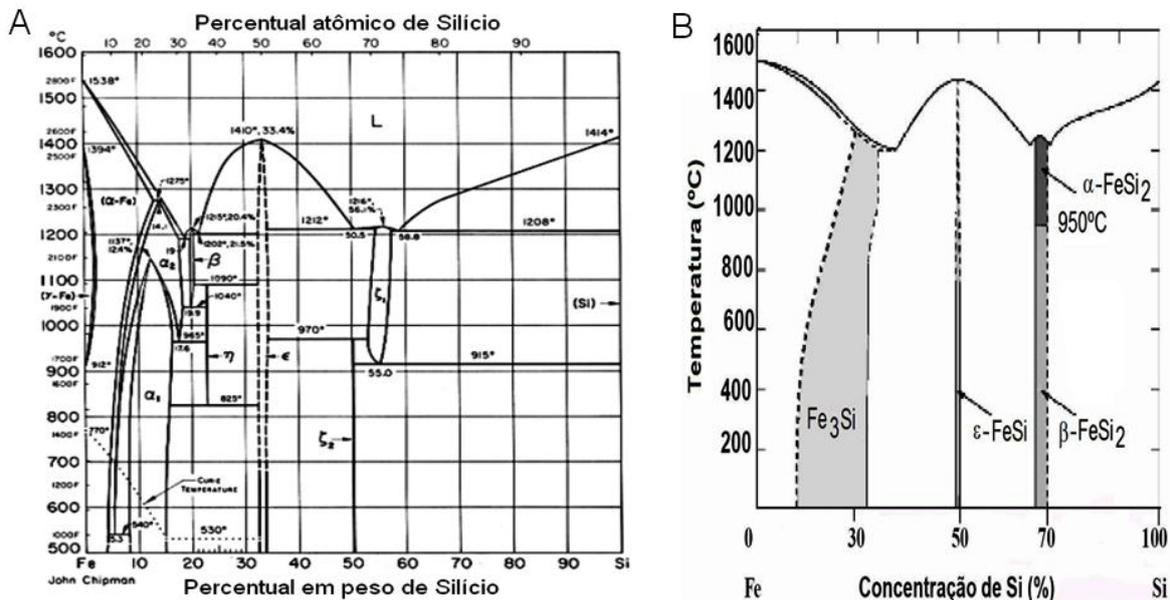


Figura 2: Diagrama de Fase Ferro - Silício (8), Adaptado (9).

A Figura 2B mostra a fase Fe_3Si , metálica e ferromagnética que pertence ao grupo espacial Fm-3m, a fase $\epsilon-FeSi$ é semicondutora e quase ferromagnética, a fase semicondutora $\beta-FeSi_2$ e a fase metálica $\alpha-FeSi_2$ são paramagnética com estrutura tetragonal (9). As ligas ferro-silício são empregadas em motores fracionários de baixo custo e em peças polares e outros circuitos magnéticos de alta

permeabilidade (10), Também são utilizadas em motores e geradores de melhor qualidade, de média e de alta eficiência e tamanho médio (11).

Além disso, estas ligas são utilizadas em transformadores de todos os tamanhos. O transformador moderno é basicamente o dispositivo de Michael Faraday proposto em 1831 (12). A empresa Westinghouse Electric Corp fundada em 1868 fabrica transformador de alta eficiência para redes de distribuição, desde o nascimento da geração de energia elétrica de corrente alternada (13).

A empresa Alstom lidera o mercado brasileiro na geração e transmissão com os transformadores para instrumentos e reatores numa ampla gama de equipamentos de 69 a 800kV em corrente contínua e até 1200kV em corrente alternada, mesmos estes sendo enormes a matéria prima são chapas de Ferro-silício (14). A Tabela 4 apresenta os distintos teores de silício utilizados, que podem variar de 0,25 a 4,75%, assim como também suas características (15).

Tabela 4: Propriedades físicas e magnéticas de chapas Fe-Si (15).

Teor aproximado de Silício	Tipo ou Marca	Perda do Nucleo (W/Kg em 60 ciclos)	Resistividade e ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Limite de resistência à tração (Kgf/mm ²)	Alongamento em 50,8mm (%)
0,25-0,30	Campo	5,1	28	-	-
0,50-0,60	Armadura	3,4	28	31,0	25
1,25-1,50	Elétrico	3,7	44	35,0	22
2,50-2,75	Motor	2,5	44	47,5	14
2,75-3,25	Dínamo	2,1	50		-
3,25-3,50	Hipersil	2,1	50	49,0	12
3,60-4,00	Transformador 72	1,58	52	56,0	8
4,00-4,25	Transformador 65	1,43	58	50,5	6
4,25-4,50	Transformador 58	1,27	60	53,0	5
4,50-4,75	Transformador 52	1,15	65	49,0	2

Fonte: Adaptado de CHIAVERINI, V. 1986

O percentual de 3% de silício produz uma resistividade de aproximadamente $0,50 \mu\Omega\cdot\text{m}$. Maiores teores de Silício aumentam ainda mais a resistividade, porém, reduzem a compressibilidade dos pós da liga ferrosa, tornam o material extremamente frágil e também diminuem a indução magnética. A sinterização do Fe-Si acontece inteiramente na fase α (ferrita), desde que o percentual de silício seja de até 2,11%, que gera um tamanho de grão grande ajudando a promover uma baixa força coerciva e alta permeabilidade. Com percentuais de até 20% as propriedades magnéticas são melhoradas utilizando-se processos de altíssima densificação. Com baixa coercitividade e alta resistividade, o ferro-silício é adequado para circuitos excitados por correntes alternadas ou pulsadas com frequências que variam de centenas a vários milhares de Hertz (16). Há trabalhos desenvolvidos que utilizam estas ligas no núcleo para fabricarem compósitos magnéticos macios com (SMC - *soft magnetic composite*) coberto por camada fina isolante eletricamente (17).

As ligas Ferro/Silício contêm tipicamente de 1,5% a 3,0% de Si em massa, devido ao fato do Si não ser pré-ligado ao ferro na mesma proporção para evitar a perda de compressibilidade. Uma liga especial de Fe pré-ligado com Si é sinterizada a 1260°C em atmosfera de H₂ para atingir a difusão do Si. A liga Fe-Si sinterizada responde melhor do que o Fe-P sinterizado em moderadas frequências (18).

O ferro puro possui excelente magnetização de saturação, porém a adição de Silício diminui um pouco a magnetização de saturação, mas reduz a anisotropia magnetocristalina e a magnetostricção¹, e aumenta consideravelmente a resistividade elétrica do material magnético (9). A Figura 11 mostra a curva de histerese do ferro puro e da liga Ferro-Silício.

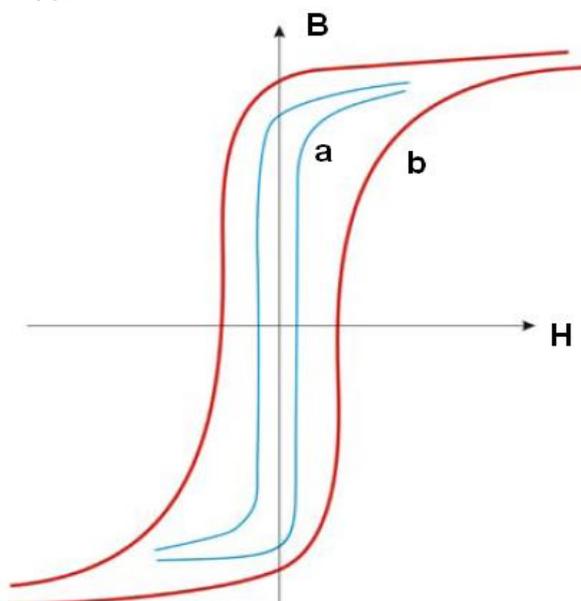


Figura 11: Curva de histerese para Fe puro (b) e Fe3%Si (a) (9).

O processo de moldagem na metalurgia do pó funciona a partir de uma matéria-prima homogênea, com pós finos é produzida através da mistura com um agente aglutinante termoplástico. Este ligante serve para combinar um processo de fabricação, que é a capacidade de moldar a partir de materiais poliméricos com a tecnologia de sinterização do pó também bem estabelecida (19). A moldagem de pós por injeção está dividida em dois grandes grupos que são a moldagem de cerâmicas por injeção (Ceramic Injection Moulding – CIM) (20) e a moldagem de pós metálicos por injeção (Metal Injection Moulding – MIM) (21).

Este processo permite injetar diversos metais como ferro e as ligas ferrosas, itânio e suas ligas (22), (23), Níquel e suas ligas (24), aço inoxidável (24), (25), materiais magnéticos (26) e até metais refratário com W e suas ligas (27). Desde o início de do processo MIM a geração total de patentes ultrapassou 300, até o ano de 2000, mas nos últimos anos a taxa diminuiu e hoje existem cerca de 200 patentes ativas no momento. As estimativas de custos, capacidade e fatores competitivos se mantêm em equilíbrio, mas as expectativas do MIM vão dobrar mais uma vez e chegar a US\$ 2 bilhões em vendas anuais até 2017.

O material é injetado em um molde com dimensões dando forma ao material plastificado, solidificando o material e fazendo esse ganhar resistência. Após ele

¹ **Magnetostricção** é a deformação de estruturas cristalinas devido à aplicação de campos magnéticos

solidificar ele é extraído ganhando o nome de peça a verde, que é levada para uma extração química, onde parte do ligante é retirada, em seguida a mesma é levada para um forno sendo aquecida para retirada do ligante restante e recebe o nome de peça marrom. A peça marrom é levada novamente ao forno para ser sintetizada ganhando a densidade final e suas características (6). A Figura 1 apresenta esse fluxo produtivo:

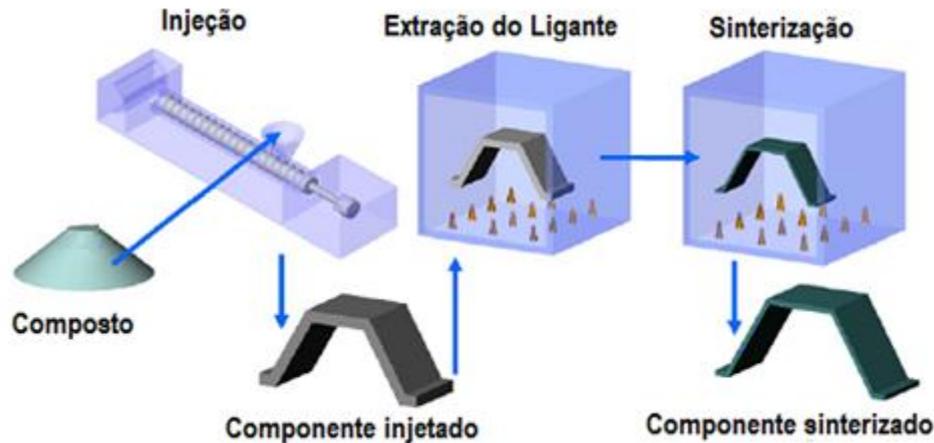


Figura 1 - Esquema do processo de injeção de pós metálicos. (adaptado da ref. 7).

O Objetivo deste trabalho é a caracterização de peças injetadas de Fe-3%Si através do processo de moldagem de pós metálicos por injeção de uma carga comercial para aplicação a motores.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As amostras foram injetadas com cargas comercialmente pela OMG, em uma injetora ARBURG ALLROUNDER 170 S 125-30, que foram então encaminhadas para a medição de volume, através do princípio de Arquimedes juntamente com a massa da amostra. Após a medição, as peças foram encaminhadas ao processo de sinterização, onde primeiramente foram expostas a extração catalítica pelo ácido oxálico. Após a extração química as amostras marrons foram sinterizadas no forno ELNIK 3009 com atmosfera de Nitrogênio, com uma taxa de aquecimento de 6°C/min. até a temperatura 600°C, onde se manteve a temperatura por uma hora com o intuito de retirar possíveis vestígios da carga injetável (*binder*) que possa não ter sido extraído cataliticamente. Após o patamar térmico para extração continuou-se a aquecer as amostras com uma rampa de aquecimento de 7°C/min. até que a temperatura do forno atingisse 1260°C, mantendo-a durante uma hora para realização da sinterização e em seguida desligou-se as resistências para que fosse feito o resfriamento até a temperatura ambiente das amostras dentro do forno.

Ao término da sinterização as peças foram submetidas novamente a medição do seu volume para constatar-se a contração volumétrica em relação à peça verde. E foram realizados os ensaios metalográficos para a análise microestrutural no microscópio OLYMPUS GX51. Em seguida realizou-se o ensaio de Dureza Rockwell B nas amostras utilizando o equipamento FORTEL MRS(EXP).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de conhecer a morfologia do pó da carga injetável comercial realizou-se a micrografia do *pellet* da mesma. O Tamanho da partícula ficou evidente juntamente com a distribuição do pó sobre a massa polimérica em menor numero. A Figura 2 apresenta o resultado da micrografia realizada no microscópio eletrônico de varredura da mistura de Ferro-3% Silício.

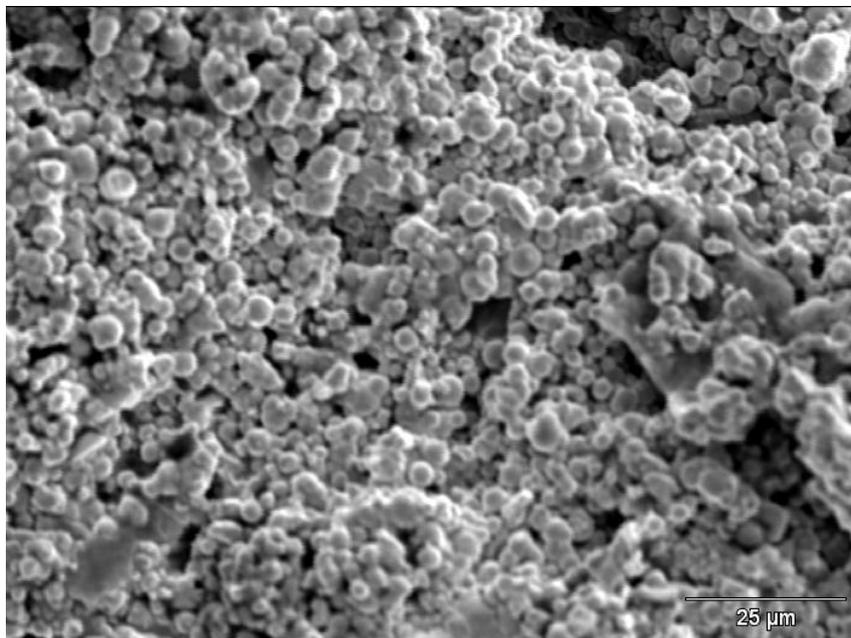


Figura 2 – Micrografia da carga injetável de Fe-3Si.

Observa-se na Figura 2, que o tamanho da partícula entre 2 e 7 μm e está bem distribuída sobre o polímero. A realização de DSC permite observar a mudança de fase dos polímeros que contem a carga injetável com Ferro-Silício e o TGA auxilia na verificação da degradação dos polímeros pela perda de massa. Os dois ensaios ajudam a determinar a temperatura de extração térmica do material injetável.

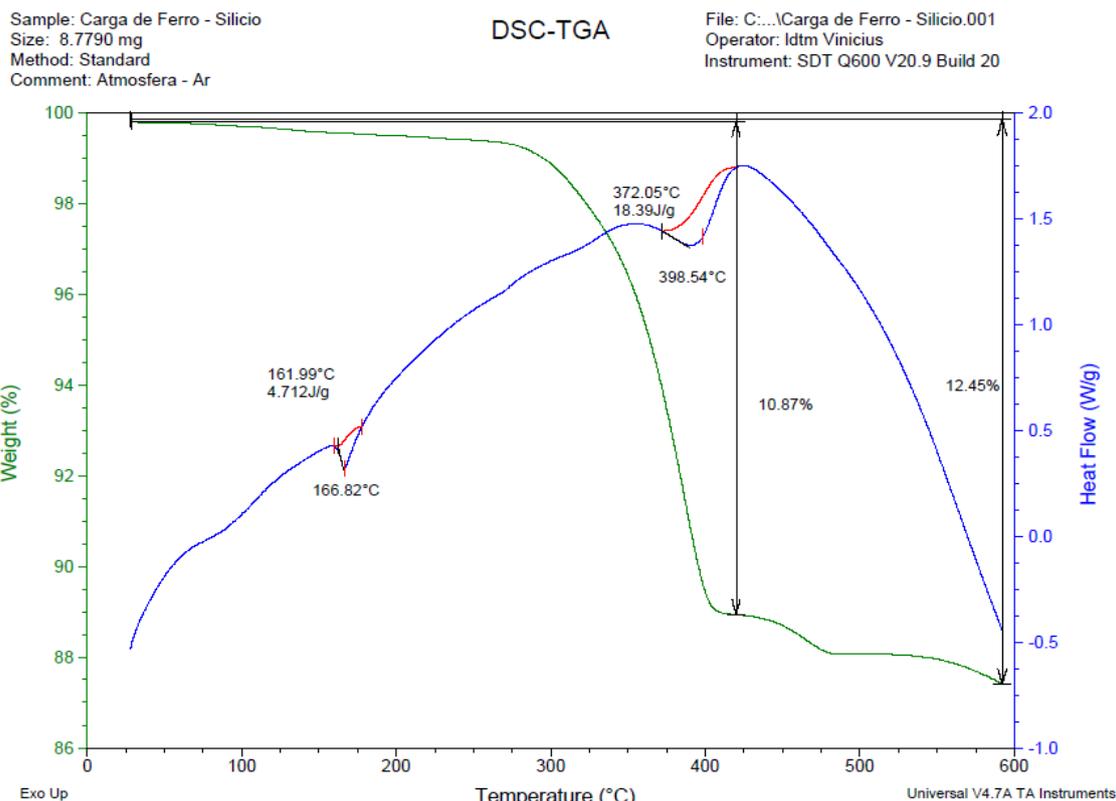


Figura 3 – Ensaio de DSC e TGA da carga injetável.

Observa-se na Figura 3 no ponto 166,82°C há uma fusão de um dos ligantes da composição da carga injetável. A temperatura de 398,54°C é a fusão do polímero estrutural. As amostras foram injetadas em diversas geometrias para cada tipo de ensaio. A Tabela 1 apresenta os dados para peças para ensaio de tração.

Tabela 1. Peça para ensaio de tração injetada

Amostra	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
T I	19,309	3,95	4,89	3,91	107,67	3,96
T II	19,322	3,96	4,88	3,91	107,70	3,94
T III	19,371	3,95	4,90	3,92	107,69	3,98

As amostras injetadas da peça para ensaio de tração foi indicado pela letra “T”. Observa-se que a estabilidade de valores como massa e volume em diversas amostras, significando que o processo permite alta repetibilidade do processo. A Tabela 2 apresenta os dados para anéis para determinar as propriedades magnéticas.

Tabela 2. Anéis injetados para determinação de propriedades magnéticas

Amostra	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Altura (mm)	Diâmetro ext. (mm)	Diâmetro int.(mm)
A I	4,903	1,13	4,34	3,48	41,48	34,72
A II	4,865	1,12	4,34	3,48	41,41	34,70
A III	4,779	1,12	4,27	3,49	41,45	34,71

As amostras injetadas da peça para anéis foram indicados pela letra “A”. A densidade das amostras toroidais é menor que a densidade dos corpos de tração injetados. A Tabela 3 apresenta os dados para peças para barras de flexão.

Tabela 3. Barras injetadas para ensaio de Flexão

Amostra	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
B I	18,616	3,82	4,87	4,96	79,14	9,96
B II	18,683	3,81	4,90	4,96	79,12	9,96
B III	18,697	3,82	4,89	4,94	79,18	9,98

As amostras injetadas da peça de barras de flexão foram indicadas pela letra “B”. Nas barras de flexão, a densidade ficou próxima de 4,90 g/cm³ semelhante ao valor da barra de tração. Foi realizada a extração química e térmica e posteriormente a sinterização. A Tabela 4 apresenta os dados para peças para ensaio de tração sinterizada.

Tabela 4. Peça para ensaio de tração injetada e sinterizada

Amostra	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
T I	16,392	2,16	7,60	3,19	88,96	3,26
T II	16,471	2,16	7,61	3,15	88,86	3,28
T III	16,431	2,16	7,59	3,16	88,60	3,29

A Tabela 4 apresenta as peças com um densidade média de 7,60 g/cm³. A Tabela 5 apresenta os dados para anéis sinterizados para determinar as propriedades magnéticas.

Tabela 5. Anéis injetados e sinterizadas para determinação de propriedades magnéticas.

Amostra	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Altura (mm)	Diâmetro ext. (mm)	Diâmetro int. (mm)
A I	4,854	0,63	7,69	2,89	34,49	28,72
A II	4,855	0,64	7,67	2,91	34,47	28,71
A III	4,750	0,63	7,70	2,97	34,55	28,63

A densidade das amostras toroidais foi de 7,68 g/cm³ em média. A Tabela 6 apresenta os dados para peças para barras de flexão sinterizadas.

Tabela 6. Barras injetadas e sinterizadas para ensaio de Flexão.

Amostra	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
B I	16,422	2,16	7,61	4,12	65,54	8,32
B II	16,420	2,15	7,62	4,11	65,52	8,28
B III	16,423	2,16	7,60	4,11	65,54	8,29

A Tabela 6 apresenta as peças com uma densidade média de 7,60 g/cm³ das barras de flexão sinterizadas. Sumarizando os dados das Tabelas apresentadas e montando na Tabela 7, nota-se que a contração volumétrica na média de 43,84.

Tabela 7. Dados das peças injetadas e sinterizadas

Amostra	Volume a verde (cm ³)	Densidade a verde (g/cm ³)	Volume sinterizado (cm ³)	Densidade sinterizado (g/cm ³)	Contração volumétrica (%)
T I	3,95	4,89 ± 0,1	2,16	7,60 ± 0,05	43,48
T II	3,96	4,88 ± 0,1	2,16	7,61 ± 0,05	43,46
T III	3,95	4,90 ± 0,1	2,16	7,59 ± 0,05	43,43
A I	1,13	4,34 ± 0,1	0,63	7,69 ± 0,05	44,16
A II	1,12	4,34 ± 0,1	0,64	7,67 ± 0,05	42,77
A III	1,12	4,27 ± 0,1	0,63	7,70 ± 0,05	41,34
B I	3,82	4,87 ± 0,1	2,16	7,61 ± 0,05	45,39
B II	3,81	4,90 ± 0,1	2,15	7,62 ± 0,05	45,35
B III	3,82	4,89 ± 0,1	2,16	7,60 ± 0,05	45,22

A Tabela 7 sumariza os resultados da densidade a verde e do sinterizado apresentando as contrações volumétricas das amostras na diversas geometrias. Foram realizadas metalografias das amostras sinterizadas para determinar porosidade e o tamanho de grão. A Figura 4 exibe a metalografia da 3ª amostra de da barra de tração TI.

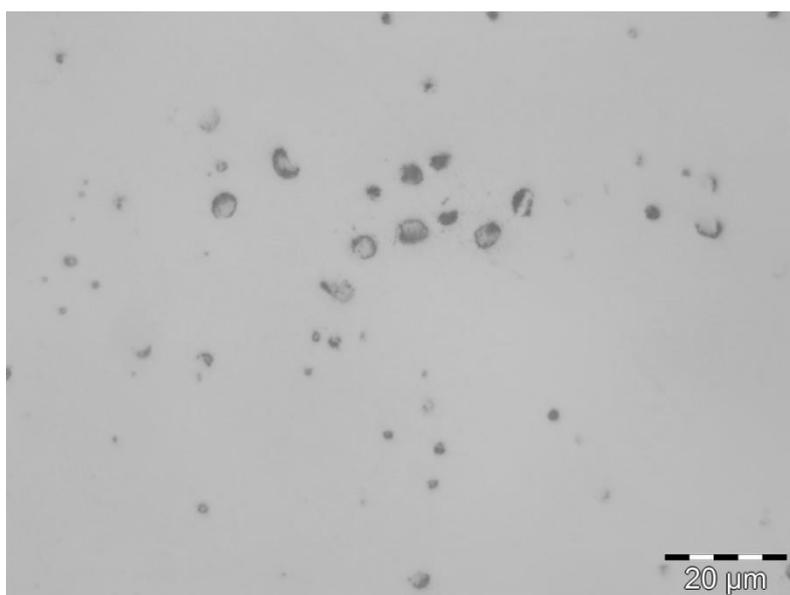


Figura 4 – Metalografia das amostras de Fe-3Si para visualização da porosidade.

Nota-se na Figura 4 que houve pouca porosidade confirmando a altíssima densidade do sinterizado através da metalografia. Foi realizado o ataque com Nital das amostras de Fe-3% de silício. A Figura 5 exibe a metalografia da 3ª amostra de da barra de tração TI atacada com Nital.

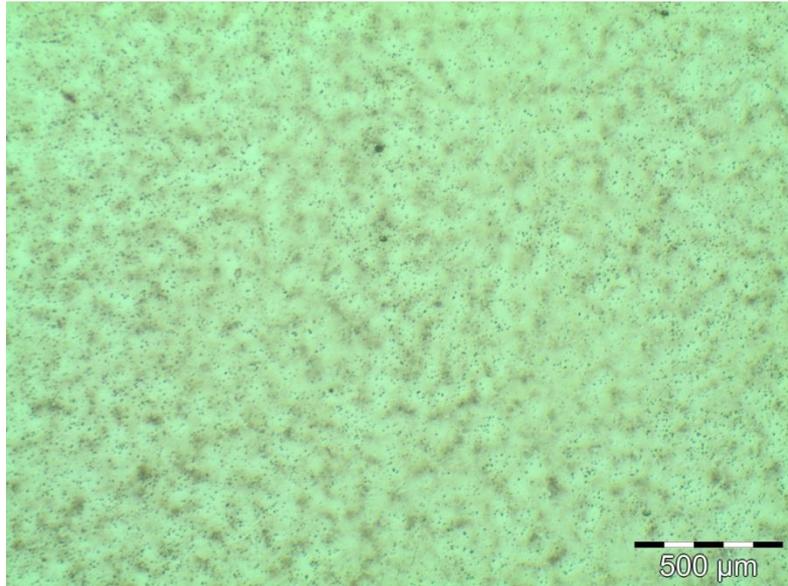


Figura 5 – Metalografia das amostras de Fe-3Si atacada com Nital (100X).

Após o ataque com Nital durante 3 minutos a micrografia começou a ser revelada evidenciando os contornos de grãos, mas devido ao aumento de 100X ficar difícil de mensurar. O 3% de silício difundiram-se sobre a matriz de ferro, mas deve ser melhor avaliado com a micrografia junto com o EDS. A Figura 6 mostra a metalografia da 3ª amostra de da barra de tração TI atacada com Nital e magnificação de 500X.

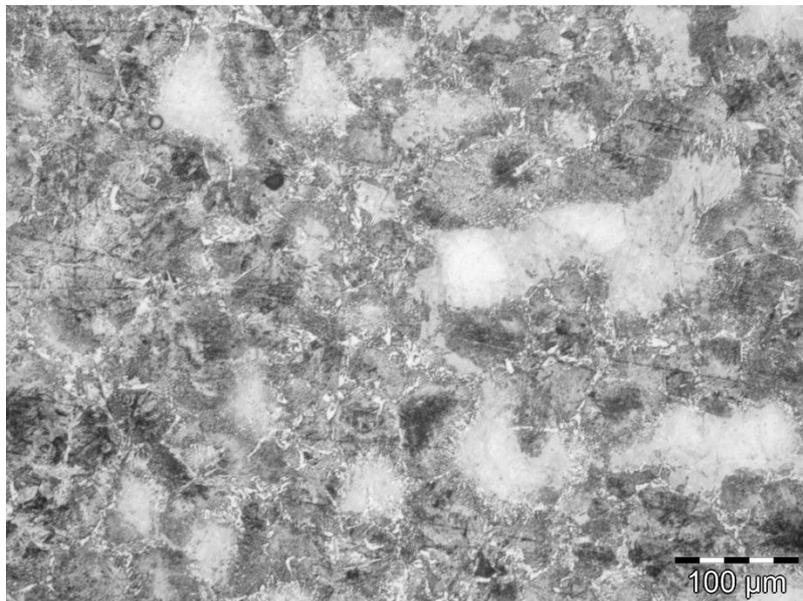


Figura 6 – Metalografia das amostras de Fe-3Si (500X).

Observa-se na metalografia da Figura 6, que o tamanho de grão ficou com aproximadamente 50 e 100 μm, mas devido ao aumento de 500X não ficou claro a microestrutura das amostras. A Figura 7 apresenta a metalografia da amostra com a magnificação de 1000X.

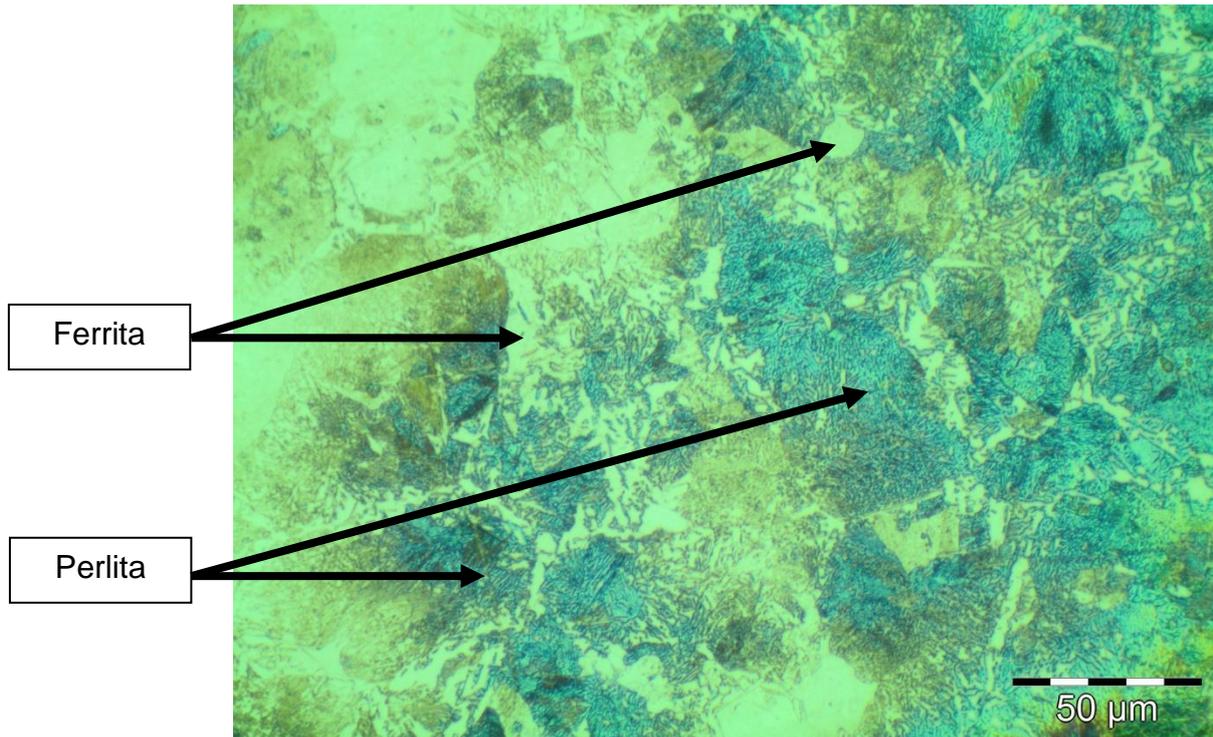


Figura 7 – Metalografia das amostras de Fe-3Si (1000X).

A magnificação de 1000 vezes permite a visualização da perlita e ferrita identificado pelas setas. A Figura 8 exibe onde foram realizadas as microdurezas

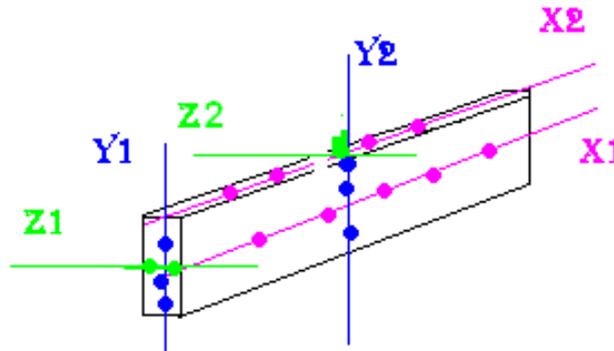


Figura 8 – Posicionamento das medições de microdureza.

A Figura 8 permite a visualização da localização onde foram realizadas as indentações (carga 50g) e mostram na Tabela 8 o resultado das microdurezas em HV.

Tabela 8: Microdurezas das amostras sinterizadas

X1	254,48	528,12	548,62	295,13	257,52	Média no X (HV)
X2	263,03	252,16	250,53	610,39	246,97	350,695
Y1	223,89	180,92	392,86	370,81	223,6	Média no Y (HV)
Y2	347,91	621,68	289,36	237,7	237,09	312,582
Z1	208,51	234,13	183,56	215,08	213,79	Média no Z (HV)
Z2	254,16	603,04	213,02	283,41	258,19	266,689

Não fica evidenciada homogeneidade nas medidas das microdureza, havendo uma distorção muito grande nos valores medidos, até mesmo na média. Os resultados da medição de dureza na escala Brinell (HB) com carga de 150 kgf está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Durezas das amostras sinterizadas

Médias de diâmetro (mm)	Dureza (HB)
0,8625	248,77
0,8640	247,85
0,8661	246,62
0,8723	243,03
0,8803	238,48
0,8708	243,89
0,8624	248,82

A Tabela 9 evidenciou homogeneidade nas medições de dureza representando que as amostras sinterizadas possuem propriedades mecânicas gerais mais similares. Foi realizado o ensaio de tração utilizando a norma ASTM E8 ou ASTM A370 com comprimento inicial de 25 mm. Para a determinação do limite de escoamento foi utilizada a taxa de carregamento médio de 0,375 mm/min e para a determinação do limite de resistência à tração foi utilizada a taxa de carregamento médio de 6875 mm/min. A Tabela 10 apresenta as propriedades mecânicas das amostras sintetizadas.

Tabela 10: Propriedades mecânicas das amostras sintetizadas no ensaio de Tração

Amostra	Carga de Escoamento [N]	Carga Máxima [N]	Alongamento (ELu) [%]	Limite de escoamento (YS) [MPa]	Resistência à Tração (UTS) [MPa]
T I	3796,62	5141,14	1,9	509,57	690,03
T II	3905,73	5761,65	1,9	545,25	804,34
T III	4910,56	5467,99	1,9	667,72	743,52
Média	---	---	1,9	574,20	746,0
Desvio Padrão	---	---	0	83,0	57,2
Incerteza	---	---	---	206,2	142,5

A média do limite de escoamento foi de 574,20 MPa e a resistência a tração da liga foi a média de 746 MPa. Fazendo uma relação direta em os aços carbono, observa-se que os valores alcançados ficaram equivalentes aos ABNT 1050 trefilado e ao ABNT 1050 laminado, que são aços carbono de excelente resistência. O percentual de silício no ferro aumentou significativamente as propriedades mecânicas da liga de ferro-silício.

5 CONCLUSÃO/ CONCLUSION

A metalurgia do pó permite a fabricação de ligas de altíssima pureza, que permite um estudo claro da influencia do percentual de silício sobre o ferro puro de uma liga injetada. Sumarizando os resultados obtidos concluiu-se que a homogeneidade da distribuição do pó sobre a massa polimérica permite uma boa moldagem por injeção, a densidade a verde entre 4,27 e 4,9 g/cm³. O ensaio de DSC/TGA permitiu determinar a temperatura de extração térmica de 600 °C. A temperatura de sinterização de 1260 °C foi eficiente devido ao excelente resultado de densificação das amostras atingindo a densidade do sinterizado de 7,6 a 7,7 g/cm³. Realizando o cálculo da densidade teórica da liga de Fe-3%Si que é 7,7 g/cm³. A metalografia permitiu a visualização de pouquíssima porosidade e o tamanho de grão entre 50 e 100 µm com a microestrutura entre a ferrita e a perlita. A microdureza atingida na média entre 266,68 a 350,69 HV equivalente a dureza na faixa de 238,48 a 248,82 HB, sendo excelente dureza para a liga. As propriedades mecânicas de dureza e microdureza são complementadas com o ensaio de tração que apresentou a faixa entre 690,03 a 804,34 com a média de 746 MPa. O procedimento de obtenção das amostras por moldagem de pó por injeção e a curva de sinterização atingiu excelentes resultados para a liga apresentada com possibilidade viável de produção de peças por este processo com esta liga.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Capes e Fapergs pelo financiamento deste trabalho através de materiais e bolsas.

REFERÊNCIAS/ REFERENCES

1. **STADELMAIER, H. H.** Magnetic properties of materials. *Materials Science and Engineering A287*. 2000., pp. 138–145.
2. **CALLISTER, W. D.** *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 7ª. s.l. : LTC, 2002. pp. xxx-xxx.
3. **PADILHA, A. F.** *Materiais de engenharia microestrutura e propriedades*. Curitiba : Hemus livraria, distribuidora e editora S.A., 2000. pp. 317 - xxx.
4. **COEY, J. M. D.** *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. pp. 1- 633. The Edinburgh Building, Cambridge CB28RU.
5. **STADELMAIER, H.H.** Magnetic properties of materials. *Materials Science and Engineering A287*. 2000, pp. 138–145.
6. **OLIVEIRA, A. H.** Exchange Bias em filmes policristalinos: Estudo da importância do Spin de interface e de volume. *Dissertação de Mestrado*. Porto Alegre : Departamento de Pós-graduação em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Fevereiro de 2011. pp. 1-80.
7. **TORRES, A.** Chapas de ferro-silício. [Online] 2003. Dissertação de Mestrado. http://www.pfi.uem.br/mfi/disserta_teses/teses_pdf/Aluizio_torres_2003.pdf.
8. **INFOMET.** Diagrama de Fase Ferro - Silício. *InfoMet - Informações britadas, fundidas e laminadas*. [Online] [Citado em: 02 de 06 de 2013.]



http://www.infomet.com.br/diagramas-fases-ver.php?e=mostrar&id_diagrama=243&btn_filtrar=Ok.

9. **HANSEN, M. and ANDERKO, K.** *Constitution of Binary Alloys*. New York : McGraw-Hill, 1985. p. 1305. Vol. 2.
10. INFOMET - Informações britada, fundidas e laminadas. *4 - Metais e ligas para a indústria elétrica*. [Online] INFOMET. [Citado em: 2013 de 07 de 15.] http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=81&cod_conteudo=124.
11. **ROCHA, M. A. e MEZA, R. A.** Monografia de graduação de Engenheiro Eletricista. *MODELAGEM DE CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO PARA SOLUÇÃO*. Curitiba : Centro Federal de Educação, 2005.
12. **GROSSNER, N. R.** *Transformer for eletronic and circuits*. 2ª. New York : McGraw-Hill. Inc., 1983. p. 467.
13. **Brasil, ABB no.** westinghouse electric company. [Online] ABB no Brasil. [Citado em: 10 de junho de 2013.] <http://www.abb.com.br/cawp/abbzh252/93615b19bb83ce2fc125791900224a5c.aspx>.
14. Inovação em Transmissão. *Alstom no Brasil*. [Online] [Citado em: 04 de 06 de 2013.] <http://www.alstom.com/brazil/pt/produtos-e-servicos/grid/>.
15. **Chiaverini, V.** *Tecnologia Mecânica - Materiais de construção mecânica*. 2ª. São Paulo : Mc Graw-Hill, 1986. pp. 66 - 79. Vol. III.
16. **BAS, J. A e CALERO, J. A and DOUGAN, M. J.** Sintered soft magnetic materials. Properties and applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. January de 2003, Vols. 254–255, pp. 391–398.
17. **STRECKOVÁ, M., FÁBEROVÁ, M. e BURES, R. AND DUDROVÁ, E.** IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF SMC TROUGH DIFFERENT. *Acta Metallurgica Slovaca - Conference*. 2013, Vol. 3, pp. 120-127.
18. *Growth Opportunities with Soft Magnetic Materials*. **NARASIMHAN, K., HANEJKO, F. e and . MARUCCI, M.** Washington D.C. : Hoeganaes Corporation, 2008. 2008 World Congress.
19. **Aktiengesellschaft, BASF.** Catamold □ Feedstock for Metal Injection Molding: Processing - Properties - Applications. *Information Technical*. may de 2003. p. 13.
20. **ERIRISINGHE, M. J. and EVANS, J. R. G.** Review: Fabrication of Engineering Ceramics by Injection Moulding. I. Materials Selection. *fill. J. High Technology Ceramics* . 1986, Vol. 2, pp. 1-31.
21. **JAMES, S.** The MIM Enigma. *Metal Powder Report - MPR*. June de 2002.
22. **Ismail, M. H., Goodall, R. e Davies, H. A. e Todd, I.** Porous NiTi alloy by metal injection moulding/sintering of elemental powders: Effect of sintering temperature. *Materials Letters*. 2012, Vol. 70, pp. 142–145.
23. **Shiboa, G., Bohua, D. e Xinbo, H. and Xuanhui, Q.** Powder injection molding of pure titanium. *RARE METALS*. Jun de 2009, Vol. 28, pp. 261 - 265. Nº. 3.
24. **Quinard, C., Song, J. e Barriere, T. e Gelin, J.C.** Elaboration of PIM feedstocks with 316L fine stainless steel powders for the processing of micro-components. *Powder Technology*. 2011, Vol. 208, pp. 383–389.
25. **Liu, L., Loh, N.H. e Tay, B.Y. e Tor, S.B.** Microstructure evolution of 316L stainless steel micro components prepared by micro powder injection molding. *Powder Technology*. 2011, Vol. 206, pp. 246–251.
26. **Silva, A., et al.** Study of soft magnetic iron cobalt based alloys processed by powder injection molding. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008, Vol. 320, pp. 393–396.



4th Conference of Powder Metallurgy
4ª Conferência Internacional de Metalurgia do Pó e 10º Encontro de Metalurgia do Pó
Data/Date: 09, 10 e 11 de outubro de 2013
Porto Alegre – RS – Brasil



ISSN 2179-619X

27. Antusch, S. Norajitra, P. Piötter, V. Ritzhaupt-Kleissl, H.-J. Powder Injection Molding for mass production of He-cooled divertor parts. *Journal of Nuclear Materials*. 2011, Vol. 417, pp. 533–535.