

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DO PROCESSO DE MICROFUSÃO PELA TECNOLOGIA DO PÓ APLICADA AO MECANISMO IMPRESSOR

ECONOMIC EVALUATION OF THE REPLACEMENT PROCESS OF CASTING BY POWDER TECHNOLOGY APPLIED TO THE PRINTER MECHANISM

José Carlos Krause de Verney¹, Darlan José Hermes², Marília Amaral da Silveira³

¹E-mail: jcverney@ulbra.br

²E-mail: darlan@menno.com.br

³E-mail: marilia.amaral@ulbra.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o emprego de novos processos de fabricação e o uso de novos materiais na produção de um componente do mecanismo impressor utilizado em impressoras matriciais fabricadas por uma indústria. A indústria emprega um componente ferromagnético produzido por microfusão, que passa por diversas etapas de fabricação até a montagem final. Durante essas etapas há um elevado índice de rejeição de peças. O desenvolvimento de um novo processo produtivo do componente ferromagnético, por meio da metalurgia do pó, com a utilização de outras ligas ferromagnéticas e com o emprego de um novo desenho geométrico mostra-se de extrema importância para a redução dos custos de fabricação. O estudo envolve a produção e a avaliação do desempenho de amostras com ligas ferromagnéticas obtidas por meio do processo da metalurgia do pó e a comparação dos resultados com aqueles gerados pelas amostras produzidas por microfusão. A substituição do processo de produção permitirá ao fabricante uma redução em torno de 36% nos custos de fabricação, o que propiciará uma maior competitividade mercadológica.

Palavras-chave: metalurgia do pó; mecanismo impressor matricial; liga ferromagnética; custo de fabricação.

ABSTRACT

This work presents a study of the application of new manufacturing processes and the use of new materials for the production of a component of print heads employed in dot matrix printers manufactured by industry. The manufacturer employs a ferromagnetic component produced by casting, which has many steps of manufacturing until the final assembly. During these steps, there is a high rejection rate of parts. The development of a new production process of the ferromagnetic component by powder metallurgy, with the employment of other ferromagnetic alloys and a new geometric model are extremely important to reduce costs of manufacturing. The study involves the production and the evaluation of the performance of samples of ferromagnetic alloys obtained by the powder metallurgy process and the comparison of the results with those generated by samples produced by the process of casting. The replacement of the manufacturing process will propitiate to the manufacturer a reduction of about 36% in manufacturing costs, allowing a more competitive marketing.

Keywords: Powder metallurgy; dot-matrix print head; ferromagnetic alloy; manufacturing costs.

1 – INTRODUÇÃO

A economia e a indústria brasileira tiveram um crescimento significativo nos últimos anos. Parte desse crescimento é fortemente afetada pela valorização cambial aliada ao desenvolvimento produtivo dos países emergentes que compõem o grupo denominado BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China). Esse cenário tem incentivado a substituição dos produtos nacionais pelas importações. A busca por uma maior competitividade tem provocado uma profunda mudança estrutural na produção das empresas nacionais, incentivando o desenvolvimento de novos materiais e a aplicação de métodos produtivos mais econômicos e eficientes para reduzir as perdas geradas no ambiente de produção.

Atualmente, as empresas estão modificando a sua visão ambiental e energética, preocupadas com o desperdício e as perdas nos seus processos industriais, que se traduzem em aumento nos custos de fabricação. As

melhorias nos processos industriais e na qualidade dos produtos produzidos podem representar uma importante economia de energia e dos recursos naturais. O desenvolvimento de novos materiais e métodos produtivos incentiva a pesquisa tecnológica, em busca de novas alternativas para produtos e componentes consagrados no mercado há diversos anos.

Em uma indústria de impressoras matriciais localizada no sul do Brasil, a fabricação de um dos componentes do Mecanismo Impressor Matricial, denominado de Castelo de Suporte das Bobinas, sempre foi realizada por meio do processo de microfusão, também conhecido como fundição de precisão. No processo de fabricação, sempre foi utilizada a liga de ferro-silício (Fe3Si) e o Castelo de Suporte das Bobinas sempre foi produzido no mesmo formato. Os indicadores produtivos e econômicos da indústria sempre apontaram para um altíssimo tempo de ressuprimento e altos índices de sucata nos processos produtivos intermediários (HERMES, 2012).

Na Figura 1 é apresentada uma fotografia do Castelo de Suporte das Bobinas (CSB). Ele compõe o cabeçote impressor do Mecanismo Impressor Matricial (MIM), Figura 2. O Castelo, onde são montadas as bobinas, tem, entre outras funções, propiciar um caminho de baixa relutância magnética para o campo magnético estabelecido pela corrente nessas bobinas. Por meio da ação do campo magnético, ocorre o movimento das agulhas, responsáveis pela impressão. O material a ser utilizado na construção do castelo de bobinas deve possuir elevada permeabilidade magnética. Também deve apresentar baixa remanência magnética, essencial para evitar que uma palheta fique presa ao núcleo do castelo após o desligamento elétrico da bobina (BRATS, 2008).

Figura 1 – Castelo de Suporte das Bobinas pré-montado.
Fonte: Menno Equipamentos (2009)

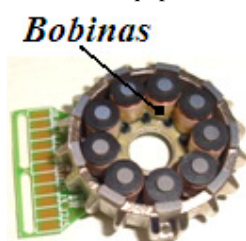


Figura 2 – Cabeçote Impressor Matricial (CIM).
Fonte: Menno Equipamentos (2009)



As bobinas são montadas no castelo de maneira a formar circuitos magnéticos individuais para o fluxo magnético. O campo magnético produzido pela corrente em uma bobina magnetiza o material ferromagnético de que é feito o castelo, atraindo uma palheta, que por sua vez, impulsiona uma agulha num sistema balístico contra um anteparo, marcando um ponto. O retorno da palheta se dá por meio de uma mola de compressão, produzida com material a base de silicone e alta resiliência¹ (ALECRIM, 2007).

As impressoras matriciais (classificadas em uma categoria chamada impressoras de impacto) são bastante duráveis e têm baixo custo em relação aos seus suprimentos. O mecanismo impressor matricial é empregado nas mais variadas aplicações de impressão de papéis e documentos, como impressoras de cheques, impressoras de cupom e nota fiscal, mecanismos de impressão de pesagem, mecanismo autenticador de operação financeira, mecanismo registrador de tempo, nos mais diversos equipamentos de automação bancária e

¹Propriedade de um material de recuperar a sua forma a posição original após uma deformação elástica.

comercial. Nos últimos anos, a indústria fabricante do castelo em estudo tem produzido, por ano, uma média de 72.000 unidades desse componente (HERMES, 2012).

Este trabalho tem por objetivo avaliar, sob o aspecto econômico, a substituição do processo de microfusão pela tecnologia do pó metálico para a produção do componente castelo de suporte das bobinas do mecanismo impressor matricial.

1.1 Processos de produção de peças metálicas

No processo de produção de peças metálicas por fundição, as peças obtidas são utilizadas em grande quantidade em equipamentos de transporte, construção, comunicação, geração de energia elétrica, mineração, agricultura, máquinas operatrizes; enfim, na indústria em geral, devido às vantagens que os processos de fundição oferecem. Na maioria dos casos, a fundição é o processo inicial, porque, além de permitir a obtenção de peças com formas praticamente definitivas, possibilita também a fabricação dos chamados lingotes, os quais serão posteriormente transformados em formas definitivas. A fundição, assim, permite a fabricação de peças praticamente de qualquer forma, com pequenas limitações em dimensões, forma e complexidade. Possibilita, finalmente, a consecução de propriedades mecânicas que suportam as mais variadas condições de serviço (CHIAVERINI, 1986).

A Fundição de Precisão ou Microfusão consiste no método de cera perdida, que compõe-se da fabricação de modelos em cera, os quais são revestidos em material refratário apropriado. Posteriormente, com a remoção dos modelos em cera, por aquecimento do conjunto, procede-se o vazamento com o metal desejado. As peças obtidas por este processo caracterizam-se pela riqueza de detalhes, precisão dimensional e fino acabamento, o que permite em alguns casos, a eliminação quase completa de subseqüentes operações de usinagem (CHIAVERINI, 1986).

1.2 Tecnologia da metalurgia do pó

A tecnologia, ou metalurgia, do pó (conhecido também por sinterização) é hoje um processo de manufatura de peças e componentes totalmente consolidado e maduro. Em um século, saiu do patamar de técnica incipiente e experimental para conquistar a posição atual de destaque, sendo considerada altamente avançada, econômica e ecológica. Ela é atualmente empregada na fabricação de várias peças metálicas ferrosas e não ferrosas, em sua grande maioria de aplicação na indústria automotiva, mas também em cerâmica, materiais de fricção, contatos elétricos, filtros metálicos, materiais magnéticos, entre outros (CHIAVERINI, 2001).

A metalurgia do pó é a técnica metalúrgica que consiste em transformar pós de metais, metalóides ou ligas metálicas e, às vezes, também substâncias não metálicas, em peças resistentes, sem recorrer-se à fusão, mas apenas pelo emprego de pressão e calor (CHIAVERINI, 2001). Para Callister (2006), é a técnica de fabricação de peças metálicas com formas complexas e precisas, que emprega

a compactação de pós metálicos, seguida por um tratamento térmico de aumento de densidade. As peças são produzidas com formas definitivas ou praticamente definitivas, dentro de tolerâncias muito estreitas, geralmente sem a necessidade de operações de usinagem posteriores ou de qualquer outro tipo de acabamento.

1.3 Materiais ferromagnéticos

Os materiais ferromagnéticos são amplamente empregados na construção dos mais variados tipos de dispositivos eletromagnéticos. O ferro puro apresenta baixa resistividade elétrica, de modo que não é recomendado em circuitos de corrente alternada ou pulsada, que constituem quase 75 % de todas as aplicações industriais de materiais magnéticos. Adicionando-se elementos de liga ao ferro, como o silício, sua resistividade elétrica aumenta, tornando-o adequado para aplicações em corrente alternada. Depois do silício, o níquel e o cobalto são os metais utilizados como elementos de adição ao ferro (CALLISTER, 2006).

As características que devem ser levadas em conta nos materiais ferromagnéticos para a indústria elétrica são a permeabilidade magnética, a coercitividade magnética, a densidade de fluxo magnético de saturação, a resistividade, entre outras. Portanto, os materiais com os quais os núcleos magnéticos de dispositivos eletromagnéticos são construídos devem apresentar, em geral, as seguintes propriedades: alta permeabilidade magnética, baixa coercitividade magnética, alta resistividade e alta indução de saturação. (DIETRICH, 1992 *apud* DIAS *et al.*, 2005).

Em função das características da permeabilidade magnética e da força coercitiva, os materiais ferromagnéticos podem ser divididos em dois grupos:

- materiais de alta permeabilidade e baixa força coercitiva, ou materiais magneticamente moles, utilizados na construção de núcleos de dispositivos eletromagnéticos;
- materiais de alta força coercitiva, chamados de materiais magneticamente duros, utilizados na produção de ímãs permanentes.

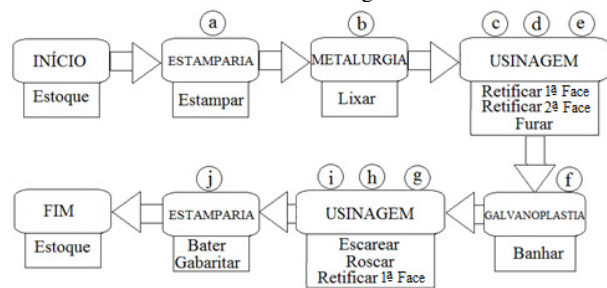
Os materiais sinterizados mais comumente utilizados na indústria elétrica são ferro puro, ligas ferro-fósforo, ligas ferro-silício, ligas ferro-fósforo-silício, ligas ferro-níquel, ligas ferro-cobalto e aços inoxidáveis ferríticos. (LALL, 1992; LENEL, 1984; BAS *et al.*, 1988 *apud* DIAS *et al.*, 2005). As ligas de ferro-cobalto têm como principal característica a sua alta indução máxima. Esta propriedade é interessante quando o volume e a massa dos componentes devem ser minimizados, (BAS *et al.*, 1988 *apud* DIAS *et al.*, 2005). A liga de ferro-silício tem força coercitiva similar às ligas ferro-fósforo, com uma indução máxima ligeiramente maior. Porém, sua resistividade elétrica é bastante superior, diminuindo assim as perdas por correntes parasitas. Estas ligas são aplicadas em circuitos que operam em frequências médias de até 1200 Hz.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

O componente CSB é produzido por processo de microfusão, em lotes econômicos de 10.000 unidades. Após o recebimento, o componente passa por dez operações industriais. Durante esse processo fabril, ocorrem perdas de produção na sequência do trabalho, descritas conforme fluxograma representado na Figura 3, com as respectivas perdas em percentual nos processos, sobre o total do lote de 1.000 peças:

- estamparia: 7,0 %
- metalurgia: 1,0 %
- d, e) usinagem, 5,5 %
- galvanoplastia, 1,0 %
- g, h, i) usinagem, 3,5 %
- estamparia, 5,5 %

Figura 3 – Esquema ilustrativo do processo industrial do CSB antes da montagem

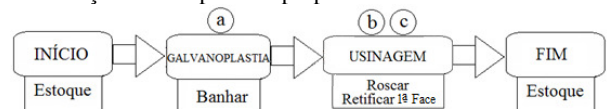


Nos processos descritos, o índice de perda média por lote de 1.000 peças é de 23,5 % nas diversas operações citadas. Após as etapas do processo de fabricação, os componentes aprovados e liberados pela auditoria da qualidade, são transferidos para o setor de montagem do MIM. Neste setor, o índice de perda média por lote de 1.000 peças é de 8,6 %, perfazendo um total de perda média por lote de 1.000 peças de 32,1 % dos componentes entre o processo de fabricação e de montagem.

2.1 Novo processo de fabricação

O desenvolvimento do novo componente proposto pelo método da metalurgia do pó permite um novo arranjo do processo produtivo de fabricação. As diversas possibilidades e recursos de fabricação pelo processo da metalurgia do pó permitem que o mesmo seja fabricado com as tolerâncias necessárias em ambas as faces, bem como, com as furações em sua estrutura, não necessitando estampar, lixar, furar, retificar as duas faces antes do banho galvânico, necessitando apenas o processo de roscar e retificar uma face do componente para retirar o banho de níquel na ponta dos pinos do cabeçote, conforme apresentado no fluxograma de produção da Figura 4.

Figura 4 – Esquema ilustrativo do fluxograma do novo processo de fabricação do componente proposto



O novo arranjo de produção proposto possibilita uma redução significativa no fluxograma de produção do CSB proposto em relação ao fluxograma de produção do CSB produzido por microfusão. A eliminação das outras etapas permite a liberação da mão de obra, máquinas e equipamentos para o desenvolvimento de outras atividades nos demais produtos fabricados pela empresa. Destacam-se, principalmente, as melhorias no arranjo de produção, eliminando-se sete etapas no processo de fabricação, mantendo-se as etapas a seguir, com as respectivas perdas em percentual nos processos:

a) galvanoplastia, 1,0 %

b, c) usinagem, 1,0 %

Desta forma, as perdas totais na etapa de fabricação totalizam 2,0 %.

2.2 Confeção dos corpos de prova

Utilizaram-se, para o desenvolvimento do presente estudo, as ligas ferromagnéticas de ferro-cobalto (Fe50Co) e ferro-silício-fósforo (Fe2SiP) sinterizadas e ferro-silício (Fe3Si) microfundida, conforme seus elementos químicos mostrados na Tabela 1. Foram produzidos corpos de prova de cada uma das ligas sinterizadas no formato de tarugos. Após o recebimento dos corpos de prova, os mesmos foram usinados para que tivessem o mesmo formato e dimensões do CSB atual produzido pelo processo de microfusão. Concluído o processo de fabricação foram montados cabeçotes com castelo de Fe2SiP sinterizado, com, Fe50Co sinterizado e com o Fe3Si microfundido. Também foram fabricadas amostras das três ligas no formato toroidal, para possibilitar a realização de ensaios para a caracterização magnética.

Tabela 1 – Elementos químicos das ligas estudadas, percentual em peso médio

Liga	Co	Si	P	Fe
Fe50Co	50,0			50,0
Fe3Si		3,0		97,0
Fe2SiP		2,0	0,8	97,2

2.3 Testes com as ligas

Testes foram realizados com as amostras produzidas para caracterizar o desempenho das ligas em estudo.

2.3.1 Medição do tempo de voo e de força das agulhas.

A velocidade desenvolvida pelas agulhas e a força de impacto destas sobre uma superfície são características importantes no projeto de um cabeçote. As agulhas do cabeçote devem acelerar e retornar à posição de repouso tão rápido quanto possível. A força de impacto das agulhas contra uma superfície deve ser suficiente para produzir a impressão de caracteres em um determinado número de cópias. O tempo de voo é igual ao tempo de deslocamento de uma agulha, desde o repouso até seu impacto contra a superfície a ser impressa.

Para análise do tempo de voo e a medição da força de

impacto das agulhas, utilizou-se uma bancada de testes disponibilizada na própria linha de montagem da indústria, composta por um osciloscópio marca Minipa, modelo MO1262, 60 MHz, uma célula de carga marca Menno, Modelo TF002, e uma giga de acionamento marca Menno, Modelo FC001. No ensaio para determinar o tempo de voo, quando um pulso de corrente é aplicado a uma bobina de um cabeçote, uma agulha é impulsionada contra a célula de carga. Com o osciloscópio é possível visualizar o sinal da tensão de saída da célula de carga em função do tempo e determinar o tempo de voo das agulhas. Para a medição da força de impacto, foram utilizados os mesmos CIM's confeccionados para a análise do tempo de voo das agulhas. A força de impacto foi medida por meio da célula de carga. Assim como nas medições do tempo de voo, um pulso de corrente é aplicado a uma bobina de um cabeçote. A força de impacto é obtida por meio do sinal de tensão de saída da célula de carga.

2.3.2 Medições da temperatura

As medições de temperatura foram realizadas com a instalação dos mesmos corpos de prova em bancadas de teste, com temperatura ambiente monitorada. As medições de temperatura foram realizadas com um medidor do tipo termopar, marca Fluke 80 TK, imprecisão de $\pm 1,1$ °C (0 à 260 °C). As medições tiveram por objetivo determinar a temperatura alcançada por cada liga após um tempo de 24 minutos de operação contínua do cabeçote com suas bobinas percorridas por corrente.

2.3.3 Ensaios de caracterização magnética

Os ensaios de caracterização magnética foram realizados no Laboratório de Metrologia Elétrica (LME) do Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT) da Universidade de São Paulo (USP) nas três versões das ligas desenvolvidas. Para os ensaios da curva de magnetização, cumpriram-se os procedimentos de ensaio CTPP-LMMC-PE03, CTPP-LMMC-PE11 e CTPP-LMMC-PE12, com as respectivas normas de referência; ASTM 343; ASTM A596; ASTM A772; ASTM A773; ABNT NBR 5161.

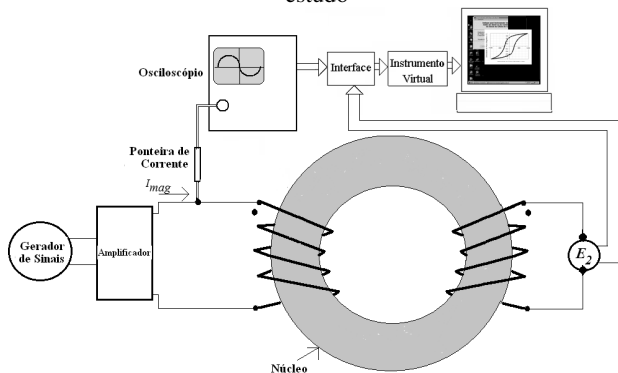
Testes foram realizados com o objetivo de obter-se o ciclo de histerese de cada um dos cabeçotes produzidos. Anéis de Rowland foram montados e testados. O anel de Rowland é construído a partir de um núcleo toroidal, em torno do qual são montadas duas bobinas de mesmo número de espiras, uma corresponde ao enrolamento primário, a outra, ao enrolamento secundário. Ambas são distribuídas uniformemente ao comprimento do toroide. Para a produção dos anéis de Rowland, foram fabricados núcleos toroidais das três ligas em estudo, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Núcleos toroidais de Fe₅₀Co (1), Fe₂SiP (2) e Fe₃Si (3), empregados na construção dos anéis de Rowland



Os testes foram realizados com tensão senoidal de baixa frequência aplicada ao enrolamento primário. Durante os testes, um anel de Rowland foi conectado a um circuito, conforme mostrado na Figura 6. O enrolamento primário foi conectado à saída de um gerador de funções, que fornece a corrente de excitação. Com o enrolamento primário percorrido por corrente, um fluxo magnético senoidal é estabelecido no núcleo ferromagnético. No enrolamento secundário é induzida uma força eletromotriz relacionada ao fluxo magnético estabelecido no núcleo. Durante os testes, produziram-se variações no valor da corrente de excitação, para a obtenção da curva de magnetização. Os valores da corrente de excitação foram medidos por meio da ponteira de corrente de um osciloscópio. A força eletromotriz induzida no enrolamento secundário foi medida por meio de um voltímetro de elevada impedância. O osciloscópio e o voltímetro são conectados ao computador e, por meio de um instrumento virtual, a corrente de excitação e a força eletromotriz são transformadas na intensidade de campo magnético e na densidade de fluxo magnético, respectivamente. Para isso, devem ser informadas as características geométricas da amostra e o número de espiras dos enrolamentos. Com o instrumento virtual é possível de se obter o ciclo de magnetização de cada liga em estudo e as características magnéticas, tais como a coercitividade magnética, a permeabilidade magnética e a remanência.

Figura 6 – Circuito para a caracterização magnética das ligas em estudo



3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados, a seguir, os resultados dos testes descritos na Seção 2.3. Cada ensaio foi repetido seis vezes, e os resultados representam a média das grandezas obtidas.

3.1 Ensaios de voo, força e temperatura

Na Tabela 2 são mostrados os resultados das medições do tempo de voo das agulhas. Em todas as três ligas ensaiadas, os tempos médios de voo foram semelhantes. As agulhas do cabeçote produzido com a liga de Fe₂SiP apresentam tempo de voo médio superior em relação às agulhas do cabeçote produzido com liga de Fe₃Si microfundida, com diferença percentual em 0,56 %. As agulhas do cabeçote produzido com liga de Fe₅₀Co apresentaram tempo de voo médio inferior em relação à liga de Fe₃Si, com diferença percentual de 0,37 %.

Tabela 2 – Tempo de voo das agulhas

Liga	Tempo médio de voo das agulhas (μs)	Diferença com relação ao Fe ₃ Si (μs)	Diferença com relação ao Fe ₃ Si (%)
Fe ₃ Si	590,0	-	-
Fe ₂ SiP	593,3	-3,3	-0,56%
Fe ₅₀ Co	587,8	2,2	0,37%

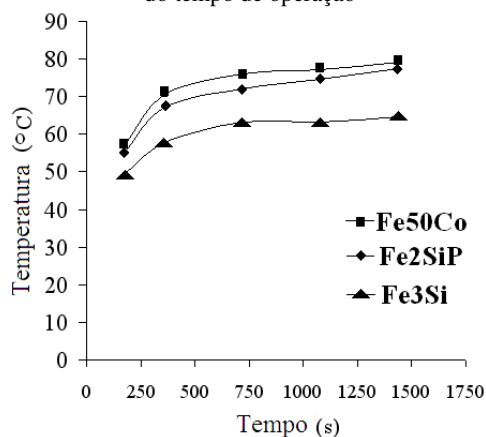
Os resultados das medições da força de impacto das agulhas contra uma superfície são mostrados na Tabela 3. As agulhas de cabeçotes produzidos com a liga de Ferro-Silício microfundida apresentam força superior em relação às demais ligas testadas. Agulhas do cabeçote produzido com a liga de Fe₂SiP apresentam uma força de impacto com diferença percentual de -31,25 % em relação à liga de Fe₃Si, e agulhas do cabeçote produzido com a liga de Fe₅₀Co apresentam diferença percentual de -52,59 % em relação à liga de Fe₃Si.

Tabela 3 – Valores médios da força de impacto das agulhas

Liga	Força de impacto (N)	Diferença com relação ao Fe ₃ Si (N) (%)	
Fe ₃ Si	46,4	-	-
Fe ₂ SiP	31,9	-14,5	-31,25%
Fe ₅₀ Co	22,0	-24,4	-52,59%

A medição de temperatura teve por objetivo verificar o comportamento térmico de cada cabeçote, após um tempo de operação contínuo de 24 minutos, com todas as suas bobinas percorridas por corrente. Foram realizadas medições da temperatura dos CSB em 180, 360, 720, 1080 e 1440 segundos. A Figura 7 mostra o gráfico dos valores de temperatura em função do tempo para cada uma das ligas.

Figura 7 – Temperatura atingida pelos corpos de prova em função do tempo de operação



Os resultados das medições de temperatura após 1440 segundos de operação mostram que a liga de Fe3Si tem desempenho superior na temperatura de operação, sendo 16,4 % menor se comparada à Fe2SiP, e 18,4 % menor comparada à liga de Fe50Co.

3.2 Ensaios de Caracterização Magnética

Os resultados dos ensaios para a caracterização magnética das ligas são apresentados na Tabela 4. O principal resultado a ser considerado é a coercitividade. A baixa coercitividade resultará em uma maior velocidade de impressão.

Quanto menor a coercitividade, mais facilmente ocorre a desmagnetização do material ferromagnético do cabeçote, permitindo o início de novo ciclo de impressão. Foram verificadas diferenças de 50 % e 200 % na coercitividade das amostras sinterizadas em relação à liga microfundida. Todavia, os valores são aceitáveis para a produção do castelo, visto que os valores de coercitividade apresentados pelas ligas sinterizadas não afetaram significativamente o desempenho dos cabeçotes.

Tabela 4 – Características magnéticas das ligas em estudo

Liga	Remanência		Coercitividade		Magnetização de saturação	
	T	%	A/m	%	A/m	%
Fe3Si	0,6	–	100	–	700	–
Fe2SiP	0,6	0	150	–50	650	7,14
Fe50Co	0,5	–16,67	300	–200	1100	57,14

3.3 Novo modelo geométrico

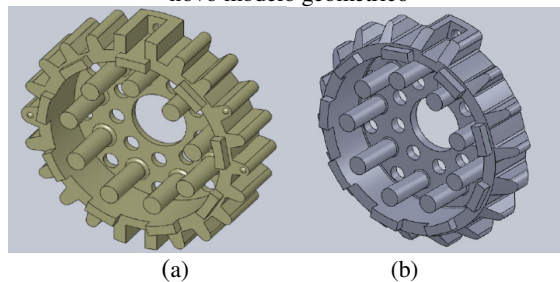
Após os resultados de desempenho apresentados, demonstrou-se a viabilidade de implantação do componente pelo processo da metalurgia do pó, porém este processo é mais oneroso economicamente em relação ao processo de fabricação pelo sistema de microfusão. Para compensar a diferença econômica entre o processo da metalurgia do pó em relação à microfusão, desenvolveu-se novo estudo geométrico do CSB, com significativa redução de massa. Como resultado, o novo modelo

geométrico (Figura 8) permitiu uma redução em 29,2 % da sua massa em relação ao componente atual, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Demonstrativo de redução de massa do novo modelo geométrico

Massa do modelo atual em gramas	Massa do modelo proposto em gramas	Redução da massa em gramas	Redução da massa em percentual
33,2	23,5	–9,7	–29,2%

Figura 8 – Castelo Suporte das Bobinas: (a) modelo atual; (b) novo modelo geométrico



3.4 Resultados econômicos e financeiros esperados

Os resultados econômicos e financeiros esperados no presente estudo de substituição do processo de microfusão pela tecnologia do pó são consequência da redução no tempo de produção, que está diretamente relacionado com os custos de mão de obra direta, o custo da mão de obra direta perdida com a rejeição e sucateamento dos componentes.

Por meio da redução de massa, o novo modelo geométrico compensa as diferenças no custo de fabricação do componente pelo processo de microfusão, que tem um menor custo em relação à tecnologia do pó.

Após o desenvolvimento dos corpos de prova, os mesmos passaram por novas medições e pelo processo de produção. Os testes demonstraram que o novo desenho geométrico não afetou as grandezas de interesse, apresentadas na Seção 3.1. Com base nas informações obtidas, dimensionou-se a economia que será gerada com a implantação do novo processo produtivo em relação ao processo atual. Esta análise é feita em tempo de trabalho e economia financeira, sempre considerando o volume médio de 72.000 unidades/ano de cabeçotes impressores fabricados pela indústria.

Os demonstrativos das atividades para análise econômica e financeira são apresentados para o componente microfundido e o componente sinterizado.

Na Tabela 6 é apresentado o resultado do tempo gasto em mão de obra com a produção do cabeçote com componente microfundido. Na Tabela 7 é apresentado o resultado do tempo gasto em mão de obra com a produção do cabeçote com componente sinterizado.

Tabela 6 – Tempo gasto em mão de obra com a produção 72.000 unidades/ano de cabeçotes com componente microfundido

Atividades	Fabricação	Montagem
A – Tempo em minutos por componente	4,67	16,43
B – Quantidade média de peças produzidas/ano	72.000	72.000
C – Tempo total com produção em minutos/ano (AxB)	336.240	1.182.960
D – Tempo total com produção em horas/ano (C/60 min)	5.604	19.716
Tempo total em horas/ano	25.320	

Tabela 7 – Tempo gasto em mão de obra com a produção 72.000 unidades/ano de cabeçotes com componente sinterizado.

Atividades	Fabricação	Montagem
A – Tempo em minutos por componente	1,13	16,43
B – Quantidade média de peças produzidas/ano	72.000	72.000
C – Tempo total com produção em minutos/ano (AxB)	81.360	1.182.960
D – Tempo total com produção em horas/ano (C/60 min)	1.356	19.716
Tempo total em horas/ano	21.072	

A diferença entre os tempos totais de fabricação apresentados nas Tabelas 6 e 7 resulta em 4.248 horas/ano economizadas com a substituição do castelo microfundido pelo castelo sinterizado. Na tabela 8 são apresentados os custos da mão de obra para a produção de 72.000 cabeçotes fabricados com castelo de liga microfundida. Na Tabela 9 são apresentados os custos de mão de obra para a produção de 72.000 cabeçotes fabricados com castelo de liga sinterizada.

Tabela 8 – Custo da mão de obra para produção de 72.000 unidades de cabeçotes com castelo microfundido.

Atividades	Fabricação	Montagem
A – Custo da mão de obra das atividades em Reais por componente	R\$ 1,52	R\$ 5,26
B - Quantidade média de componentes produzidos/ano	72.000	72.000
C – Custo total da mão de obra das atividades/ano (A x B)	R\$ 109.440,00	R\$ 378.720,00
Custo total	R\$ 488.160,00	

Tabela 9 – Custo da mão de obra para produção de 72.000 unidades de cabeçotes com castelo sinterizado.

Atividades	Fabricação	Montagem
A – Custo da mão de obra das atividades em Reais por componente	R\$ 0,60	R\$ 5,26
B - Quantidade média de componentes produzidos/ano	72.000	72.000
C – Custo total da mão de obra das atividades/ano (A x B)	R\$ 43.200,00	R\$ 378.720,00
Custo total	R\$ 421.920,00	

A diferença entre os custos totais (fabricação +

montagem) nas Tabelas 8 e 9 mostra que a substituição do castelo microfundido pelo castelo sinterizado gerará uma economia anual de R\$ 66.240,00 em termos de custos da mão de obra.

Nas Tabelas 10 e 11 é mostrado o tempo perdido com mão de obra em horas/ano, em função das perdas nas etapas de fabricação e montagem do castelo microfundido e do castelo sinterizado, respectivamente. A diferença entre os tempos totais (fabricação + montagem) encontrados nas Tabelas 10 e 11 mostra que a substituição do castelo microfundido pelo castelo sinterizado permitirá uma redução de 2.886,82 horas/ano no tempo perdido.

Tabela 10 – Tempo perdido com mão de obra, em função das perdas na produção de cabeçotes com castelo microfundido.

Atividades	Fabricação	Montagem
A – Tempo das atividades em minutos por componente	4,67	16,43
B – Quantidade média de componentes sucateados/mês	16.920	6.192
C – Tempo total perdido em minutos/ano (A x B)	79.016,40	101.734,56
D - Tempo total perdido em horas/ano (C/60 min)	1.316,94	1.695,58
Tempo total em horas/ano	3.012,52	

Tabela 11 – Tempo perdido com mão de obra, em função das perdas na produção de cabeçotes com castelo sinterizado.

Atividades	Fabricação	Montagem
A – Tempo das atividades em minutos por componente	1,13	16,43
B – Quantidade média de componentes sucateados/mês	1.440	360
C – Tempo total perdido em minutos/ano (A x B)	1.627,20	5.914,80
D - Tempo total perdido em horas/ano (C/60 min)	27,12	98,58
Tempo total em horas/ano	125,70	

Nas Tabelas 12 e 13 é mostrado o custo da mão de obra com o tempo perdido, em função das perdas nas etapas de produção do castelo microfundido e do castelo sinterizado, respectivamente. A diferença entre os custos totais (fabricação + montagem) encontrados nas Tabelas 12 e 13 mostra que a substituição do castelo microfundido pelo castelo sinterizado gerará uma economia anual de R\$ 55.530,72 em termos de redução do tempo perdido.

Tabela 12 – Custo da mão de obra com o tempo perdido na fabricação de cabeçotes com castelo microfundido.

Atividades	Fabricação	Montagem
A – Custo da mão de obra das atividades em Reais por componente	R\$ 1,52	R\$ 5,26
B - Quantidade média de componentes sucateados/ano	16.920	6.192
C – Custo total da mão de obra perdida/ano (A x B)	R\$ 25.718,40	R\$ 32.569,92
Custo total	R\$ 58.288,32	

Tabela 13 – Custo da mão de obra com o tempo perdido na fabricação do castelo sinterizado.

Atividades	Fabricação	Montagem
A – Custo da mão de obra das atividades em Reais por componente	R\$ 0,60	R\$ 5,26
B - Quantidade média de componentes sucateados/ano	1.440	360
C – Custo total da mão de obra perdida/ano (A x B)	R\$ 864,00	R\$ 1.893,60
Custo total	R\$ 2.757,60	

Nas Tabelas 14 e 15 é mostrado o custo dos cabeçotes sucateados, considerando as perdas nas etapas de fabricação e montagem do castelo microfundido e do castelo sinterizado, respectivamente. A diferença entre os custos totais (fabricação + montagem) encontrados nas Tabelas 14 e 15 mostra que a substituição do castelo microfundido pelo castelo sinterizado gerará uma economia anual de R\$ 127.445,76.

Tabela 14 – Custo dos castelos microfundidos sucateados.

Atividades	Fabricação	Montagem
A - Quantidade média de componentes sucateados/ano	16.920	6.192
B – Custo de aquisição da peça	R\$ 5,98	R\$ 5,98
C – Custo dos componentes sucateados (A x B)	R\$ 101.181,60	R\$ 37.028,16
Custo total	R\$ 138.209,76	

Tabela 15 – Custo dos castelos sinterizados sucateados.

Atividades	Fabricação	Montagem
A - Quantidade média de componentes sucateados/ano	1.440	360
B – Custo de aquisição da peça	R\$ 5,98	R\$ 5,98
C – Custo dos componentes sucateados (A x B)	R\$ 8.611,20	R\$ 2.152,80
Custo total	R\$ 10.764,00	

A substituição do castelo microfundido pelo castelo sinterizado representa uma redução nos custos de produção igual a R\$ 182.976,48 (R\$ 55.530,72 + R\$ 127.445,76), quando são considerados os custos dos castelos sucateados e os custos da mão de obra empregada na produção dos mesmos (custos envolvidos com as perdas). Conforme descrito anteriormente, a substituição do castelo propiciará uma economia de R\$ 66.240,00 em termos de custo de mão de obra na fabricação de 72.000 cabeçotes (Tabelas 8 e 9). Somando-se o valor gerado pela redução nos custos de produção em função da substituição do processo com o valor gerado em função da redução de sucata, obtém-se um total de economia gerada igual a R\$ 249.216,48. Os custos totais de fabricação de 72.000 cabeçotes com castelo microfundido são iguais a R\$ 488.160,00 (tabela 8) somados a R\$ 58.288,32 (tabela 12) e a R\$ 138.209,76 (tabela 14), totalizando R\$ 684.658,08. Assim, a substituição do processo poderá gerar uma economia de 36,4 % por ano nos custos de produção do cabeçote impressor.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um estudo desenvolvido para ser aplicado em uma indústria, com vistas a empregar uma técnica alternativa para a produção de um dos componentes de cabeçotes de impressoras matriciais.

Como pode ser observado, as medições do tempo de voo das agulhas apresentaram resultados semelhantes para os cabeçotes impressores testados, produzidos com castelos de Fe₂SiP sinterizado, de Fe₅₀Co sinterizado e de Fe₃Si microfundido. Com respeito à força, pode-se observar uma diferença entre as ligas testadas, sendo que as agulhas do cabeçote com castelo Fe₃Si microfundido apresentaram o maior valor de força. O valor inferior da força produzida pelas agulhas do cabeçote impressor com castelo de Fe₂SiP sinterizado pode comprometer a aplicação desta liga na totalidade das impressoras produzidas. A força de impressão das impressoras produzidas deve imprimir com nitidez a via original mais quatro cópias. Porém, os ensaios realizados mostram a possibilidade de sua aplicação em impressoras que devem imprimir uma via original mais duas cópias. Esta condição de impressão representa 95,0 % do mercado dos MIM produzidos pela empresa.

As modificações resultantes no arranjo do fluxograma de produção do CSB proposto resultarão em uma redução anual de 2.886,82 horas trabalhadas no processo de fabricação do CSB. Esta redução nas horas trabalhadas permitirá a disponibilização da mão de obra, máquinas e equipamentos para as outras atividades fabris da empresa.

A aplicação deste estudo permitirá à empresa um ganho econômico considerável, considerando os custos totais da mão de obra perdida com retrabalhos, componentes CSB sucateados e com a redução da mão de obra no novo fluxo de produção, por meio da economia de R\$ 249.216,48, ou redução de 36,4 % nos custos anuais de fabricação do MIM.

REFERÊNCIAS

- ALECRIM, E. **Introdução às Impressoras Matriciais**. Infowester 2007, São Paulo SP. Disponível em: <<http://www.infowester.com/impressoras.php>>. Acesso em: 13 mar. 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 343**: standard test method for alternating-current magnetic properties of materials at power frequencies using wattmeter-ammeter-voltmeter method and 25-epstein test frame. Philadelphia, 2008.
- _____. **ASTM A596**: Standard Test Method for Direct-Current Magnetic Properties of Materials. Using the Ballistic Method and Ring Specimens. Philadelphia, 2008.
- _____. **ASTM A772**: AC magnetic permeability of materials using sine current. Philadelphia, 2008.
- _____. **ASTM A773**: DC magnetic properties of materials using ring and permeameter. Procedures with DC Electronical Hysteresigraphs. Philadelphia, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5161**: produtos laminados planos de aço para fins elétricos. Rio de Janeiro, 2008.

- BRATS INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE PRODUTOS METÁLICOS ESPECIAIS LTDA. **PD cabeça de impressão matricial**. Descritivo. Cajamar, 2008.
- CALLISTER, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**, 2. ed., Rio de Janeiro, LTC, 2006.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica, Processos de fabricação e tratamento**. Volume II, 2. ed., São Paulo, McGraw-Hill, 1986.
- CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó**. 4. ed. São Paulo, ABM, 2001. PMID: 11395677.
- DIAS, M. de M.; DIAS, A. de M.; CÉZAR, J. L.; SCHAEFFER, L. Aplicação de Materiais Sinterizados em Núcleos Magnéticos, **Revista Tecnologia**, Revista do Centro de Tecnologia da Universidade Luterana do Brasil, v. 6, n. 1, jan./jun., 2005, p. 69-84, Canoas, ULBRA, 2005.
- HERMES, D. J.; DE VERNEY, J. C. K.; DA SILVEIRA, M. A. Substituição de microfusão pela tecnologia do pó aplicada ao mecanismo impressor. **Revista Ciência e Tecnologia**, v. 15, n. 26, p. 2-7, 2012.