

ESTUDO DE UM MINI MOTOR ELÉTRICO DE PASSO COM NÚCLEOS OBTIDOS A PARTIR DA MOLDAGEM DE PÓ POR INJEÇÃO

STUDY OF A MINI ELECTRIC STEPPER MOTOR WITH CORE OBTAINED FROM THE POWDER INJECTION MOLDING

Maiquel Emerson Pfingstag

Doutor em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).
Professor da Uri (Erechim/Brasil). E-mail: maiquelx@hotmail.com

Moisés de Mattos Dias

Doutor em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).
Professor da Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil). E-mail: moisesdias@feevale.br

Wilberth Harold Deza Luna

Doutor em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).
Professor no Centro Universitário SENAI CIMATEC (Salvador/Brasil). E-mail: wilberth.luna@fieb.org.br

Jorge Luiz Braz Medeiros

Doutor em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).
Professor da Universidade Federal do Rio Grande (Rio Grande/Brasil). E-mail: jorge.braz@ufrgs.br

Fernanda Albrecht Vechietti

Mestre em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).
Doutoranda pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil). E-mail: fernanda.vechietti@ufrgs.br

Lucas Dariel Ferreira

Acadêmico de Engenharia Eletrônica na Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil). E-mail: lucasdarielferreira@gmail.com

Lirio Schaeffer

Doctor Ing. Aachen University (Aachen/Alemanha).
Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil). E-mail: schaefer@ufrgs.br

RESUMO

O objetivo da presente pesquisa foi o estudo de um mini motor de passo de relutância de três fases e dois conjuntos de enrolamentos por fase, com dimensões menores que 1 cm para aplicação em endoscopia. O estudo baseou-se em motores de passo convencionais, onde os núcleos do rotor e estator, usualmente construídos a partir de chapas laminadas, foram substituídos por blocos maciços obtidos através da moldagem de pós por injeção. Os corpos de prova foram caracterizados quanto a suas propriedades físicas: magnéticas, elétricas e mecânicas. Todas as dimensões e correntes elétricas foram mantidas idênticas para ambos os núcleos e a partir das curvas de magnetização e do software de elementos finitos FEMM 4.2, foram simulados torque e fluxo de entreferro dos núcleos. O torque do mini motor desenvolvido ficou apenas 12% menor que o mini motor a partir de chapas. As propriedades magnéticas foram medidas a partir das curvas de histerese que mostraram um valor de retentividade de 0,15 T e coercitividade de 1.18 T. Os corpos de prova resultaram em uma resistividade elétrica aproximadamente de 0,3 $\mu\Omega\cdot\text{m}$, o que revela um potencial interesse da sua aplicação como núcleo de motores elétricos.

Palavras-chave: Mini motores. Moldagem de pós por Injeção. Simulação por elementos finitos.

ABSTRACT

The purpose of this research was study a mini reluctance stepper motor with three phase, two winding assembling and dimensions less than 1 cm for endoscopy applications. The research was based on conventional stepper motors, where the rotor core and stator, built from rolled sheets generally, were replaced by massive blocks obtained by means of powder injection molding process. The specimens were characterized in relation to their physical properties: magnetic, electrical and mechanical. The same dimensions and electrical currents were kept for both cores, and from the magnetization curves and finite element software FEMM 4.2 were simulated the torque and air gap magnetic flux. The torque developed MINI MOTOR was only 12% lower than the MINI MOTOR from plates. Magnetics properties were measures from hysteresis curves that showed a value of retentivity of 0.15 T and coercivity about to 180 T. The electrical resistivity of the specimens was about to 0,3 $\mu\Omega\cdot\text{m}$, which can represent a high interest to its application as core of electric motors.

Keywords: Mini motors. Powder injection molding process. Finite element simulation.

1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas podem funcionar como motor ou gerador, e possuem duas partes básicas que são os núcleos do estator e rotor. Estes núcleos, com raras exceções, são construídos a partir de finas lâminas metálicas (chapas de aço de baixo carbono) com espessura menor que 1 mm, agrupadas em pacotes de chapas. Algumas máquinas de melhor desempenho, como os geradores, são construídas com chapas de aço-silício, com percentual de aproximadamente 3% de silício. O processo total para confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, estampagem, um processo para isolamento elétrico entre as chapas adjacentes, empacotamento e fixação (NASAR, 1987; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2008).

Os núcleos do rotor e estator, dependendo da configuração da máquina, são envolvidos por enrolamentos alimentados por corrente elétrica contínua ou alternada. Núcleos magnéticos envolvidos por enrolamentos alimentados por corrente elétrica alternada ficam sujeitos à ação de correntes parasitas, também conhecidos por correntes de Foucault, que são responsáveis por apreciável perda de potência nestes núcleos. A construção destes núcleos magnéticos a partir de chapas de aço isoladas eletricamente reduz parcialmente as correntes parasitas, reduzindo as perdas por correntes de Foucault. Em alguns tipos de máquinas são colocados ímãs permanentes em substituição aos enrolamentos (ou do rotor ou estator) (NASAR, 1987; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2008).

Contudo, utilizando-se os processos da Metalurgia do Pó (M/P) é possível construir estes núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética (característicos dos aços magnéticos) e alta resistividade elétrica (JANSSON, 1992; KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997; RAMOS 2015).

Na medida em que for possível construir motores elétricos em blocos únicos e maciços, menos etapas estarão presentes na construção dos mesmos e menos energia será consumida na produção dos motores. Salienta-se, porém, que os motores elétricos convencionais com núcleos de chapas laminadas, geralmente, apresentam rendimento significativamente maior, se comparado a motores elétricos com núcleos maciços, mesmo aqueles obtidos a partir dos processos da metalurgia do pó. Assim, a aplicação da metalurgia do pó em núcleos de máquinas elétricas fica restrita a motores elétricos especiais, como os mini motores, onde o rendimento não é o critério mais importante, ou em alguns servos motores (JANSSON, 1992; KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997; RAMOS 2015).

Assim, este trabalho tem por objetivo o estudo de um mini motor de passo de relutância três fases e dois conjuntos de enrolamentos por fase, com dimensões menores que 1 cm, a ser utilizado em endoscopia (GIERAS, 2008). O projeto baseou-se em motores de passo convencionais, onde os núcleos do rotor e estator, usualmente construídos a partir de chapas laminadas, foram substituídos

por blocos maciços de uma liga ferrosa denominada de Catamold. O processo utilizado para obtenção dos corpos de prova para estudo das propriedades físicas do material foi a moldagem de pós por injeção. Assim, foram obtidos corpos de prova desta liga e, a partir dos mesmos, foram realizados ensaios para obtenção de propriedades físicas, como as propriedades magnéticas (permeabilidade, coercitividade e indução de saturação), elétrica (resistividade) e mecânica (dureza). Os corpos de prova foram injetados e tratados termicamente (extração do ligante e sinterização), na forma de anéis e cilindros, e dimensões próprias para obtenção das propriedades físicas. As propriedades magnéticas foram obtidas a partir de um traçador de curva de histerese. A partir da curva de magnetização, e do *software* de elementos finitos FEMM 4.2, foram simulados torque e fluxo de entreferro, considerando a mesma topologia do motor, a partir do Catamold em núcleos maciços, e a partir de núcleos convencionais de chapas laminadas, mantendo-se todas as dimensões e correntes elétricas idênticas para ambos os núcleos. Importante salientar que o Catamold, apesar de ser um material ferromagnético, não apresenta boas propriedades magnéticas, principalmente quanto à permeabilidade magnética que é bastante inferior. Entretanto, para este trabalho, justifica-se o uso do Catamold, pois um estudo bastante amplo sobre a moldagem de pós por injeção está sendo realizado, principalmente no que se refere à obtenção de peças consolidadas a partir da injeção de pós metálicos, como temperatura e pressão de injeção, tempo, temperaturas e atmosfera para extração térmica. Assim, para a obtenção do protótipo definitivo deste estudo, foi utilizada uma carga adequada para injeção, com melhores propriedades magnéticas, novas simulações e, caso seja necessário, fazendo-se pequenos ajustes nas correntes elétricas das bobinas para evitar saturação magnética (ou saturação de fluxo de entreferro).

2 NÚCLEOS DE MOTORES ELÉTRICOS A PARTIR DE PÓS METÁLICOS

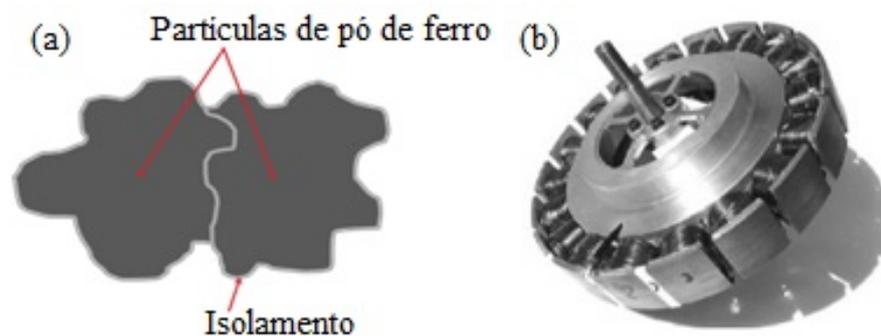
2.1 PROCESSOS DA METALURGIA DO PÓ E SUAS VARIAÇÕES

Alguns tipos de motores elétricos especiais possuem os núcleos do rotor e estator obtidos a partir de pós-metálicos, utilizando-se os processos da Metalurgia do Pó, ou suas variações:

- **Metalurgia do Pó Convencional:** A M/P é um processo relativamente recente da metalurgia de transformação, onde as peças são obtidas a partir dos pós-constituintes. Os processos básicos da M/P são: Obtenção dos pós e mistura, compactação e sinterização. Algumas vezes é necessária uma quinta etapa como a retificação. Na M/P os pós, depois de serem misturados, são compactados em matrizes onde adquirem a forma da cavidade da matriz. Após, são colocados em fornos para sinterização onde adquirem consistência e resistência mecânica (BRADBURY, 1986; GERMAN, 1984);

- **Materiais Micro encapsulados:** Soft Magnetic Composites ou simplesmente SMC, são basicamente partículas de pó ferromagnético, revestidas por filme isolante elétrico como polímeros e óxidos (figura 1-a). Componentes SMC são produzidos utilizando técnicas tradicionais de metalurgia do pó. O processo de produção desses componentes, em linhas gerais, consiste em compactação e posterior tratamento térmico para cura da resina ou consolidação. A figura 1-b mostra um núcleo do rotor de motor síncrono por produzido por SMC (MATS PERSSON, 1997);

Figura 1 – (a) Partículas de Pó Ferromagnético Micro encapsuladas com uma camada de isolante elétrico – (b) Núcleo de um motor síncrono fabricado



Fonte: Adaptado de Mats Persson (1997)

- **Moldagem de Pó Metálicos por Injeção:** A MPI (Moldagem de Pó por Injeção) é um processo de conformação mecânica utilizada para obtenção de peças com formas complexas, processo este muito semelhante à injeção de plásticos. Quando se trata da obtenção de peças metálicas, uma denominação mais específica é Moldagem de Pó Metálicos por Injeção ou MIM (*Metal Injection Molding*). A MPI é um processo alternativo da M/P (Metalurgia do Pó), que combina a M/P com a injeção. O processo consiste em uma mistura de pó (como pó-metálicos), com um aglomerante (basicamente ceras e polímeros). A mistura dos pó e aglomerantes são realizadas em um misturador a temperatura de liquefação do polímero, formando uma pasta, que após é resfriada cortada e triturada em moinhos de facas, resultando em um material compósito na forma de pequenos fragmentos, semelhantes a "*pellets*" para injeção de polímeros. Para a confecção da peça, o material obtido na etapa anterior é injetado em um molde, adquirindo a forma da cavidade. Após esta moldagem, é realizada a retirada do aglomerante por aplicação de solventes. Finalmente é realizada a extração completa do polímero por aquecimento,

processo este conhecido por sinterização. Como resultado, obtêm-se peças metálicas (no caso de MIM), de grande precisão com geometria e dimensões da cavidade, a menos das contrações que ocorrem na retirada dos aglomerantes (GERMAN; BOSE, 1990; MARTINS 2016). Em alguns processos alternativos, as extrações química e térmica são realizadas em um sistema de forno de esteira, em uma atmosfera capaz de realizar uma extração catalítica.

2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DE INTERESSE DE MATERIAIS PARA NÚCLEOS DE MOTORES ELÉTRICOS

As propriedades físicas de interesse para uso de um determinado material e processo em núcleos de máquinas elétricas rotativas ou motores elétricos estão relacionadas a seguir:

- Propriedades Magnéticas (coercitividade, permeabilidade, indução de saturação);
- Resistividade Elétrica;
- Propriedades Mecânicas (dureza ou ductilidade).

Com relação às propriedades magnéticas, os materiais a serem utilizados em núcleos de máquinas elétricas devem possuir: Elevada permeabilidade magnética, o que reduz a relutância do circuito magnético dos núcleos de ferro, concentrando todo o campo magnético no entreferro; elevada indução de saturação, o que possibilita trabalhar com maior fluxo magnético, resultando em maior torque na ponta de eixo. Baixa coercitividade o que reduz as perdas por ciclo de histerese (NASAR, 1987; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2008).

Com relação à resistividade elétrica, esta deve possuir o maior valor possível, para minimizar o efeito das correntes parasitas. Sempre que há a incidência de um fluxo alternado sobre um núcleo magnético, haverá também correntes induzidas (correntes parasitas ou de Foucault) sobre este núcleo. Tanto o estator como o rotor é construído com chapas laminadas e isoladas, uma vez que o isolamento entre chapas restringe as correntes induzidas a uma menor área de circulação. As perdas por correntes parasitas em um núcleo maciço são consideravelmente maiores que as perdas em núcleos obtidos a partir de chapas isoladas eletricamente. Quanto menor a espessura das chapas, menor são as correntes parasitas e menor a perda de potência nestes núcleos. A redução das correntes induzidas também pode ser obtida a partir do aumento da resistência elétrica do corpo, ou a partir do aumento da resistividade elétrica do material, uma vez que, resistência ou resistividade e corrente elétrica são grandezas físicas inversamente proporcionais. Por este motivo, motores elétricos de alto rendimento são construídos com

chapas de aço silício, que possui resistividade elétrica maior que o aço baixo carbono (NASAR, 1987; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2008).

Com relação às propriedades mecânicas, materiais possíveis de serem utilizados em núcleos de máquinas elétricas, devem suportar os esforços causados pelo torque resistivo da carga e vibrações entre outros. Assim, devem ser realizados ensaios de dureza ou ductilidade, curva de compressão x deformação ou curva de escoamento e avaliação de microestrutura.

Em resumo, o material utilizado na construção dos núcleos do estator e do rotor deve apresentar as seguintes propriedades:

- Elevada Permeabilidade Magnética Relativa;
- Baixa Coercitividade Magnética;
- Elevada Resistividade Elétrica;
- Elevada Indução de Saturação;
- Dureza e/ou Ductilidade Compatíveis com as vibrações as quais o motor é submetido.

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE MATERIAIS SINTERIZADOS

As propriedades físicas dos materiais obtidos por M/P convencional ou MPI (ou MIM) como, por exemplo, as magnéticas e elétricas, são influenciadas por vários fatores, sendo que, aqueles considerados de maior importância no desenvolvimento deste trabalho, estão relacionados a seguir:

- Geralmente, a resistividade de um elemento metálico aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas impurezas provocam distorções no reticulado cristalino. Por este motivo, ocorre um aumento da resistividade do ferro sinterizado, quando outros elementos como o Si, P ou Ni são adicionados (LUBORSKY; LIVINGSTON; CHIN, 1996).
- A maioria dos materiais metálicos ferrosos obtidos a partir da M/P ou MIM possuem resistividade elétrica maior do que materiais maciços de mesma composição química, devido, principalmente, à porosidade e a oxidação superficial das partículas (LALL, 1992) Com o aumento da porosidade, há uma diminuição da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade (JAMES; WILLIAMS, 1979).
- A resistividade elétrica para a maioria das ligas metálicas, também é função do tamanho de grão. Quanto menor o tamanho de grão, maior a quantidade de contornos de grãos, que também provocam

distúrbios na rede cristalina, aumentando a resistividade. Entretanto, a diminuição do tamanho de grão causa um decréscimo da permeabilidade magnética e um aumento da coercitividade (LANDGRAF; PLAUT, 1989).

- O aumento da granulometria do pó aumenta a permeabilidade magnética, mas aumenta também a coercitividade (MOYER, 1980). Além disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização também alteram algumas propriedades físicas (LALL, 1992).
- Impurezas como carbono, nitrogênio e oxigênio também afetam as propriedades magnéticas das ligas de ferro sinterizadas. Quando o objetivo é a obtenção de materiais magnéticos de boas propriedades, é conveniente que os percentuais destas impurezas sejam mantidos nos seguintes níveis: Carbono: 0,01% máximo, Oxigênio: 0,02% máximo, Nitrogênio: 0,01% máximo (LALL; BAUM, 1998).

Os materiais sinterizados mais comumente utilizados são os seguintes: (LALL; BAUM, 1998; LENEL, 1984; BAS; PUIG; MOLINS; 1988).

- Ferro Puro;
- Ligas Ferro-Cobalto;
- Ligas Ferro-Fósforo;
- Ligas Ferro-Silício e ligas Ferro-Fósforo-Silício;
- Aços Inoxidáveis Ferríticos;
- Ligas Ferro-Níquel.

2.4 MINI MOTORES E MOTORES DE PASSO

Motores miniaturizados ou mini motores tem configurações idênticas às máquinas rotativas convencionais, porém em dimensões reduzidas, sendo os mais comuns o motor de passo, o motor eletrostático e o motor de corrente contínua. Atualmente, muitos dispositivos médicos usam pequenos motores elétricos, os quais devem ter alta densidade energética, maior resistência à oxidação e curvas de magnetização estáveis durante longos períodos de tempo (GIERAS, 2008).

Os motores de passo possuem aplicabilidade em diversas áreas. São dispositivos eletromecânicos de movimento utilizados principalmente para converter informações em formato digital em movimento mecânico (ACARNLEY, 2002). Motores de passo podem ser vistos como motores elétricos sem comutadores. Tipicamente, todos os enrolamentos do motor fazem parte do estator, e o rotor ou é de ímãs permanentes ou, no caso de motores de relutância variável, um bloco dentado de algum material

levemente magnetizado (KENJO; SUGAWARA, 2000). Existem três tipos principais de motores de passo, motores de ímã permanente (PM – *Permanent Magnet*), motores de relutância variável (VR – *Variable Reluctance*) e motores híbridos (Hb – *Hybrid*).

2.5 SIMULAÇÃO POR SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS

Os resultados das iterações eletromagnéticas de uma máquina elétrica rotativa podem ser obtidos através de simulações em software de elementos finitos FEMM 4.2 (*Finite Element Method Magnetics*). A metodologia de elementos finitos tem como objetivo a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas. O objetivo principal é dividir o problema em um grande número de regiões, cada uma com uma geometria simples (e.g. triângulo). Em cada elemento a solução é aproximada através de uma interpolação dos valores de cada vértice do triângulo (Meeker, 2010).

Através do FEMM 4.2 é possível verificar dados importantes tais como o torque momentâneo da máquina elétrica, o fluxo concatenado em cada bobina e as perdas por corrente de Foucault. O conhecimento destes resultados permite ao projetista verificar a eficiência do motor e as propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o ponto ideal de trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CORPOS DE PROVA

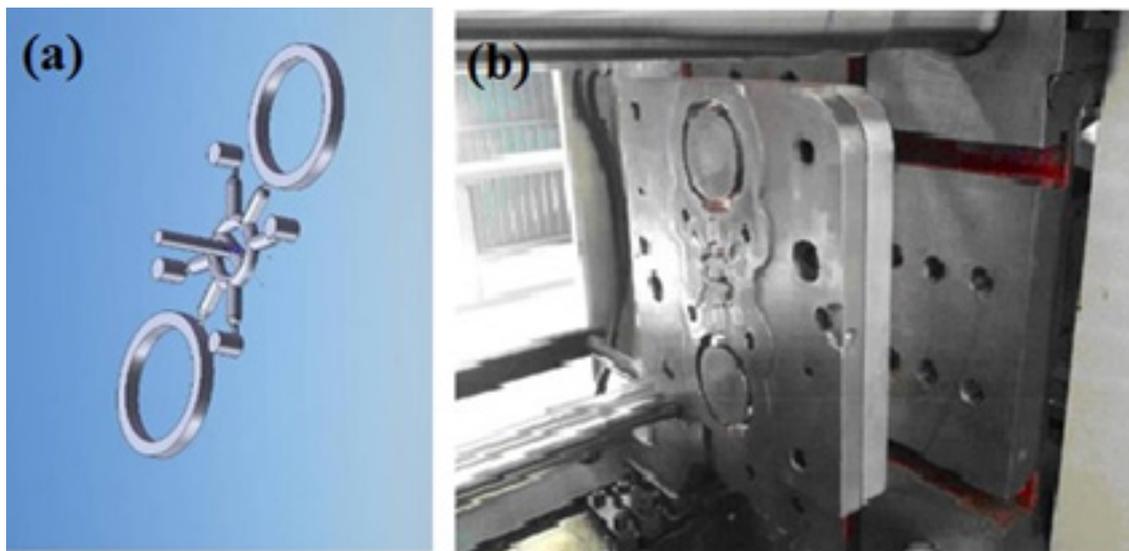
Os corpos de prova foram definidos na forma de um cilindro, para análise das propriedades mecânicas e estruturais e na forma de anel para análise das propriedades eletromagnéticas, conforme mostra o desenho dimensional da figura 2.

3.1.1 Matriz e Injetora

A matriz foi projetada de maneira a conformar peças com dimensões superiores em 20% aos corpos de prova consolidados, devido à contração que as peças sofrem no processo de retirada do aglomerante. Salienta-se que a matriz desenvolvida tem por objetivo o estudo de diversas ligas e cargas a serem estudadas em corpos de prova confeccionados na mesma matriz. Por este motivo, arbitrou-se um valor médio de contração para este cálculo.

A figura 2-a mostra uma vista em perspectiva do formato dos corpos de prova injetados, contendo quatro cilindros e dois anéis. A injetora utilizada foi uma Apta 80 / Himaco, cuja figura 2-b mostra a matriz montada na injetora.

Figura 2 – (a) Formato dos corpos de prova – (b) Matriz montada na injetora



Fonte: Arquivo LDTM (2014)

Com relação à matriz para injeção dos corpos de prova, foram realizadas modificações, como alterações no sistema de extração das peças e, principalmente, foi acoplado à matriz, um sistema para aquecimento da mesma, possibilitando assim que o bloco da cavidade de injeção se mantenha a temperaturas próximas dos 100 °C. Assim, foram inseridas resistências elétricas no bloco da matriz (figura 2-b), além do desenvolvimento (projeto e construção) de um dispositivo elétrico-eletrônico para controle da temperatura e alimentação das resistências. O sensoriamento é realizado a partir de um termopar tipo K, o controle a partir de um controlador de forno convencional e de um relé de estado sólido. A partir da instalação deste sistema foi possível realizar injeções com controle de temperaturas bem preciso.

3.1.2 Obtenção dos Corpos de prova

Para a obtenção dos corpos de prova foi utilizado o material comercial Catamold 8620 (BASF), e as suas características obtidas a partir da carga injetada e sinterizada estão relacionadas, conforme tabela 1.

Tabela 1 - Relação das propriedades do material Catamold 8620 utilizado para a obtenção dos corpos de prova

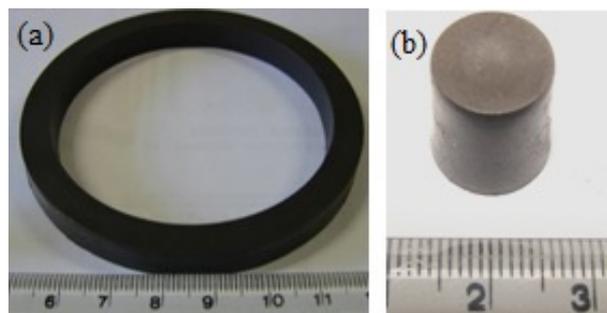
Material	Composição	Densidade	Tensão de escoamento	Tensão de ruptura	Dureza
AISI/SAE 8620	C(0,12–0,23%) - Cr (0,4–0,6%) - Mo(0,15–0,25%) - Ni(0,4–0,7%) - Fe (% balanço)	$\geq 7,4 \text{ g/cm}^3$	≥ 400	$\geq 650 \text{ MPa}$	190 - 230 HV 10 $\geq 650\text{HV}$ 1 $\geq 800\text{HV}$

Fonte: BASF (2014)

Os corpos de prova (figura 3) foram injetados em uma injetora modelo Apta 80 / Himaco (figura 2-b) a uma temperatura de 140 °C para o bico e as zonas intermediárias e para o molde foi utilizada uma temperatura de 90 °C. A pressão de injeção utilizada foi 38,8 MPa, para este cálculo utilizou-se 20% da máxima pressão estipulada para a rosca de 35mm.

Em seguida, as peças foram inseridas em forno contínuo onde primeiramente ocorre uma extração catalítica dos polímeros e ceras em uma câmara, contendo uma névoa de ácido nítrico. Posteriormente, a peça foi submetida a sinterização em atmosfera gasosa com uma de nitrogênio e hidrogênio a 1200 °C. A figura 2-a mostra um corpo de prova na forma de anel e na forma de cilindro (figura 3-b).

Figura 3 – Corpos de prova – (a) forma de anel – (b) forma cilíndrica



Fonte: Arquivo LDTM (2014)

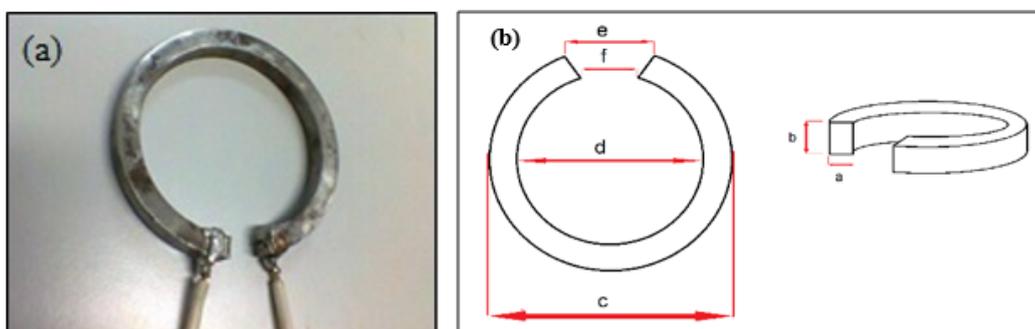
3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades magnéticas foram obtidas a partir das curvas de histerese (laço de histerese e curva de magnetização), que relacionam campo magnético **H** aplicado a um material, com a indução

magnética B resultante. A partir do laço de histerese, foram obtidas a retentividade (magnetismo remanente) e a coercitividade (campo desmagnetizante). A partir da curva de magnetização, foram obtidas a permeabilidade magnética e a indução de saturação ou Indução máxima (que também pode ser visualizada a partir do laço de histerese) (JILES, 1991). A determinação das propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel (toróide), segue a norma ASTM A773 (*Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresigraphs*). As curvas de histerese foram obtidas a partir de um dispositivo modelo TLMP-TCH-14.

A determinação da resistividade do material (corpos de prova), da liga injetada, foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica. A medição de resistência elétrica foi realizada através de multímetro. Entretanto, para medição de resistência elétrica muito baixa, aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. Portanto, o corpo de prova para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida. Um artifício é a utilização de anel cortando-se um segmento do mesmo, fazendo que este tenha a forma de uma barra curvada, ou seja, de grande comprimento e pequena área de seção transversal. A figura 4-a mostra a fotografia de um segmento de um anel com fios de cobre ou terminais soldados para medida da resistência elétrica e em consequência à resistividade, e a figura 4-b mostra o desenho esquemático. A tabela 2 mostra as medidas dos anéis onde A é área da seção transversal e l o comprimento (perímetro do anel descontando o segmento cortado). A tabela 2 mostra a média de três corpos de prova.

Figura 4 – Corpos de prova na forma de anel segmentado para medida da resistividade elétrica – (a) fotografia – (b) desenho esquemático com as dimensões



Fonte: Arquivo LDTM (2014)

Tabela 2 – Dados dimensionais dos anéis segmentados para medição da resistividade elétrica

A [mm]	B [mm]	C [mm]	d [mm]	E [mm]	f [mm]	A [m ²]	l [m]
6,20	6,63	70,1	57,33	12,80	12,20	4,11E-0,5	0,19

Fonte: Arquivo LDTM (2014)

Para avaliação da resistência à vibração de um material a ser utilizado em uma máquina elétrica rotativa, também, foram realizados ensaios mecânicos nos corpos de prova injetados. Os ensaios de dureza foram realizados em um durômetro com indentador de esferas de 2,5 mm e carga de 100 kgf. Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de ensaios universal Emic DL20000 onde, geralmente, utilizam-se velocidades de 1,5 a 3,0 mm/min.

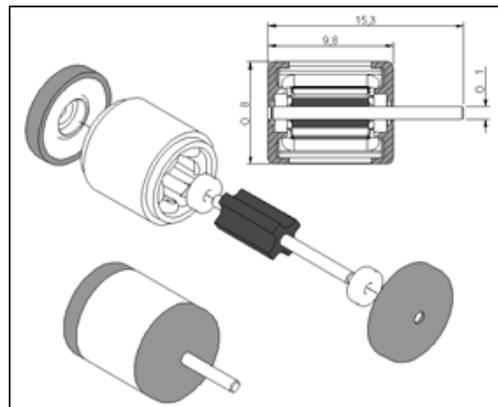
3.3 TOPOLOGIA DO MINI MOTOR E SIMULAÇÕES

A figura 5 mostra a topologia do motor de passo simulado. As características de bobinamento e corrente utilizadas para simulação estão relacionadas a seguir:

- Bobinamento com fio bitola 44 AWG
- 196 espiras para cada pólo (392 por fase)
- Corrente de 0,04A

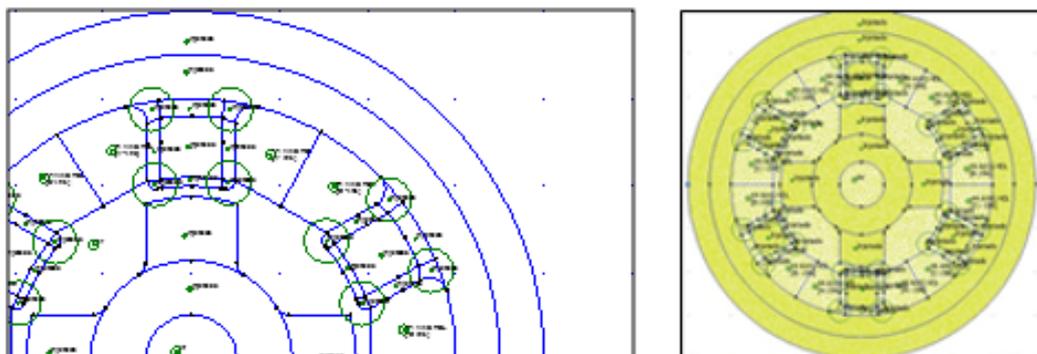
Para a simulação do motor proposto, foi utilizado o software de elementos finitos FEMM 4.2, onde foram inseridas a topologia do motor, características do bobinamento e a curva de magnetização do material dos núcleos do rotor e estator (figura 7-b). O acionamento foi definido com 3 fases (A, B e C). Considerando 6 saliências no estator, ou seja, 2 saliências por fase, resulta em um passo com o deslocamento angular de 60° e para acionamento de ½ passo em deslocamento angular de 30°. A figura 6-a mostra o detalhamento do pré-processamento da simulação e a figura 6-b mostra o detalhe da malha do fluxo magnético no interior do motor.

Figura 5 – Topologia do Motor de Passo simulado



Fonte: Arquivo LDTM (2014)

Figura 6 – Detalhamento da simulação – (a) Pré-processamento – (b) Detalhe da malha



Fonte: Arquivo LDTM (2014)

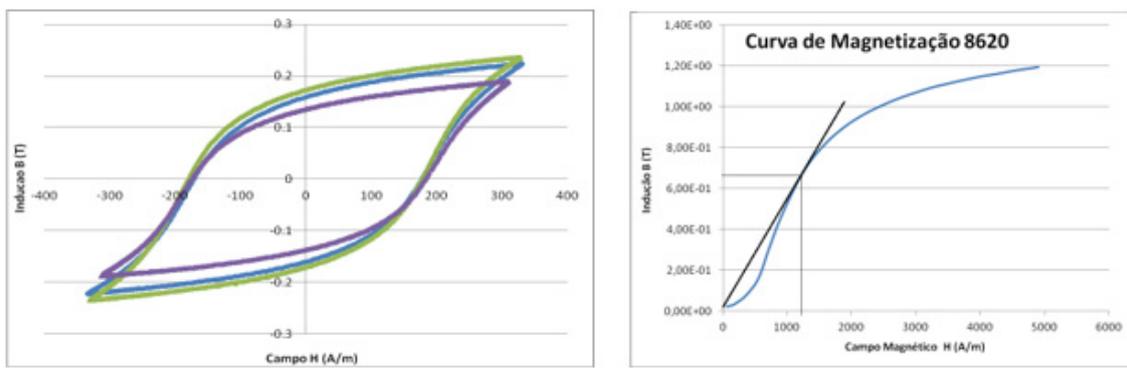
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova obtidos na (figura 3) apresentaram densidade (considerando a média de três espécimes de cada geometria) de $7,5 \text{ g/cm}^3$, apresentando valor dentro das especificações do material Catamold definido pelo fabricante como $\geq 7,4 \text{ g/cm}^3$ (BASF, 2014). Conforme pode ser vista da tabela 2 o ferro puro sinterizado apresenta uma densidade aproximada de $7,2 \text{ g/cm}^3$ (LENEL, 1984; BAS; PUIG; MOLINS, 1988).

A figura 7-a mostra curvas de histerese sobrepostas (para três corpos de prova), e figura 7-b mostra a curva de magnetização para um dos corpos de prova. As propriedades magnéticas de retentividade e coercitividade foram obtidas a partir da curva de histerese e a permeabilidade magnética relativa a partir da curva de magnetização.

Figura 7 – Gráficos magnéticos – (a) Curvas de histerese – (b) Curva de magnetização



Fonte: Arquivo LDTM (2014)

A retentividade média de três corpos de prova resultou em aproximadamente 0,15 T e a coercitividade em aproximadamente 180 A/m. O ferro puro sinterizado apresenta uma retentividade aproximada de 1,18 T e uma coercitividade aproximada de 127 A/m (tabela 2) (LENEL, 1984; BAS; PUIG; MOLINS, 1988). Pode-se observar que, a coercitividade de ambos materiais são valores próximos, porém a retentividade ou magnetismo remanente do ferro puro sinterizado é aproximadamente 8 vezes maior. A permeabilidade foi obtida a partir da curva de magnetização (figura 7-b), através da razão entre a indução magnética e o campo magnético aplicado, ou a declividade da reta tangente, conforme a equação 1.

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{0,65}{1200} = 5,42 \times 10^{-4} \Rightarrow \mu_r = \frac{\mu}{\mu_o} = \frac{5,42 \times 10^{-4}}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 431,06 \quad \text{[equação 1]}$$

Onde **B** é a indução magnética [T], **H** o campo magnético [A/m], **μ** a permeabilidade magnética [H/m], **μ_r** a permeabilidade relativa, **μ_o** a permeabilidade magnética do vácuo.

A média dos três corpos de prova resultou numa permeabilidade magnética relativa (máxima) de 430. O ferro puro sinterizado apresenta uma permeabilidade relativa aproximada de 3.000, conforme mostra a tabela 2 [16,17], porém, apesar do Catamold ser um material com características ferromagnéticas, este possui baixa permeabilidade magnética.

Para a medição da resistividade, utilizaram-se anéis (figura 4), aplicando uma corrente elétrica e medindo-se a tensão a partir de um milivoltímetro, considerando as dimensões da tabela 1, conforme equação 2:

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{l} = \frac{0,0042.V}{3.A} \cdot \frac{0,0000411.m^2}{0,19.m} = 0,000000303.\Omega.m = 0,303.\mu.\Omega.m \quad [\text{equação 2}]$$

Onde ρ é a Resistividade Elétrica [$\mu\Omega.m$], R a Resistência Elétrica [Ω], V a Tensão Elétrica Aplicada [V], I a Corrente Elétrica Aplicada [A], A Área da Seção Transversal da Barra [m^2], l o Comprimento da Barra (ou segmento de um anel) [m]

A média dos três corpos de prova resultou numa resistividade elétrica aproximada NS, 1988), onde pode-se observar que, o Catamold possui maior resistividade elétrica que o ferro sinterizado, o que é uma boa característica para uso em núcleo de motores elétricos, pois reduz as correntes parasitas.

A dureza média obtida foi de 86,88 HRB onde os parâmetros utilizados foram 100 kgf de carga do indentador e pré-carga ajustada pelo equipamento. A elasticidade na região linear do material foi observada a partir da curva de compressão x deformação, estando dentro dos valores aceitáveis para esta aplicação.

A Tabela 3 mostra os resultados das propriedades físicas obtidas da liga injetada, comparativamente ao Fe puro sinterizado.

Tabela 3 – Propriedades físicas das liga Injetada-Catamold e ferro puro sinterizado

Material	ρ [$\mu\Omega.m$]	Br [T]	Hc [A/m]	μ_{rmax}	ρ_m [g/cm ³]	D [HRB]
Catamold 8620	0,30	0,15	200	430	7,5	86,88
Fe Puro (*) Sinterizado	0,12	1,18	127	3.000	7,2	-
Fe Puro (**) Sinterizado	0,15	0,90	448	1.850	6,6	52,07

Onde ρ é a Resistividade Elétrica, **Br** é a Retentividade, **Hc** é a Coercitividade, μ_r é a Permeabilidade Magnética Relativa, ρ_m é a Densidade, e **D** a Dureza

(*) Valores obtidos a partir de referências bibliográficas (LENEL, 1984; BAS; PUIG; MOLINS, 1988)

(**) Valores obtidos experimentalmente

Fonte: Arquivo LDTM (2014)

4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MINI MOTOR

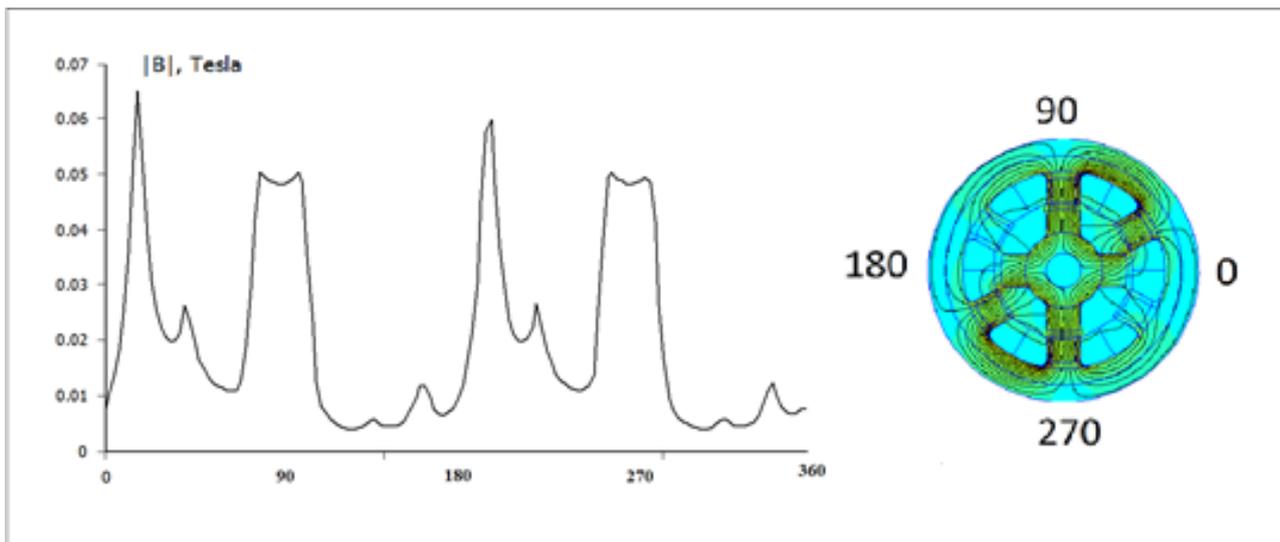
A Tabela 4 mostra os resultados das grandezas elétricas e magnéticas obtidas a partir da simulação, considerando as três fases (Circuitos A, B e C). A figura 8 mostra a densidade de fluxo de entreferro e a plotagem do vetor Potencial, também obtidas a partir do *software* de simulação FEMM 4.2.

Tabela 4 – Grandezas elétricas e magnéticas obtidas a partir da simulação

	Total Current Amps	Voltage Drop Volts	Flux Linkage Webers	Flux Current Henries	Voltage Current Ohms	Power Watts
Circuito A	0.04	2.117	0.000190	0.00475	52.936	0.0847
Circuito B	-0.04	-2.117	-0.000153	0.00383	52.936	0.0847
Circuito C	0,00	0,00	-0,000030	0,00	0,00	0,00

Fonte: Arquivo LDTM (2014)

Figura 8 - Densidade de fluxo de entreferro



Fonte: Arquivo LDTM (2014)

A partir da figura 8 pode-se observar que a indução magnética de entreferro apresenta valores máximos entre 0,05 a 0,065 T. Salienta-se que, o torque desenvolvido na ponta de eixo do motor é proporcional ao fluxo magnético de entreferro. Uma máquina elétrica rotativa, dependendo da configuração pode trabalhar com fluxos de entreferro bem superiores, na faixa de 1T. Pode-se aumentar o fluxo de entreferro, aumentando a corrente elétrica das bobinas, porém estas correntes também dependem do tipo de fio utilizado no bobinamento (NASAR, 1987; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2008). Assim, com o redimensionamento das bobinas (diâmetro dos fios e números de espiras) e da corrente elétrica, para mesma topologia, pode-se desenvolver mais torque na ponta de eixo do motor.

O *software* FEMM também calculou o **Torque Resultante = 0.806 gf*mm** e a **Co-energia do Campo Magnético = 0,232 μJoule**, onde os valores relacionados são a média de três simulações para três curvas de magnetização. Utilizando-se o FEMM 4.2, calculou-se também o torque de um motor de mesmas dimensões, mesmo bobinamento e mesmas correntes elétricas, porém com núcleo do rotor e estator construídos a partir chapas do aço elétrico ABNT 35F 420M de 0,35 mm de espessura, resultando em um torque de **0,902 gf*mm**.

5 CONCLUSÕES

As propriedades físicas dos corpos de prova obtidos a partir do Catamold (aço 8620 injetado) permitiram obter corpos de prova com excelente acabamento superficial, sem trincas superficiais e com uma densidade dentro da faixa indicada pelo catálogo do fabricante do material.

As propriedades magnéticas de retentividade e coercitividade estão de acordo com parâmetros previstos para materiais magnéticos macios sinterizados, comparativamente ao ferro puro sinterizado obtido por Metalurgia do Pó convencional.

A permeabilidade magnética relativa máxima foi relativamente pequena, comparada ao ferro puro sinterizado, porém, isto se justifica uma vez que, apesar de o Catamold ser um material com características ferromagnéticas, o mesmo não é adequado para aplicações em peças magnéticas.

A resistividade elétrica resultou em um valor superior ao ferro puro sinterizado, característica apropriada para redução de correntes parasitas quando utilizado em núcleos de motores elétricos.

Com relação à simulação por elementos finitos, pode-se concluir que a simulação de torque do motor construído com núcleos do Catamold injetado, comparativamente ao motor com núcleos de chapas laminadas ficou em um valor apenas 12% menor. Portanto, para a construção deste motor por moldagem de pós por injeção, basta utilizar-se um material com maior permeabilidade magnética, que consequentemente o torque será maior.

A partir de um redimensionamento das bobinas (diâmetro dos fios e número de espiras) e da corrente elétrica, conservando-se a mesma topologia do motor, será possível desenvolver um motor com maior torque na ponta de eixo.

REFERÊNCIAS

ACARNLEY, P. P. **Stepping Motors: A guide to Theory and Practice**, 4. ed. 2002.

BAS, J. A.; PUIG, J.; MOLINS, C.B. Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art. *Modern Developments in Powder Metallurgy*, Princeton, New Jersey. **Metal Powder Industries Federation**, v. 18, 1988. p. 745-756.

BASF – Características do Material Catamold AISI/SAE 8620, 2014.

- BRADBURY, S. Powder Metallurgy Equipment Manual. New Jersey, USA: MPIF, 1986. 199p.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Jr. C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 6 ed. New York: Bookman, 2008.
- GERMAN, R. M.; BOSE, A. Powder Injection Molding. **Ed. MPIF, USA**, p. 520, 1990.
- GERMAN, R. M. **Powder Metallurgy Science**. New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1984, 279p.
- GIERAS, J. F. Advancements In Electric Machines. **Power Systems**, 2008, p135-156.
- JAMES, B. A.; WILLIAMS, G. **Review of the Magnetic Properties of Sintered Iron**. Powder Metallurgy, v. 22, n. 2, 1979. p. 75-85.
- JANSSON, P. Soft Magnetic Materials for A. C. Applications. Hoeganes A. B., Hoeganes Swed. **Powder Metallurgy**, v. 35, n. 1, 1992. p. 63-66.
- JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. London: Chapman and Hall, 1991, 440p.
- KENJO, T.; SUGAWARA, A. Stepping Motors and Their Microprocessor Controls, 2ª ed. Oxford, 2000.
- KRAUSE, R. F.; BULARZIK, J. H.; KOKAL, H. R. New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications. Magnetics Inc, Burns Harbor, IN, USA. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 6, n. 6, dec. 1997, p. 710-712.
- LALL, C. The Effect Sintering Temperature and Atmosphere on the Soft Magnetic Properties of P/M Materials. **Advances in Powder Metallurgy**, v. 3, 1992.
- LALL, C; BAUM L. W. High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Metal Injection Molding. **Modern Developments in P/M**, v. 18, 1998. p. 363-389.
- LANDGRAF, F. J. G.; PLAUT, R. L. Efeito do Tamanho de Grão na Permeabilidade Magnética Máxima da Liga Ferro 47,5% Níquel, Metalurgia. **ABM**, v. 45, n. 380, 1989. p. 677-681.
- LENEL, F. V. Magnetic Applications. **Metals Handbook**, v. 7, 1984, p. 638-641.
- LUBORSKY, F. E.; LIVINGSTON, J. D.; CHIN, G. Y. **Magnetic Properties of Metals and Alloys**. Physical Metallurgy. Amsterdam: Elsevier Science, 1996.

PERSSON, Mats. **SMC Update**, v. 1, n, 1, apr. 1997.

MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics**. FEMM 4.2 User's Manual, 2010.

MOYER, K. H. **The Effect of Proposity on the Properties of Iron Compacts**. Riverton: N. J. Hoeganes Corporation, 1980.

NASAR, S. A. **Handbook of Electric Machines**. New York: McGraw-Hill, 1987.