



PROPRIEDADES MECÂNICAS, MAGNÉTICAS E ELÉTRICAS DE LIGA Fe-Co COM RESÍDUO TERMOELÉTRICO

Wermuth, D. P.¹

Tavares, A. C.²

Schaeffer, L.³

¹ Mestrando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, diego.wermuth@ufrgs.br

² Mestrando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, andre.tavares@ufrgs.br

³ Doutor em Conformação Mecânica, Coordenador do LdTM da UFRGS, schaefer@ufrgs.br

Resumo

As ligas Fe-Co são muito indicadas para aplicações especiais e classificadas de acordo com estas aplicações, onde sua característica principal exija elevada resistência à corrosão, propriedades magnéticas, resistência ao desgaste e resistência mecânica em altas temperaturas. Este artigo tem por objetivo verificar as propriedades mecânicas, magnéticas e elétricas de uma liga de Fe-Co com acréscimo de resíduos termoeletrônicos, após a sinterização em atmosfera de Argônio de corpos de provas obtidos pela metalurgia do pó convencional. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de Microdureza, metalografia, contração volumétrica, magnetização, histerese e resistividade, para que os resultados obtidos fossem analisados.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas, magnéticas, elétricas; Liga Fe-Co; Resíduo termoeletrônico; Metalurgia do Pó.

MECHANICAL, ELECTRICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF FE-CO ALLOY WITH RESIDUE THERMOELECTRIC

Abstract

The Fe-Co alloys are very indicated for special applications and are classified according to those applications where their main feature requires high corrosion resistance, magnetic properties, wear resistance and mechanical strength at high temperatures. This article aims to verify the mechanical properties, magnetic properties and electric properties of Fe-Co alloy with residue thermoelectric, after sintering in argon atmosphere of specimens obtained by conventional powder metallurgy. The specimens were tested for hardness, metallography, volumetric contraction, magnetization, hysteresis and resistivity for the results obtained were analyzed.

Key words: Mechanicals, magnetic and electrics properties; Fe-Co alloy; residue thermoelectric; Powder Metallurgy.

1 INTRODUÇÃO

Devido a resultados obtidos em pesquisas realizadas anteriormente no Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS, os quais utilizaram cinzas provenientes de termoeletrônica, notou-se grande liberação de silício durante a sinterização quando utilizado pó de ferro na mistura, o que gerou perda de

estabilidade nos demais elementos da cinza (1). Este primeiro resultado impulsionou a realização do estudo com o pó de cobalto e cinzas, onde os resultados obtidos apresentaram boa estabilidade nos demais elementos da cinza durante a sinterização (2).

Levando em conta estes fatos, foi elaborada uma liga de Ferro-Cobalto-Cinza, com o intuito de verificar se haveria bons resultados de propriedades magnéticas e elétricas, devido a liberação de silício com a utilização de cinzas com ferro, bem como melhorias nas propriedades mecânica, devido a estabilização dos elementos da cinza com a utilização do cobalto.

Ligas Fe-Co são de grande importância na indústria dos materiais ferromagnéticos, conhecidos como magnéticos moles. As principais características destas ligas são seu alto valor de saturação magnética e o alto valor da temperatura de Curie. Um alto valor de saturação significa que é possível obter uma densidade de fluxo magnético grande, permitindo, por exemplo, uma redução no volume do material a ser empregado. A alta temperatura de Curie permite o uso do magnetismo em uma faixa de temperatura de trabalho maior (3).

As ligas de Fe-Co podem ser utilizadas como amplificadores e/ou direcionadores do campo magnético em uma variedade de dispositivos, incluindo transformadores, geradores, e motores usados na geração e distribuição de energia elétrica, em núcleos de transformadores, cabeçotes de gravação magnética, sensores de campo magnético, transdutores e blindagem magnética e em vários aparatos, desde aparelhos domésticos até equipamentos científicos (3).

Outra propriedade significativa para estudos futuros dos materiais magnéticos moles é a coercividade, pois é um parâmetro importante relacionado às baixas perdas magnéticas. Essa propriedade é influenciada pela microestrutura e, portanto, será afetada pela maior parte dos defeitos, como discordâncias, contorno de grão e precipitados. Quanto menor o grau de impurezas e defeitos na liga, melhores serão as propriedades magnéticas obtidas. Defeitos pontuais não exercem efeitos detectáveis nas duas mais importantes propriedades sensíveis à microestrutura que são a coercividade e permeabilidade. Quando os defeitos pontuais são convertidos em discordâncias em hélice, poros, bolhas de gás ou inclusão de partículas, eles efetivamente deterioram as propriedades dos materiais magnéticos moles (4).

2 MATERIAL E MÉTODOS

As propriedades mecânicas, assim como as magnéticas, estão relacionadas com a microestrutura do material. Porém, devido à reação de ordenamento a recristalização e crescimento de grão não seguem um comportamento padrão e, portanto, merecem atenção na definição do ciclo térmico de processamento (5).

Neste artigo será confeccionada uma liga Fe-Co com cinzas leve provenientes da queima do carvão mineral em termoelétricas, através do processo de Metalurgia do Pó convencional. Este processo metalúrgico consiste em conformar os pós constituintes da liga em peças resistentes, comprimindo estes pós no interior de uma ferramenta com formato desejado obtendo um "compactado à verde" por pressão mecânica que, posteriormente, será sinterizado. Peças fabricadas por metalurgia do pó possuem certa porosidade, que pode ser controlada através de fatores como pressão de compactação, temperatura e tempo de sinterização, tamanho e forma das partículas do pó, etc. A peça pronta apresenta bom acabamento superficial e adequadas tolerâncias dimensionais (6). A metalurgia do pó tem a finalidade de transformar sem fusão efetiva, pós metálicos ou não

metálicos usando pressão para compactação e calor, através de um tratamento térmico de sinterização, que se realiza a temperatura inferior ao ponto de fusão do material base do componente ou peça, permitindo obtê-los na sua forma final ou próximo dela (*'near-net or net-shape'*) (7).

O processo de Metalurgia do Pó pode ser visto de maneira esquemática e simples através da Figura 1, demonstrada a seguir.

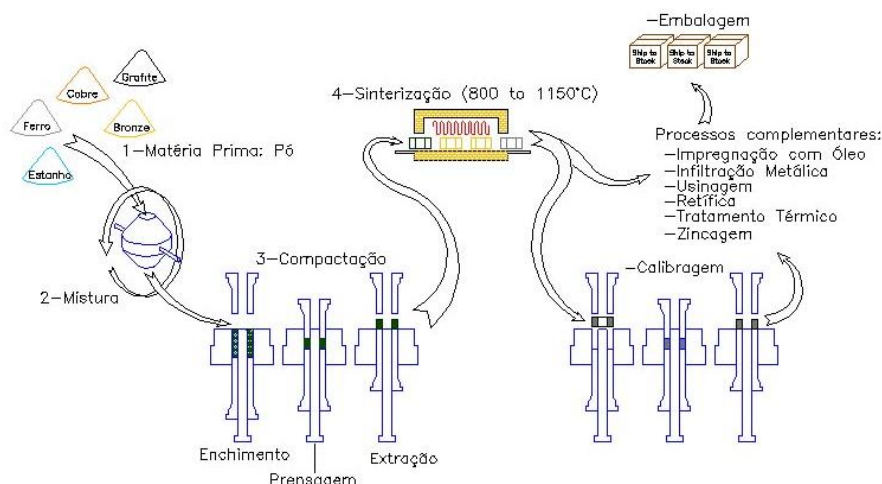


Figura 1. Etapas simplificadas do processo de metalurgia do pó (8).

Seguindo as etapas da metalurgia do pó, iniciou-se o trabalho formulando a liga Ferro-Cobalto-Cinza. Para esta formulação utilizou-se uma balança de precisão onde foi medida a massa dos pós de ferro e de cobalto para garantir as proporções adequadas da liga, neste caso 40% de pó de ferro, 30% de pó de cobalto e 30% de Cinzas leves. A mistura desta liga foi realizada em misturador próprio para a metalurgia do pó.

Também foi utilizado na liga 1,5% parafina. Este material atuará como lubrificante durante a compactação das amostras e para melhor extraí-las da matriz.

Com a liga pronta e misturada, coletou-se a medida de densidade aparente. Este procedimento consiste em medir a densidade do material sem que haja alguma pressão aplicada, para isto o material é escoado dentro de um recipiente com volume conhecido, após o preenchimento completo do recipiente é feita a medição da massa do material que foi nele depositado. A densidade aparente é obtida, então, pela razão de massa (em gramas) por volume (em cm³).

O valor obtido da densidade aparente é o primeiro ponto da curva de compressibilidade deste material. A curva de compressibilidade é descrita em forma de gráfico, sendo que cada ponto utilizado para sua construção é a medida da densidade de corpos de prova, obtidos de uma matriz de compactação por diferentes pressões. As pressões utilizadas na obtenção destes corpos de prova iniciam em 100MPa na primeira amostra e acrescido mais 100MPa para cada amostra seguinte até a pressão de 1000MPa, totalizando 10 amostras.

Para a compactação das amostras foi utilizado uma matriz de compactação, demonstrada na Figura 2, acoplada a uma prensa hidráulica manual de 30 toneladas.

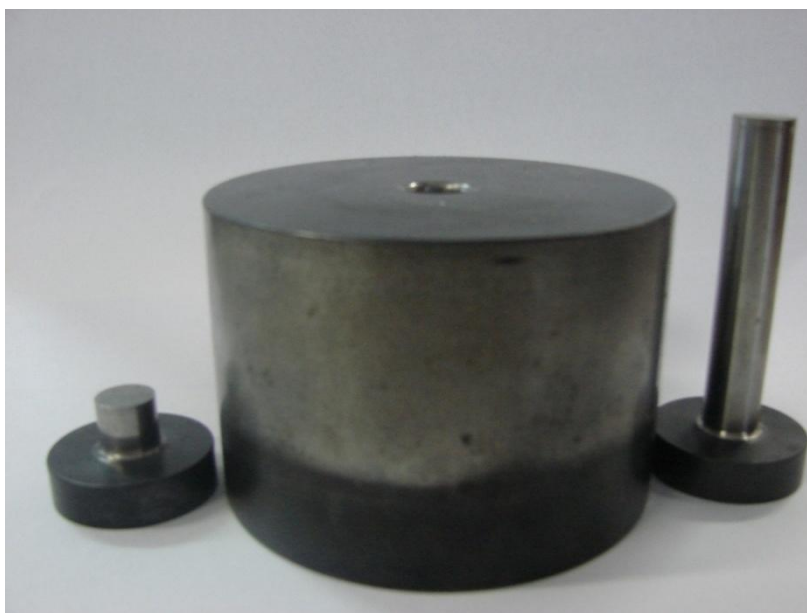


Figura 2. Matriz de compactação

Ao final da compactação das amostras da liga obteve-se 10 corpos de prova verdes, em forma cilíndrica, que foram encaminhadas para a sinterização em forno de atmosfera controlada, exibido na Figura 3.



Figura 3. Forno de Sinterização.

No final da etapa de sinterização, os corpos de prova já estavam prontos, ou seja, sem a necessidade de uma etapa complementar, pois já possuíam as propriedades desejadas para o estudo proposto neste artigo.

Os corpos de prova sinterizados foram submetidos aos ensaios de Microdureza e Metalografia, para arrecadação de dados referentes às propriedades mecânicas, ensaios de Magnetização e Histerese para coleta de dados sobre suas propriedades magnéticas e ensaio de Resistividade para verificar as propriedades elétricas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a mistura dos pós da liga proposta, o primeiro resultado obtido foi o da densidade aparente, que é a densidade medida do material que preenche um recipiente de volume conhecido, através de sua escoabilidade. A densidade é descrita pela fórmula relatada a seguir:

$$\text{Densidade } (\rho) = \frac{\text{massa (g)}}{\text{Volume (cm}^3\text{)}}$$

Onde:

ρ = densidade

g = gramas

cm³ = centímetros cúbicos

A densidade aparente obtida da liga Ferro-Cobalto-Cinza está descrita no Quadro 1 a seguir:

	Densidade Aparente (g/cm ³)
Liga Fe-30%Co-30%Cz	1,638

Quadro 1. Densidade aparente da Liga Fe-Co-Cz.

O próximo resultado adquirido foi a curva de compressibilidade da liga, para isso foi necessário recolher dados dimensionais das amostras verdes compactadas em diferentes pressões, estes dados estão descritos na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1. Dimensões das amostras verdes da liga Fe2%Co.

Amostras	Pressão de compactação (MPa)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (g)
I	100	9,780	10,120	2,446
II	200	9,780	9,650	2,450
III	300	9,790	9,220	2,419
IV	400	9,800	9,130	2,438
V	500	9,800	8,850	2,414

Como já mencionado no artigo, a curva de compressibilidade é descrita em forma de gráfico e cada ponto constituinte da curva é o valor da densidade da amostra verde para pressão de compactação utilizada na sua fabricação. Sendo assim a Figura 4 apresenta a curva de compressibilidade da liga Fe30%Co30%Cz.

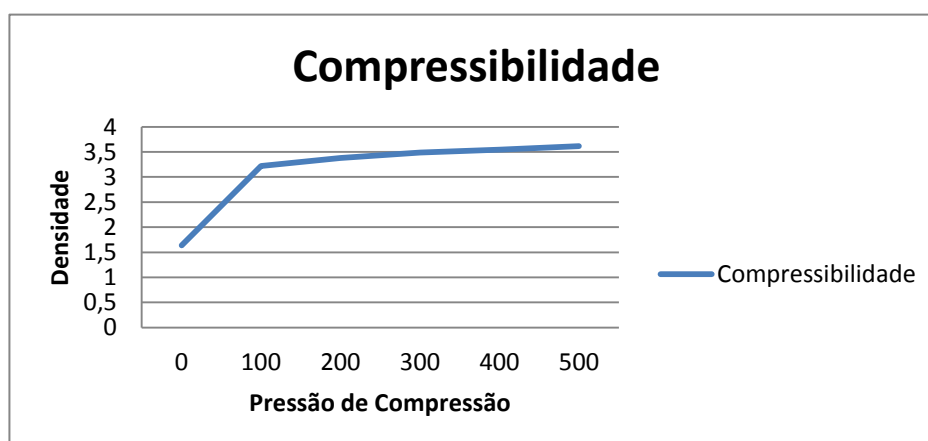


Figura 4. Curva de compressibilidade da liga Fe-Co-Cz.

A curva de compressibilidade demonstra a pressão ideal de compactação, atingindo a maior densidade com a menor pressão exercida, ou seja, para a produção de novos produtos que serão constituídos pela liga estudada será utilizado o valor de pressão correspondente ao ponto em que a curva se estabiliza, sendo este aquele que utiliza a menor pressão para atingir uma densidade elevada.

Após a compactação das amostras da liga Fe-Co-Cz, os corpos de prova (peças verdes) foram encaminhados para a realização do tratamento térmico denominado sinterização.

A sinterização das amostras foi realizada em um forno da “Sanchis Fornos Elétricos”, do Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS, no Centro de Tecnologia da Universidade.

Nesta etapa do processo da metalurgia do pó as amostras são colocadas dentro do forno, que possuía controle de atmosfera com gás Argônio, o aquecimento das amostras iniciou em temperatura ambiente (25°C) e aumentou gradativamente com a taxa de 10°C/min até alcançar a temperatura de 1150°C, onde permaneceu por uma hora, realizando assim a sinterização completa e união das partículas. Após a exposição, por uma hora, das amostras à temperatura de 1150°C, deu-se início o resfriamento em forno, desligando as resistências e aguardando as amostras atingirem a temperatura ambiente para retirá-las.

As peças já sinterizadas foram encaminhadas para medição de densidade, através do ensaio de Arquimedes. A figura 5 exibe a diferença entre as densidades das amostras verdes (curva azul) e sinterizadas (curva marrom).

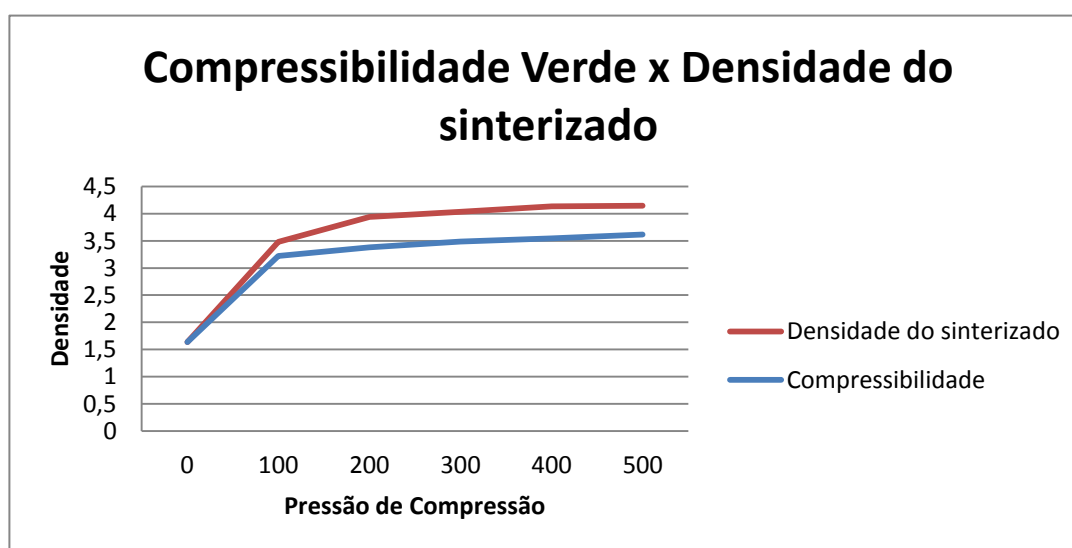


Figura 5. Curva de compressibilidade da liga Fe-Co-Cz.

O primeiro ensaio realizado foi o metalográfico, que consiste no lixamento destas amostras em uma polidora que utiliza lixas de diferentes granulometrias. Este processo iniciou com a lixa de maior granulometria (400mesh) que foi posteriormente substituída por uma de menor granulometria, isto sucessivamente até uma lixa de 1500mesh. Após o lixamento foi feito o polimento da amostra com uma solução de alumina para eliminar os possíveis “arranhões” deixados pelas lixas.

As amostras já polidas são submetidas ao ataque químico pelo reagente Nital, o qual revela a microestrutura da amostra para ser analisada no microscópio Olympus GX51F, exibido na Figura 6.



Figura 6. Microscópio Olympus GX51F.

As imagens metalográficas da liga Fe30%Co30%Cz obtidas pelo microscópio apresentaram a microestrutura detalhada apresentada pela Figura 7.

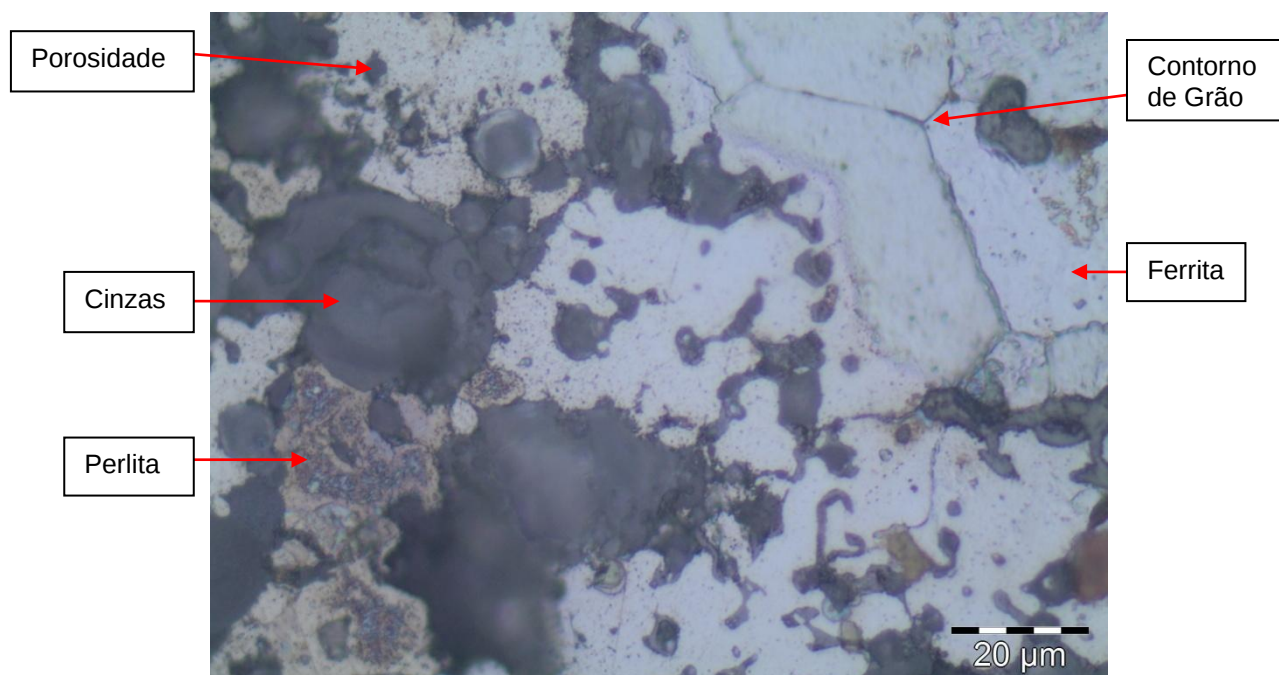


Figura 7. Microestrutura da liga Fe30%Co30%Cz.

Através das imagens metalográficas, pode-se perceber que esta liga apresentou uma fase perlítica que, teoricamente, garante a este material bons resultados de dureza, nota-se também que obteve-se grandes volume de porosidade, o que prejudica as propriedades magnéticas para a liga. Um resultado muito importante que deve ser mencionado é que os Grãos, visualizados na microestrutura, possuem tamanhos grandes, superiores a 40µm e isto prejudica as propriedades mecânicas da liga, porém houve formação de regiões perlíticas ao redor das cinzas, o que proporciona aumento na dureza.

Após esta análise microestrutural, as amostras da liga Fe30%Co30%Cz foram encaminhadas para o ensaio de Microdureza e apresentaram os resultados descritos no Quadro 2, que segue.

Amostra	Dureza (HV) Região Ferrítica	Dureza (HV) Região com Cinzas
I	91,8276	605,332
II	95,0549	613,224
III	108,6095	893,544
IV	103,0515	1110,374
V	106,2989	751,506

Quadro 2. Dureza em HV (Vickers) da Liga Fe30%Co30%Cz.

Através dos resultados pode-se afirmar que na região das cinzas houve maior dureza, devido ao alto teor de alumina e sílica, além das regiões perlíticas.

Após a análise de microdureza, as amostras foram encaminhadas ao ensaio de magnetização que apresentou os resultados demonstrados na figura 8, tendo uma densidade do fluxo magnético de 0,1T e intensidade do campo em torno de 4650A/m.

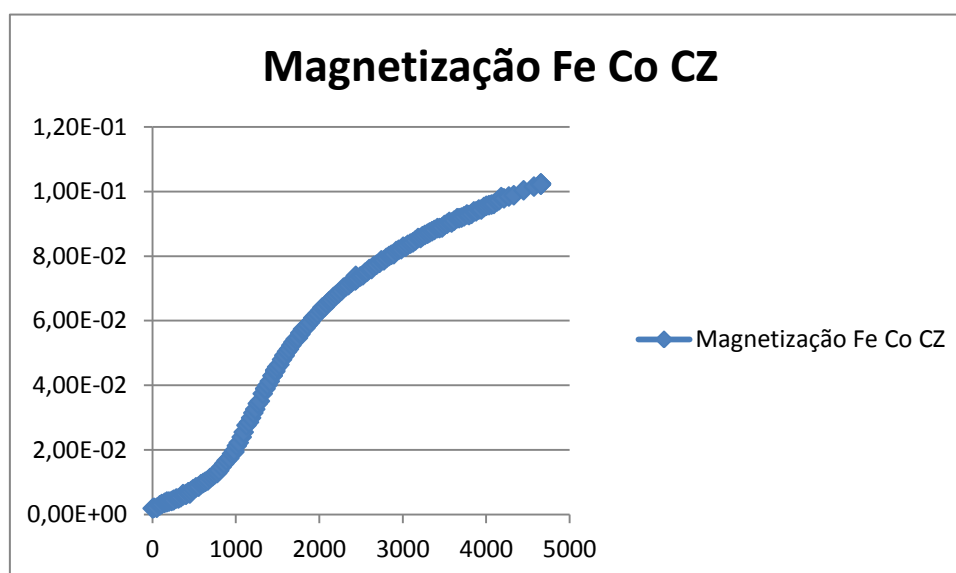


Figura 8. Curva de Magnetização Fe30%Co30%Cz

Depois do ensaio de magnetização, realizou-se a histerese para avaliar a susceptibilidade magnética, que mensura a capacidade que tem um material em magnetizar-se sob a ação de uma estimulação magnética. Este ensaio apresentou o resultado demonstrado na Figura 9.

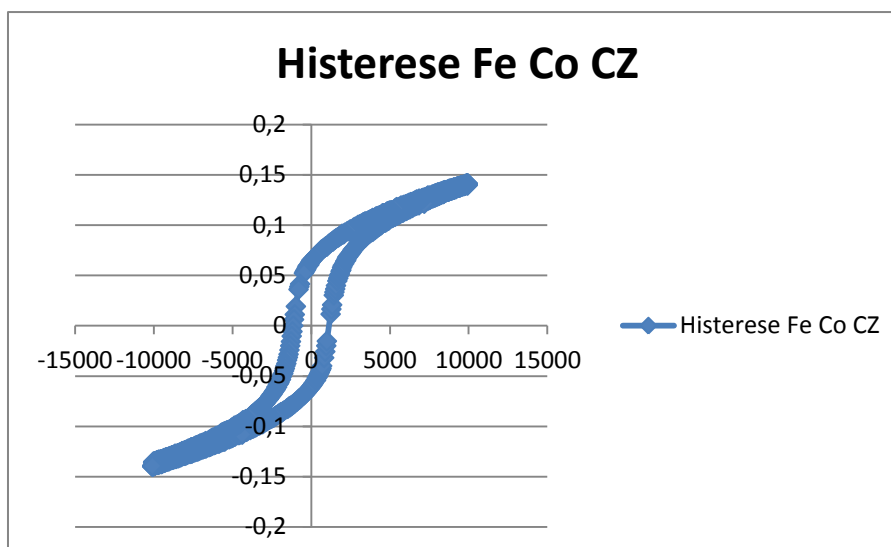


Figura 9. Curva de histerese Fe30%Co30%Cz

Foi feito também o ensaio de resistividade, que apresentou os resultados demonstrados pelo Quadro 3.

	Medidas Geométricas (mm)		Medidas de Tensão (mV)				Valores	
	Área (m ²)	Comprimento (m)	1,5 (A)	2 (A)	2,5 (A)	3 (A)	R (Ω)	ρ (Ω.m)
Amostra	3,1678E+01	0,1248	14,50	19,50	24,40	29,20	0,0097	2,4682E+00

Quadro 3. Resistividade da Liga Fe30%Co30%Cz.

Após a análise dos resultados de magnetização, histerese e resistividade nota-se a ineficiência do acréscimo de cinzas para melhoria destas propriedades, pois os resultados obtidos foram muito inferiores aos de ligas magnéticas mole utilizadas na indústria atual. (9) (10) (11)

4 CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados, conclui-se que ao acrescentar cinzas leves em uma liga Fe-Co, através do processo de metalurgia do pó convencional, consegue-se atingir bons resultados nas propriedades mecânicas, como pôde ser comprovado através do ensaio de microdureza. Estes resultados são atingidos devido à formação de perlita ao redor dos grãos de cinzas, bem como ao alto teor de alumina e sílica presentes neste resíduo termoelétrico.

Ao analisar a curva de compressibilidade da liga, nota-se que para a obtenção de peças mais densas a pressão ideal para a compactação deve ser de 300MPa, pois com pressões superiores apenas estaríamos exigindo um esforço desnecessário do equipamento de prensagem já que a densidade não terá aumento significativo.

Mesmo com o aumento das propriedades mecânicas, as expectativas para melhorias nas propriedades magnéticas e elétricas não foram atingidas. Os resultados obtidos foram inferiores aos de ligas magnéticas mole, atualmente utilizadas. Estes resultados podem ser atribuídos pela grande porosidade e com poros irregulares, apresentadas pelo ensaio metalográfico. Estas irregularidades afetam negativamente as propriedades magnéticas da liga, como por exemplo à

perda por histerese na magnetização e desmagnetização, devido a estas propriedades serem influenciadas pela presença de imperfeições no material, tais como grandes quantidades de poros.

Com isso conclui-se que as cinzas termoelétricas, em percentuais elevados, não trazem benefícios para propriedades elétricas e magnéticas de ligas Fe-Co. Porém é necessário a realização de estudos mais aprofundados, trabalhando com percentuais mais baixos de cinzas e avaliando estas propriedades, para então afirmar que este resíduo realmente não trará benefícios para estas propriedades.

Agradecimentos

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, principalmente ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) pela disponibilização dos recursos materiais e tecnológicos utilizados na elaboração deste trabalho. Aos órgãos CAPES e CNPq pelo apoio a projetos e investimento na área da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 KERSTNER, E. K; et al. Estudo da utilização de cinzas da combustão de carvão no processo de fabricação de componentes por metalurgia do pó convencional. 66º congresso da ABM, São Paulo, Julho 2011
- 2 MARIOT, P.; et al. Obtenção de cermets por metalurgia do pó convencional a partir da utilização das cinzas da queima de carvão mineral. 31º SENAFOR, Porto Alegre, Outubro, 2011.
- 3 SILVA, A. *Ligas magnéticas à base de FeCo processadas via moldagem de pós por injeção*. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Julho de 2008.
- 4 CHEN, C., *Magnetic and Metallurgy of Soft magnetic Materials*, Dover Publication, Inc. New York, 1977.
- 5 SOURMAIL, T. *Near equiatomic FeCo alloys: constitution, mechanical and magnetic properties*. Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, Cambridge, 2005.
- 6 SANDEROW, H.; *Management & Engineering Technologies. Powder Metallurgy Methods and Design*. ASM Metals Handbook v7 - Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, 9ª Edition. 1998. p.23-24
- 7 YVES TRUDEL. *Introduction to Metal Powder*. Production and Characterization ASM Metals Handbook v7 - Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, 9ª Edition. 1998. p. 83-88
- 8 QUALISINTER. Disponível em: <<http://www.qualisinter.com.br/Processo.htm>> Acesso em: 25/04/2013
- 9 SCHIMIDT, Walfredo. *Materiais Elétricos*. 1ª Edição Vol. 2, 1979. 166p.
- 10 DE PINHO, L. C. A. B. *Materiais Magnéticos e suas Aplicações*. Dissertação de Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, FEUP, Portugal, 2009. 28p.
- 11 SILVA, A. *Ligas magnéticas à base de FeCo processadas via moldagem de pós por injeção*. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. UFSC, Florianópolis, 2008.