

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE UMA FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO DO PROCESSO DE ACABAMENTO
MAGNÉTICO-ABRASIVO CILÍNDRICO INTERNO EM MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

por

Willian Soares Marques Wiegand

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, julho de 2014.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DE UMA FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO DO PROCESSO DE ACABAMENTO
MAGNÉTICO-ABRASIVO CILÍNDRICO INTERNO EM MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

por

Willian Soares Marques Wiegand

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Tiago Becker

Prof. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho

Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner

Porto Alegre, 11 de julho de 2014.

Dedico este trabalho à minha esposa, Irian Emily Burkievicz Marques Wiegand, pela incansável dedicação, compreensão pelas ausências e parceria desde início e para uma vida toda.

Dedico também a Leandro Sandri de Vasconcelos, grande amigo que nunca deixou de desacreditar que eu conseguiria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao prof. Heraldo Amorim pelo conhecimento passado e principalmente pela parceria e ideias para solucionar problemas no final do trabalho, onde agradeço também à toda equipe do LAMECC, bem como o prof. Roberto Homrich do LMEAE.

Agradeço a toda Equipe do Laboratório de Usinagem pelo espaço, equipamentos e apoio concedidos durante toda a execução do trabalho.

Agradeço também a empresa Favorit, representada por Gelson e Betina pela parceria em fornecer matéria prima para os corpos de prova.

Agradeço a todos que ao longo do trabalho prestaram apoio e solidariedade, mas não foram citados pessoalmente.

WIEGAND, W.S.M. **Estudo de uma Ferramenta para Aplicação do Processo de Acabamento Magnético-abrasivo Cilíndrico Interno em Materiais Ferromagnéticos**. 2014, 27f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o estudo de uma ferramenta que permita a aplicação do processo de acabamento magnético-abrasivo na superfície interna de tubos de material ferromagnético. O uso de uma abordagem simples de sistemas magnéticos no dimensionamento do eletroímã se mostrou ineficaz de reproduzir fenômenos como a saturação magnética do núcleo e a formação de relutâncias parasitas que reduzem a densidade de fluxo magnético no entreferro, produzindo uma ferramenta inadequada ao uso neste processo.

PALAVRAS-CHAVE: Acabamento Magnético-Abrasivo Cilíndrico Interno, Saturação Magnética do Núcleo, Densidade de Fluxo Magnético .

WIEGAND, W.S.M. **Tool Study for Internal Cylindrical Magnetic-abrasive Finishing Process on Ferromagnetic Materials.** 2014, 27f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

The purpose of this work is to study a tool that allows the application of magnetic-abrasive finish on the inner surface of pipes of ferromagnetic material process. The use of a simple magnetic systems approach in the design of the electromagnet proved ineffective to reproduce phenomena as magnetic core saturation and the formation of parasites reluctances which reduce the magnetic flux density in the air gap, producing an improper tool for use in this process.

KEYWORDS: *Cylindrical internal magnetic-abrasive Finishing, magnetic core saturation, magnetic induction.*

ÍNDICE

Pág.

1.	Introdução.....	1
2.	Revisão Bibliográfica.....	1
2.1.	Circuitos Magnéticos.....	1
2.2.	Comportamento Magnético de Materiais Ferromagnéticos	3
2.3.	Acabamento Magnético-abrasivo.....	3
2.3.1.	Posicionamento da Ferramenta(Limitações)	4
2.3.2.	Estado da Arte	5
3.	Procedimento Experimental	6
3.1.	Preparação dos Corpos de Prova	8
3.2.	Cálculo dos Parâmetros Magnéticos do Eletroímã.....	Erro! Indicador não definido.
3.2.1.	Dimensionamento do Enrolamento	Erro! Indicador não definido.
3.2.2.	Alimentação do Eletroímã	Erro! Indicador não definido.
3.3.	Definição dos Parâmetros para Ensaio	9
4.	Resultados e DiscuSSão	10
4.1.	Avaliação do Ensaio	10
4.2.	Avaliação do Eletroímã	10
4.3.	Fatores Negligenciados	11
4.4.	Nova Proposta de Ferramenta.....	13
5.	Conclusões	13
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
	APÊNDICE I – TABELA DE RUGOSIDADES DOS CORPOS DE PROVA	16
	APÊNDICE II – PARÂMETROS DE ENSAIO	17
	APÊNDICE III – SIMULAÇÃO FEMM 4.2.....	18

1. INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação por usinagem representam parte significativa dos custos de produção na indústria. Alguns destes processos visam a obtenção de acabamento superficial, seja para características estéticas, tolerâncias dimensionais ou características que interferem diretamente na resistência da peça.

O processo de acabamento magnético-abrasivo tem como diferencial a formação de uma ferramenta que se molda ao formato da peça, fazendo com que a remoção de material seja mais eficaz em arestas onde há a formação de rebarbas sem alterar significativamente as dimensões originais da peça. A sua aplicação em superfícies internas de materiais ferromagnéticos normalmente encontra dificuldades no posicionamento da ferramenta, geralmente um eletroímã, principalmente em peça de pequenas dimensões.

O cálculo de eletroímãs para utilização como ferramenta deste processo geralmente é tratado como um circuito magnético simples e com propriedades constantes. Esta abordagem é uma simplificação útil para vários casos na literatura, mas há momentos em que é necessária uma abordagem mais completa para análise de outros fatores normalmente negligenciados.

O objetivo principal deste trabalho é aprimorar os conceitos desenvolvidos no âmbito da universidade, visando obter ferramentas mais eficientes. Como objetivos secundários pode se citar a aplicação mais abrangente do processo, através da variação de mais parâmetros relevantes em outros estudos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Circuitos Magnéticos

Um circuito magnético básico é composto por um núcleo ferromagnético com um enrolamento de N espiras por onde circula uma corrente elétrica i , gerando um fluxo magnético Φ orientado conforme a Figura 2.1.

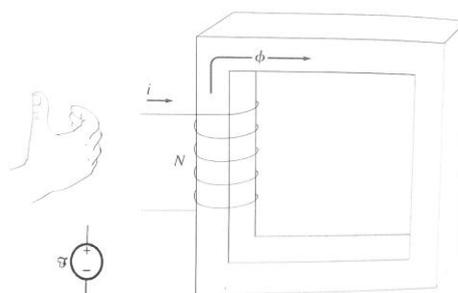


Figura 2.1 – Polaridade de um circuito Magnético (Adaptada de Chapman, 2013).

O fluxo magnético Φ é constante em todo o circuito e depende apenas da força magnetomotriz F e da relutância total do circuito R_t .

$$\Phi = \frac{F}{R_t} \quad (2.1)$$

Onde,

$$F = Ni \quad (2.2)$$

$$R_{ts} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{A_i \mu_i} \quad (2.3)$$

$$R_{tp} = \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{A_i \mu_i} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (2.4)$$

Sendo R_{ts} a relutância de associações em série, R_{tp} a relutância de associações em paralelo, l_i a distância, A_i a área da seção e μ_i a permeabilidade magnética do material percorrido pelo fluxo em cada uma das n etapas do circuito.

Segundo Chapman, 2013, a força magnetomotriz F também pode ser escrita como uma redução da lei de Ampère (Equação (2.6) considerando que a bobina atravessa N vezes o caminho de integração l_n conduzindo a corrente i como mostra a Figura 2.2.

$$\oint H \cdot dl = i_{liq} \Leftrightarrow H l_n = Ni \quad (2.6)$$

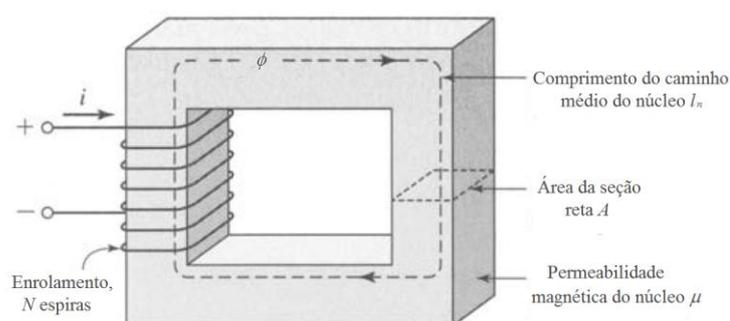


Figura 2.2 – Área atravessada pelo fluxo magnético (Adaptado de Fitzgerald et al., 2003).

O fluxo magnético total que atravessa uma determinada área (Figura 2.2) é dado pela Equação (2.7), que, segundo Chapman, 2013 pode ser reduzida considerando o vetor de densidade de fluxo magnético B perpendicular ao plano da seção reta e com intensidade uniformemente distribuída em toda a área.

$$\Phi = \int_A B \cdot dA \Leftrightarrow \Phi = BA \quad (2.7)$$

onde dA é a unidade diferencial de área, B é a densidade de fluxo magnético e A a área da seção reta de um circuito magnético.

Segundo Chapman, 2013, quando há espaços de ar no caminho do fluxo magnético, denominados entreferros, ocorre um efeito chamado de espraio. Este efeito causa um aumento na área efetiva da seção de cerca de 5%, como ilustra a Figura 2.3.

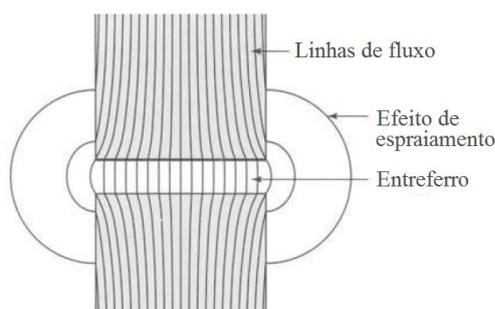


Figura 2.3 – Espraio das linhas de fluxo (Adaptado de de Fitzgerald et al., 2003).

2.2. Comportamento Magnético de Materiais Ferromagnéticos

Em alguns materiais, a exemplo do vácuo, a permeabilidade magnética é tomada como constante e expressa como a relação entre a densidade de fluxo magnético e a intensidade do campo aplicado (eq. 2.8).

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.8)$$

Contudo, isto não é verdade em materiais ferromagnéticos [Chapman, 2013]. Em uma região considerada não-saturada da curva de magnetização, um pequeno incremento na intensidade do campo magnético causa grandes variações na densidade de fluxo magnético resultante. Com o aumento da intensidade esta variação passa ser cada vez menor até que, quando o material atinge a saturação, o valor atingido passa a ser constante como mostra a Figura 2.4.

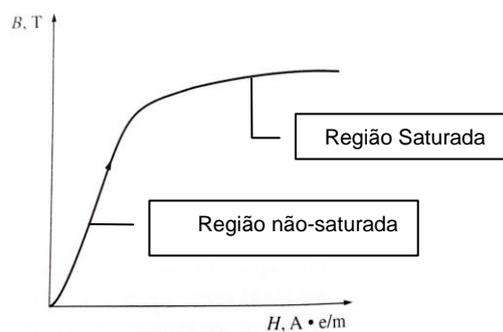


Figura 2.4 – Curva de magnetização de materiais ferromagnéticos (Adaptada de Chapman, 2013).

Este fenômeno ocorre devido ao alinhamento dos domínios magnéticos do material sob a aplicação do campo magnético (Figura 2.5). Quanto mais alinhados estão é necessária uma força maior para alinhá-los até que eles estejam totalmente alinhados com a direção do campo magnético externo quando não é possível uma alteração de direção pela incidência do campo.

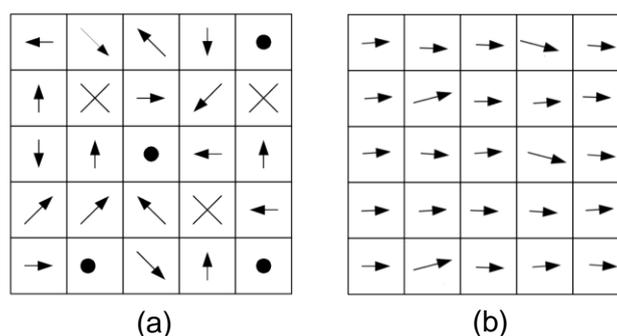


Figura 2.5 – Domínios magnéticos orientados: (a) aleatoriamente; (b) sob a aplicação de um campo magnético. (Chapman, 2013)

2.3. Acabamento Magnético-abrasivo

O processo de acabamento magnético abrasivo consiste no uso de eletroímãs para orientar, através do fluxo magnético, uma mistura de partículas ferromagnéticas e abrasivas chamada de pó magnético-abrasivo (PMA), pressionando-as contra a peça que se deseja dar acabamento superficial. O material ferromagnético forma uma matriz que mantém as partículas

abrasivas próximas à peça em processamento, formando uma escova flexível que atua como ferramenta de corte. Enquanto a rigidez dessa escova flexível é controlada pela densidade de fluxo magnético, sua forma é definida pela forma da peça.

Os espaços entre a peça em processamento e a ferramenta utilizada (em geral um eletroímã), denominados entreferros, são preenchidos por PMA, mantido no local devido à ação do campo magnético (Figura 2.6). A remoção de material ocorre devido ao movimento relativo entre o eletroímã e a peça, aliados à pressão exercida pela PMA sobre a superfície desta.

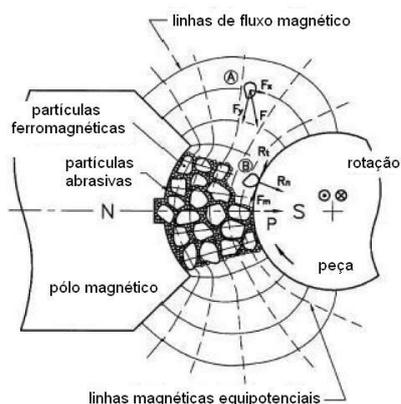


Figura 2.6 – Representação esquemática do funcionamento do processo de acabamento magnético abrasivo (adaptado de Chang et al., 2002).

A ligação entre as partículas pode ser classificada, segundo Jain et al., 2001, em três tipos: ligadas, ou seja, preparadas quimicamente ou por sinterização dos materiais em conjunto; *de fraca ligação*, adicionando a mistura um elemento aglutinante; e *não ligadas*, onde apenas ocorre uma mistura mecânica entre os materiais.

2.3.1. Posicionamento da Ferramenta(Limitações)

O acabamento magnético abrasivo pode ser classificado, segundo Amorim, 2009, pela posição da ferramenta em relação à peça como: frontal, com a ferramenta em rotação percorrendo o plano da peça; cilíndrico, onde há um movimento de rotação relativa da peça em relação aos polos do eletroímã. O acabamento cilíndrico pode ser externo ou interno de acordo com a superfície submetida à ação do PMA.

Um cuidado importante ao trabalhar com acabamento cilíndrico interno, com o uso de ferramenta externa, é com relação às propriedades magnéticas do material, pois as linhas de força têm que atravessar a peça (Figura 2.7).

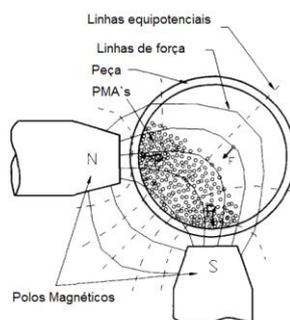


Figura 2.7 – Acabamento magnético-abrasivo cilíndrico interno em tubos não ferromagnéticos (adaptado de Kim & Choi, 1994).

No caso de materiais ferromagnéticos, devido à alta condutância magnética da peça (Bagghi, 2009), forma-se o equivalente magnético a uma “Gaiola de Faraday” fazendo com que a densidade de fluxo magnético no interior do tubo seja muito baixa. Para tal aplicação é necessário, segundo Amorim, 2009, o uso de ferramenta interna ao tubo com um núcleo de alta permeabilidade a fim de evitar que o campo magnético seja nulo, o que dificulta a aplicação em grandes porções de tubulações sem perder a rigidez na ferramenta.

2.3.2. Estado da Arte

O uso de pó magnético-abrasivo no acabamento superficial é um método recente, mas o seu uso vem se tornando mais comum ao longo da última década. Porém, a sua aplicação em acabamento interno de tubos ferromagnéticos é ainda mais rara e por isto não são encontrados muitos estudos ou bibliografia a seu respeito.

Jardim, 2012 buscou desenvolver uma ferramenta para este uso. No entanto, a ferramenta resultante dificulta a alimentação do PMA, pois o eletroímã fica muito próximo da zona de aplicação do acabamento.

Na aplicação cilíndrica interna, a maior parte dos autores pesquisaram o seu uso em materiais não-ferromagnéticos. Shinmura et al., 1984, avaliou a influencia da vibração axial em diferentes frequências (0-20 Hz), obtendo resultados melhores na faixa de 0-5 Hz, verificando uma variação diretamente proporcional da frequência e a remoção de material. Yamaguchi e Shinmura, 2003, estudaram a variação do volume de lubrificante, entre 0,1 e 0,35 ml, no acabamento superficial de tubos de óxido de alumínio, obtendo redução significativa da rugosidade após 5 minutos de ensaio e chegando, após 20 minutos, a uma rugosidade de 0,02 μm (Ra). Yamaguchi et al., 1999, desenvolveram um aparato para rotação da ferramenta em torno da peça para ensaiar tubos não lineares, obtendo em curvas de 90° uma rugosidade de 0,05 μm Ra.

Wang e Lee, 2009, utilizaram um gel de silicone misturado à granalha de aço(SG) e carbeto de silício (SiC) para aplicação em acabamento interno de cilindros não-ferromagnéticos. Dentre as principais vantagens do uso do gel de silicone pode-se ressaltar a facilidade com que as novas arestas de corte, geradas pela quebra do material abrasivo, são conduzidas para a peça, substituindo as arestas já desgastadas potencializando o processo de auto-afiação.

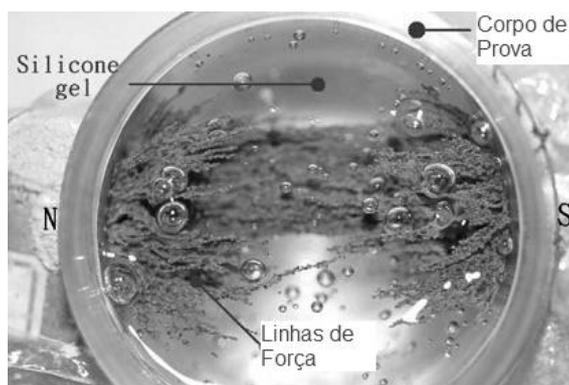


Figura 2.8 – Partículas magnéticas(sem abrasivo) sob efeito do campo magnético imersas em gel de silicone.(Adaptada de Wang e Lee, 2009)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Dimensionamento do Eletroímã

Além dos parâmetros geométricos como a área de seção e o comprimento médio percorrido pelo fluxo, há outras características necessárias para o cálculo do circuito magnético como a permeabilidade magnética dos envolvidos e a desidade de fluxo magnético desejável. Visando uma comparação com resultados de qualidade como os obtidos por Amorim, 2009 foi definida a densidade de fluxo magnético no entreferro considerando a média da literatura como 0,8 T [Amorim, 2009, Chang et al., 2001, Baron et al., 2001

Utilizando como base o projeto da ferramenta desenvolvida por Jardim, 2012, definiu-se o desenho do corpo ferromagnético que serve de núcleo do eletroímã, apenas aumentando o comprimento das hastes a fim de manter o enrolamento afastado da alimentação de pó magnético-abrasivo. As dimensões da ferramenta são apresentadas na Figura 3.1. A ferramenta foi usinada a partir de uma chapa de aço AISI 1020 devido por se tratar de um material ferromagnético com resistência mecânica suficiente, baixo custo e grande disponibilidade no mercado.

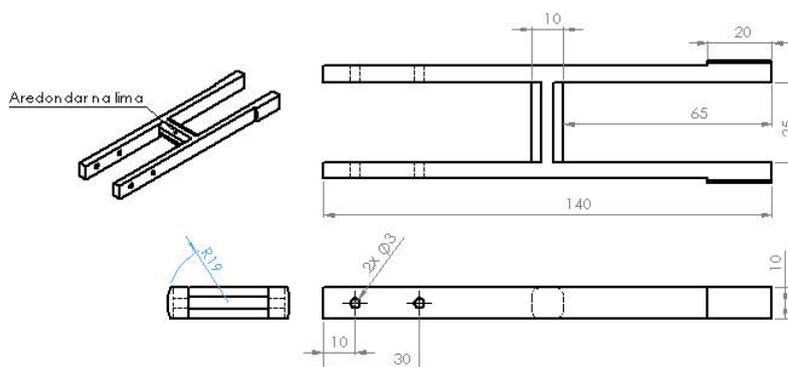


Figura 3.1 – Dimensões do núcleo da ferramenta.

3.1.1. Dimensionamento da bobina

O circuito magnético (Figura 3.2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) pode ser representado de maneira simplificada (considerando as relutâncias entre as hastes com um valor infinito) por um circuito elétrico análogo mostrado na Figura 3.3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde a força eletromotriz F representa a força magnetomotriz (Equação (2.2) e as resistências R_n , R_h , R_e e R_{cp} representam as relutâncias magnéticas do núcleo, das hastes, do entreferro e do corpo de prova, respectivamente associadas em série (Equação (2.3). Os valores calculados são apresentados na Tabela 3.1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

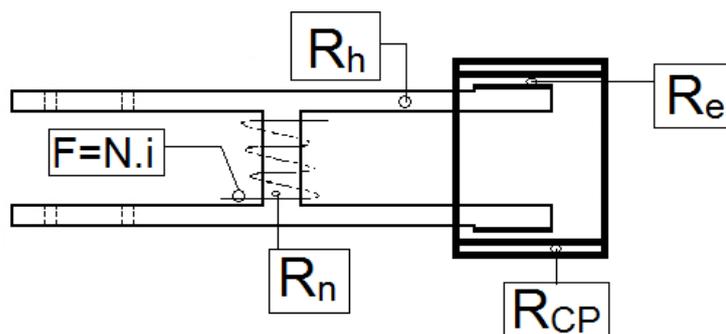


Figura 3.2 – Circuito magnético real.

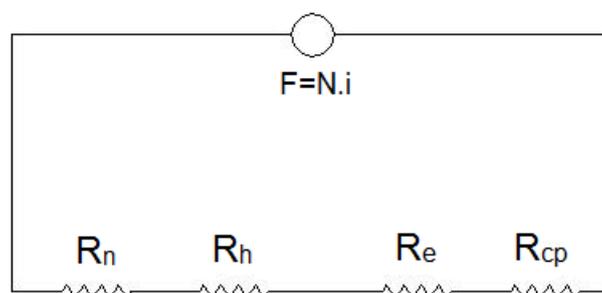


Figura 3.3 - Circuito elétrico análogo. Adaptado de Leonhart, 2004.

Tabela 3.1 - Valores calculados para o eletroímã.

	Área (mm ²)	Comprimento (mm)	Material	Relutância (A.espira/Wb)
Núcleo	100	25	Aço SAE 1020	3,92e4
Hastes	50	130	Aço SAE 1020	4,08e5
Entreferro	202,4	2	Ar	7,86e6
CP	300	52,2	Aço SAE 1045	1,36e4
Total				8,32e6
Fluxo Φ	1,619 Wb			
N.I	1347 A.espira			

3.1.2. Alimentação do Eletroímã

Para a estimativa do número de espiras possíveis para montagem do eletroímã, foi desconsiderado o fator de empacotamento das espiras e assumida a área do fio esmaltado como um quadrado de lado igual ao diâmetro do fio (Figura 3.4 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). A área disponível para preenchimento com o enrolamento foi considerada entre o núcleo e a borda do suporte desenvolvido por Jardim, 2012, quando o sistema de vibração atinge sua posição mínima (Figura 3.5 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), visto que nesta posição o suporte de vibração ultrapassa o fim da guia de movimentação linear limitando o espaço a 500 mm².

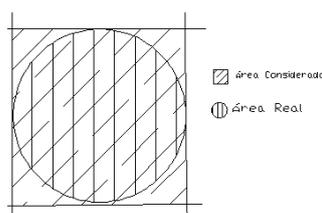


Figura 3.4 – Simplificação de áreas.

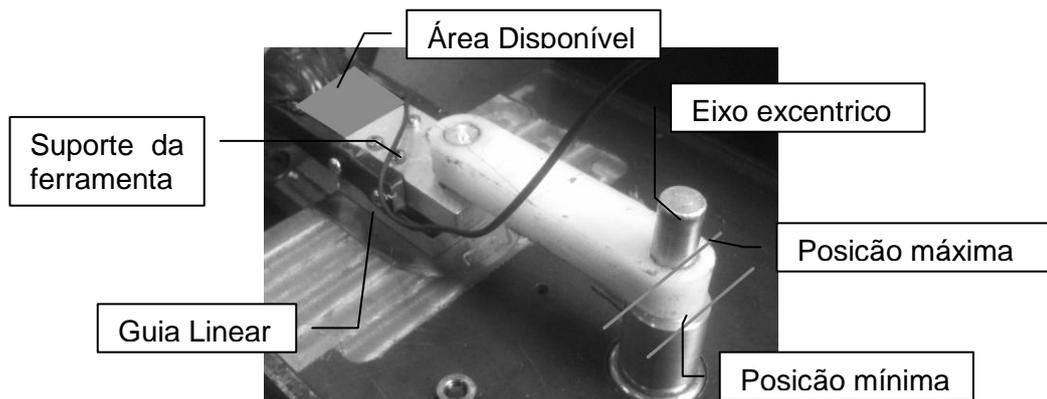


Figura 3.5 – Posições do eixo excêntrico (adaptado de Jardim, 2012).

Utilizando uma tabela de seleção de fios AWG calculou-se o número de espiras possíveis e a corrente necessária para manter a força magnetomotriz calculada anteriormente. A corrente máxima apresentada nestas tabelas padrão é considerada a uma temperatura de 20°C, porém os revestimentos atuais chegam a suportar 220°C. Sendo assim foi escolhido o fio com designação AWG 15, que mesmo excedendo em 17% a corrente nominal, apresenta um dos melhores preenchimentos do comprimento útil do núcleo e maiores diâmetros dentre os que tinham flexibilidade suficiente para uma montagem manual, diminuindo assim o número total de espiras.

Considerando as dimensões do fio selecionado, calculou-se um total de 225 espiras, com uma corrente de 6 A. Para fornecer a corrente necessária à bobina foi utilizada uma fonte comum de computador, capaz de gerar 3,3 V, 5 V e 12 V com capacidade de até 45 A. Para manter a corrente calculada utilizando a fonte de 12 V foi necessário ajustar a resistência do enrolamento (aproximadamente 0,3 Ω) para 2 Ω inserindo uma resistência em série com a bobina. Devido à alta potência dissipada neste ajuste (cerca de 60 W) foi utilizado um banco de resistores em paralelo (4 x 6,8 Ω /15 W = 1 x 1,7 Ω /60 W) devido a dificuldade de compra de resistores com baixa resistência e alta potência,

3.2. Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova (Figura 3.6) foram preparados a partir de tubos de aço SAE 1045 fornecidos no comprimento necessário, porém foram executadas algumas operações de usinagem na peça para melhorar sua geometria:

- Faceamento (auxilia o alinhamento do corpo de prova);
- Desbaste interno (próximo à dimensão da ferramenta);
- Chânfro interno (proteção da ferramenta de acabamento);
- Acabamento interno (homogeneização da rugosidade inicial);
- Desbaste externo (adequação da massa ao limite da balança de precisão).

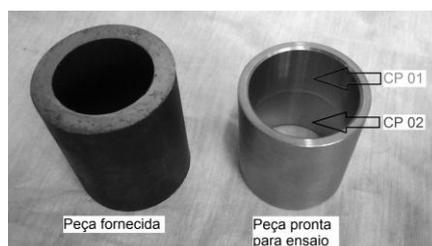


Figura 3.6 - Preparação de dois corpos de prova a partir de peça bruta.

Todos os 20 conjuntos de corpos de prova (2CP por peça totalizando 40 CP) foram limpos com toalha de papel embebida em álcool etílico (95%), pesados em uma balança com precisão de 10^{-4} g e medidos para avaliar a rugosidade média (Ra).

A medição de rugosidade, utilizando um rugosímetro marca Mitutoyo, modelo SurfTest SJ-201, seguiu os parâmetros apresentados na Tabela 3.2 e foi feita fixando os suportes do medidor e usando-os como referência para o posicionamento da peça. As medidas de posição se dão a partir do ponto mais próximo ao medidor ao número do corpo de prova e seguindo em sentido horário (Figura 3.7).

Tabela 3.2 - Configuração da medição de rugosidade.

Cut-off	0,8 μ m
Amostragem	5x
Percurso de medição	4 mm
Posição axial no CP	15-11 mm
Medições Radiais	3
Posição radial no CP	0°-120°-240°

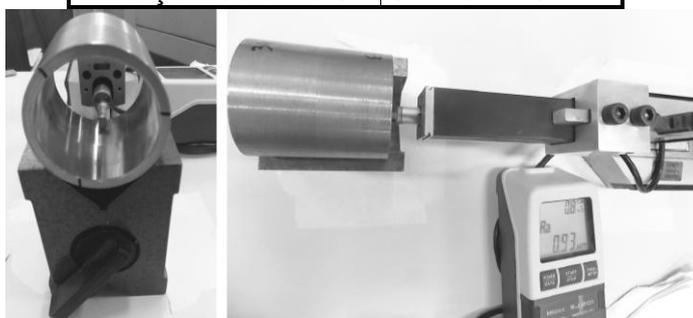


Figura 3.7 – Referências da medição de rugosidade.

Os corpos de prova foram separados em duas etapas comparando:

1ª- A média das rugosidades encontradas no mesmo corpo de prova com a média e desvio padrão ($média \pm \sigma$) de todas medições (população);

2ª- A média das rugosidades encontradas no mesmo corpo de prova com a média e desvio padrão ($média \pm \sigma$) de todas as medições dos corpos de prova selecionados na primeira etapa (amostra).

Os corpos de prova aprovados nas duas etapas foram separados para os ensaios finais (19 corpos de prova), enquanto os aprovados apenas na primeira foram utilizados nos pré-testes (10 corpos de prova), ou seja, para definir os parâmetros dos ensaios finais.

O APÊNDICE I – TABELA DE RUGOSIDADES DOS CORPOS DE PROVA apresenta todas as medidas de rugosidade média, bem como os corpos de prova selecionados em cada etapa.

3.3. Definição dos Parâmetros para Ensaio

Os corpos de prova reprovados nas duas etapas de classificação quanto à rugosidade média foram utilizados no alinhamento da ferramenta, teste de frequência da vibração axial, e em alguns ensaios em condições reais de aplicação para preparar o operador para a rotina dos testes, verificar a melhor sequência de medições, e definir a correta ordem de acionamento e desativação dos equipamentos (torno, sistema de vibração e eletroímã). Além disso, foram desenvolvidas proteções para impedir o contato do PMA com o corpo de prova não ensaiado e o interior do torno, além de isolar o torno do circuito magnético e facilitar alinhamento do CP (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Posicionamento dos corpos de prova no torno mecânico.

Os parâmetros utilizados nos pré-testes foram definidos considerando os melhores resultados obtidos por Amorim, 2009 e a utilização dos materiais disponíveis no laboratório (PMA e sistema de vibração) e são detalhados no APÊNDICE II – .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação do Ensaio

Alguns dos corpos de prova aprovados apenas na primeira etapa de verificação da rugosidade foram submetidos ao ensaio e medidos novamente quanto à massa e rugosidade seguindo os mesmos procedimentos da preparação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.1 e mostram uma baixa remoção de material além da ausência de influência significativa sobre a rugosidade dos corpos de prova, principalmente quando comparados aos obtidos por Jardim, 2012 (Δm -0,019g; ΔRa -0,7 μm) e Amorim, 2009 (Δm -0,11g; ΔRa -0,55 μm)

Tabela 4.1 – Resultados dos Ensaio.

CP	RPM	Elemento Aglutinante	Elemento Abrasivo	Proporção (Fe+Al ₂ O ₃ +óleo)	Tempo de ensaio(s)	$\Delta m(10^{-4}g)$	$\Delta Ra(\mu m)$
05	250	PNP	Calcinada	4:1:0,4	150	2	0,02
02	250	PNP	Calcinada	4:1:0,4	150	9	0,03
06	250	PNP	Calcinada	4:1:0,4	150	5	0,05
08	500	PNP	Calcinada	4:1:0,4	150	15	0,01
06	250	PNP	Eletrofundida	4:1:0,4	150	8	0,03
06	250	PNP	Eletrofundida	4:1:0,8	150	2	0,01
06	500	PNP	Eletrofundida	4:1:0,4	300	4	0,01
02	500	PBS	Eletrofundida	4:1:0,4	300	7	0,04
08	500	PBS	Calcinada	4:1:0,4	300	11	0,02

4.2. Avaliação do Eletroímã

Devido aos resultados não satisfatórios obtidos, mesmo variando parâmetros influentes sobre o processo, foi necessária uma verificação das características magnéticas da ferramenta. Utilizando um gaussímetro portátil, FW BELL modelo 9500, mediu-se a densidade de fluxo magnético no entreferro (Figura 4.1) e apesar do valor calculado ser de 0,8 T, o resultado medido foi de 0,12 T.

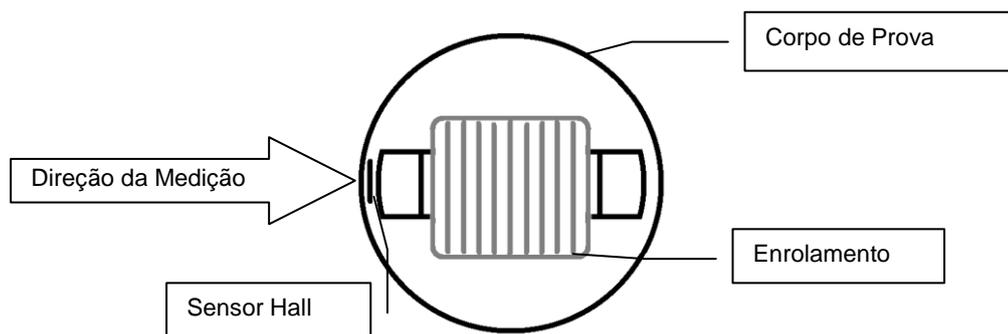


Figura 4.1 – Esquema da medição de densidade de fluxo magnético no entreferro.

A suspeita inicial foi de um eventual rompimento no revestimento do fio durante a montagem, causando um curto circuito tanto entre as voltas do enrolamento (diminuição no número efetivo de espiras) quanto entre o enrolamento e o núcleo ou hastes (corrente de fuga para o suporte), diminuído em ambos os casos o fluxo magnético no circuito.

O enrolamento foi refeito três vezes:

1. Inclusão de isolamento elétrico do corpo antes da montagem para evitar corrente de fuga;
2. Substituição do fio por outro com designação AWG 21 (mais delgado) para diminuir a força de tração necessária para manter o enrolamento agrupado;
3. Montagem manual da bobina para extinguir a possibilidade de avaria do fio pelo movimento do torno.

Após cada montagem a densidade de fluxo magnético foi avaliada utilizando a mesmo método e os valores encontrados variaram muito pouco, mantendo-se sempre na faixa de 0,11 a 0,12 T. O enrolamento manual da bobina causou a ocupação de um volume maior, fazendo com que o número máximo de espiras diminuísse para 550. A corrente máxima para o fio AWG 21 (1,2 A) não foi excedida utilizando a saída de 5 V, mesmo sem ajuste de resistência. Nestas condições ($F=660$ A.esp) o eletroímã teoricamente deveria apresentar uma densidade de fluxo magnético de 0,4 T.

Foi testado também o eletroímã desenvolvido por Jardim, 2012, e o valor encontrado (0,15 T), embora mais elevado, ainda está muito longe do que o utilizado na literatura, conforme ilustra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Densidade de Fluxo Magnético Encontradas na Literatura.

Autor(es)	B(T)
Yamaguchi e Shinmura, 1999	1,04
Baron et al., 2001	1,10
Chang et al., 2001	0,65
Kim, 2003	0,40*
Yamaguchi e Shinmura, 2003	0,37*
Leonhardt, 2004	0,80
Amorim, 2009	0,80

*ensaios realizados em materiais não-ferromagnéticos

Através da alteração da corrente de alimentação do eletroímã mediu-se a variação resultante da densidade de fluxo magnético seguindo a mesma configuração anterior (Figura 4.1). O gráfico obtido é apresentado na Figura 4.2 e mostra uma variação não-linear onde, com o aumento da corrente ocorre uma queda na taxa de variação da densidade de fluxo magnético, indício claro de saturação magnética do núcleo.

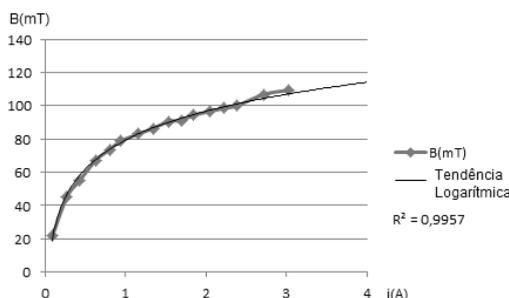


Figura 4.2 – Curva de Magnetização Medida.

4.3. Fatores Negligenciados

Além da variação da permeabilidade magnética com a intensidade de campo, outras características de sistemas magnéticos não foram consideradas no dimensionamento do eletroímã. Um destes fatores é a formação de entreferros involuntários devido à proximidade das chapas das hastes da ferramenta gerando relutâncias adicionais em paralelo ao circuito principal como mostrado na Figura 4.3.

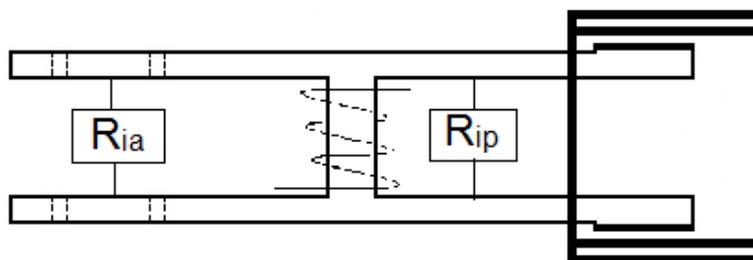


Figura 4.3 – Locais de formação de entreferros involuntários (posterior e anterior).

Estas relutâncias normalmente são pelo menos 3 ordens de grandeza maiores que as do circuito principal. Todavia, devido à redução da permeabilidade do núcleo, ao grande comprimento das hastes e ao acúmulo de PMA entre as hastes a aplicação do ensaio esta diferença se reduz a apenas 1 ordem de grandeza, diminuindo assim a relutância equivalente, calculada pelas Equações (2.3) e (2.4), do circuito apresentado na Figura 4.4 e consequentemente aumentando o fluxo magnético no núcleo (Equação (2.1)).

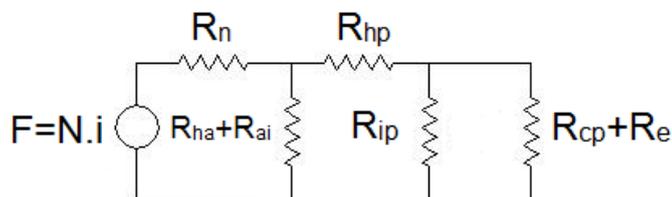


Figura 4.4 – Circuito Análogo Corrigido.

A curva de magnetização na Figura 4.2 não condiz diretamente com a literatura, pois apresenta uma densidade de fluxo magnético de saturação muito inferior aos 1,95 T citados por Bagghi, 2009, para o aço 1020. Contudo, com redução da relutância total do sistema causada pelas relutâncias parasitas, o fluxo magnético no núcleo é cerca de 3 vezes maior que no entreferro principal e, com a diferença de áreas a densidade de fluxo magnético no núcleo é até 6 vezes maior que nos entreferros.

Esta diferença, além de calculada, foi verificada através de simulação pelo método de elementos finitos no programa FEMM 4.2 utilizando uma malha com 18936 elementos e 9649 nós resultando na distribuição de fluxo magnético a apresentado na Figura 4.5 – Simulação numérica por elementos finitos (FEMM 4.2).

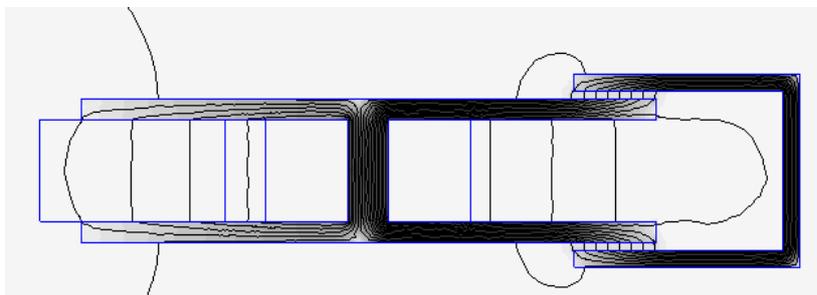


Figura 4.5 – Simulação numérica por elementos finitos (FEMM 4.2)

Os valores obtidos através da simulação para a densidade de fluxo magnético no núcleo e no entreferro da ferramenta inicial foram 854 mT e 156 mT respectivamente. O valor de permeabilidade relativa no núcleo foi de 1440, mostrando novamente a saturação magnética do material.

4.4. Nova Proposta de Ferramenta

A partir da simulação foi possível variar os parâmetros geométricos e elétricos da ferramenta e comparar os resultados magnéticos obtidos. Inicialmente, alterou-se apenas a seção do núcleo, mantendo uma semelhança na forma do corpo da ferramenta. No entanto, a melhor solução perante as limitações dimensionais dos corpos de prova foi modificar o formato da ferramenta, eliminando as hastes anteriores e aumentando o espaço disponível para o enrolamento. Esta configuração permitiu atingir uma densidade de fluxo magnético no entreferro de 606 mT, mesmo considerando uma relutância de contato na interface com a haste móvel, que visa facilitar a montagem da bobina. Os gráficos de distribuição do campo magnético são mostrados na Figura 4.6 e os detalhes do novo conceito da ferramenta na Figura 4.7. Mais detalhes são apresentados no APÊNDICE III – SIMULAÇÃO FEMM 4.2.

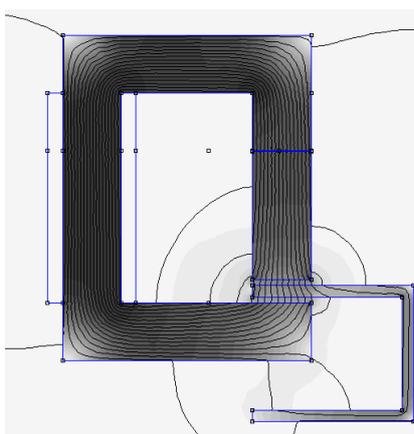


Figura 4.6 – Simulação numérica da distribuição do fluxo magnético.

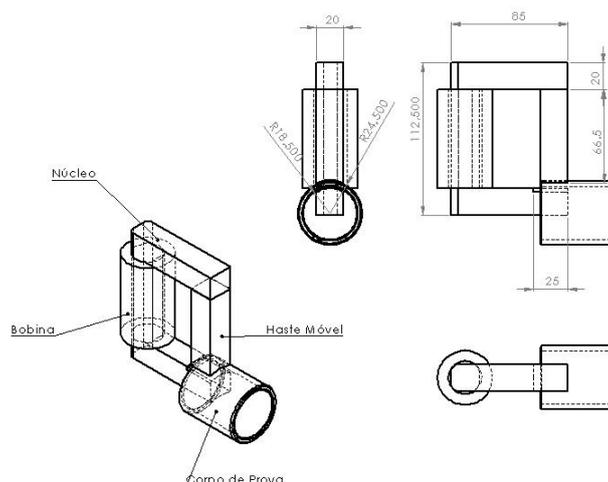


Figura 4.7 – Projeto da Ferramenta segundo o novo conceito desenvolvido.

5. CONCLUSÕES

Os resultados do ensaio mostraram que com o uso de uma ferramenta muito semelhante à usada por Jardim, 2012, não foi possível uma grande remoção de material nem uma melhora significativa no acabamento superficial. Este desempenho é resultado da rigidez deficiente da escova magnética flexível, formada pelo PMA, devido à baixa densidade de fluxo magnético no entreferro.

A partir de um estudo mais detalhado sobre a saturação magnética dos materiais ferromagnéticos, aliado a recursos de simulação numérica pelo método de elementos finitos, foi possível identificar os pontos críticos da ferramenta inicial e compará-la com a ferramenta desenvolvida por Leonhardt, 2004 que obteve bons resultados. Para a solução do problema encontrado foram propostos outros modelos de ferramenta e encontrados alguns limites para o seu dimensionamento:

- O uso de hastes internas é limitado pelo diâmetro interno do corpo de prova. Desse modo, o aumento da área da seção das hastes causa a redução da distância entre elas, aumentando assim o efeito de desvio do fluxo magnético.
- O aumento da área do núcleo limita ainda mais o número de espiras possíveis e, mesmo com um comprimento maior, dificulta a montagem do enrolamento.
- O uso de um núcleo em 'C' com uma haste desmontável e externa ao corpo de prova permite um melhor aproveitamento do comprimento do núcleo e facilita o enrolamento da bobina.

Sugere-se, para trabalhos futuros, a execução do projeto proposto para a nova ferramenta e a avaliação da influência da densidade de fluxo magnético sobre o resultado do processo. Além disso, é possível utilizar os recursos (corpos de prova e materiais para o PMA) preparados para avaliar a influência dos parâmetros não considerados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorim, H. J.; “**Estudo dos parâmetros do processo no acabamento magnético abrasivo cilíndrico externo**”, Qualificação para Doutorado, Eng. Mecânica, UFRGS, 2007.

Amorim, H. J.; “**Estudo dos parâmetros do processo no acabamento magnético abrasivo cilíndrico externo**”, Tese de Doutorado, Eng. Mecânica, UFRGS, 2009.

Bagghi, N.F.F.; **“Estudo e Desenvolvimento de um Atuador Planar com Enrolamentos e Núcleo de Material Ferromagnético Compósito”**, Tese de Mestrado, Eng. elétrica, UFRGS, pp 64-67, 2009.

Baron, Y. M.; Ko, S. L.; Repnikova, E., **“Experimental Verification of Deburring by Magnetic Abrasive Finishing Method”**, 2001.

Chang, G.-W., Yan, B.-H., & Hsu, R.-T.; **“Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives”**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 42, pp 575-583, 2001.

Chapman, S.J. **“Fundamentos de Máquinas Elétricas”**, AMGH, 5ª edição, 2013.

Fitzgerald, A.E., Kingsley Jr, C., Umans, S.D. **“Electric Machinery”**. McGraw-Hill, 6th edition. New York, 2003.

GOMES, M. S.; **“Desenvolvimento de um dispositivo para a execução do processo de acabamento magnético abrasivo cilíndrico externo auxiliado por vibração”**, Trabalho de conclusão de Graduação, Eng. Mecânica, UFRGS, 2007.

Jain, V. K., Kumar, P., Behera, P., & Jayswal, S.; **“Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process”**, Wear, vol. 250, pp 384-390, 2001.

Jardim, J. S.; **“Desenvolvimento de equipamento para a execução do processo de acabamento abrasivo cilíndrico interno”**, Trabalho de conclusão de Graduação, Eng. Mecânica, UFRGS, 2012.

Kim, J., **“Polishing of Ultra-clean Inner Surface Using Magnetic Force”**, Journal of Advanced manufacturing Technology, 2003.

Kim, J.-D., & Choi, M.-S.; **“Simulation for the prediction of surface-accuracy in magnetic abrasive machining”**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 53, pp 630-642, 1994.

Leonhardt, C.; **“Desenvolvimento e estudo do processo de acabamento por abrasão eletromagnética”**, Trabalho de conclusão de Graduação, Eng. Mecânica, UFRGS, 2004.

Shinmura, T., Takazawa, K., Hatano, E., Aizawa, T. **“Study on Magnetic-Abrasive Process”**, Bull Japan Society of Precision Engineering, 1984.

Wang, A., & Lee, S.; **“Study the characteristics of magnetic finishing with gel abrasive”**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 49, pp 1063-1069, 2009.

Yamaguchi, H., Shinmura, T. **“Study of the surface modification resulting from an international magnetic abrasive finishing process”**, Journal of the international Societies for Precision engineering and Nanotechnology, 1999.

Yamaguchi, H., Shinmura, T., Kobayashi, A. **“Development of an Internal Magnetic Abrasive Finishing Process for Nonferromagnetic Complex Shape Tubes”**, JSME International Journal, Series C, vol 44, pp 275–281, 1999.

Yamaguchi, H., Shinmura, T. **“Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process”**, Precision Engineering, vol 28, pp 135–142, 2003.

APÊNDICE I – TABELA DE RUGOSIDADES DOS CORPOS DE PROVA

População							Critérios de decisão	
CP	Ra1	Ra2	Ra3	med	desv.A	Veredito	desv.c	0,18
01	1,62	1,55	1,58	1,58	0,04	Fora	Total	
02	1,43	1,46	1,51	1,47	0,04	Dentro	Dentro	29
03	1,36	1,42	1,37	1,38	0,03	Dentro	Fora	11
04	1,35	1,43	1,34	1,37	0,05	Dentro		
05	1,33	1,55	1,40	1,43	0,11	Dentro		
06	1,37	1,33	1,46	1,39	0,07	Dentro		
07	1,48	1,57	1,52	1,52	0,05	Fora		
08	1,39	1,47	1,59	1,48	0,10	Dentro		
09	1,30	1,27	1,24	1,27	0,03	Dentro		
10	1,17	1,26	1,16	1,20	0,06	Dentro		
11	1,13	1,20	1,21	1,18	0,04	Dentro		
12	1,14	1,15	1,15	1,15	0,01	Dentro		
13	1,39	1,37	1,37	1,38	0,01	Dentro		
14	1,45	1,39	1,39	1,41	0,03	Dentro		
15	1,40	1,33	1,44	1,39	0,06	Dentro		
16	1,42	1,34	1,39	1,38	0,04	Dentro		
17	1,09	1,17	1,11	1,12	0,04	Fora		
18	1,08	1,15	1,18	1,14	0,05	Dentro		
19	1,06	1,12	1,13	1,10	0,04	Fora		
20	1,22	1,21	1,27	1,23	0,03	Dentro		
21	1,42	1,38	1,42	1,41	0,02	Dentro		
22	1,39	1,38	1,47	1,41	0,05	Dentro		
23	1,38	1,49	1,42	1,43	0,06	Dentro		
24	1,41	1,39	1,41	1,40	0,01	Dentro		
25	1,43	1,38	1,47	1,43	0,05	Dentro		
26	1,52	1,37	1,44	1,44	0,08	Dentro		
27	1,01	0,88	0,85	0,91	0,09	Fora		
28	1,02	0,86	0,96	0,95	0,08	Fora		
29	1,18	0,90	1,12	1,07	0,15	Fora		
30	1,11	1,08	1,10	1,10	0,02	Fora		
31	1,35	1,34	1,35	1,35	0,01	Dentro		
32	1,31	1,29	1,31	1,30	0,01	Dentro		
33	0,91	1,04	0,93	0,96	0,07	Fora		
34	1,14	1,00	1,00	1,05	0,08	Fora		
35	1,22	1,30	1,35	1,29	0,07	Dentro		
36	1,26	1,35	1,20	1,27	0,08	Dentro		
37	1,51	1,54	1,53	1,53	0,02	Fora		
38	1,47	1,49	1,45	1,47	0,02	Dentro		
39	1,47	1,51	1,41	1,46	0,05	Dentro		
40	1,34	1,43	1,56	1,44	0,11	Dentro		
media					1,31			
desv.p					0,18			

CPs dentro							Critérios de decisão	
CP	Ra1	Ra2	Ra3	Média	Desvio	Veredito	desv.c	0,11
02	1,43	1,46	1,51	1,47	0,04	Fora	Total	
03	1,36	1,42	1,37	1,38	0,03	Dentro	Dentro	19
04	1,35	1,43	1,34	1,37	0,05	Dentro	Fora	10
05	1,33	1,55	1,40	1,43	0,11	Fora		
06	1,37	1,33	1,46	1,39	0,07	Dentro		
08	1,39	1,47	1,59	1,48	0,10	Fora		
09	1,30	1,27	1,24	1,27	0,03	Dentro		
10	1,17	1,26	1,16	1,20	0,06	Fora		
11	1,13	1,20	1,21	1,18	0,04	Fora		
12	1,14	1,15	1,15	1,15	0,01	Fora		
13	1,39	1,37	1,37	1,38	0,01	Dentro		
14	1,45	1,39	1,39	1,41	0,03	Dentro		
15	1,40	1,33	1,44	1,39	0,06	Dentro		
16	1,42	1,34	1,39	1,38	0,04	Dentro		
18	1,08	1,15	1,18	1,14	0,05	Fora		
20	1,22	1,21	1,27	1,23	0,03	Fora		
21	1,42	1,38	1,42	1,41	0,02	Dentro		
22	1,39	1,38	1,47	1,41	0,05	Dentro		
23	1,38	1,49	1,42	1,43	0,06	Dentro		
24	1,41	1,39	1,41	1,40	0,01	Dentro		
25	1,43	1,38	1,47	1,43	0,05	Dentro		
26	1,52	1,37	1,44	1,44	0,08	Dentro		
31	1,35	1,34	1,35	1,35	0,01	Dentro		
32	1,31	1,29	1,31	1,30	0,01	Dentro		
35	1,22	1,30	1,35	1,29	0,07	Dentro		
36	1,26	1,35	1,20	1,27	0,08	Dentro		
38	1,47	1,49	1,45	1,47	0,02	Fora		
39	1,47	1,51	1,41	1,46	0,05	Dentro		
40	1,34	1,43	1,56	1,44	0,11	Fora		
Média					1,36			
Desvio Padrão					0,11			

APÊNDICE II – PARÂMETROS DE ENSAIO

A escolha dos parâmetros utilizados no experimento baseou-se na ideia de comparação com os bons resultados obtidos por Amorim, 2009, e a utilização do suporte e sistema de vibração desenvolvidos por Jardim, 2012. Os parâmetros selecionados são apresentados na Tabelas All.1, All.2 e All.3.

Tabela All.1 – Parâmetros fixos definidos para o ensaio.

Distância do Entreferro(l_e)	1 mm
Densidade de fluxo magnético(B_e)	0,8 T
Tensão aplicada ao motor do sistema de vibração	1,453 V
Frequência de vibração axial	5 Hz
Amplitude de vibração axial	1,1 mm

Tabela All.2 – Parâmetros variáveis possíveis para o ensaio.

Velocidade de Corte	
Rotação do CP 1	250 RPM
Rotação do CP 2	500 RPM
Tempo de Ensaio	
Tempo 1	150 s
Tempo 2	300 s
Proporção(Fe+Al ₂ O ₃ +óleo)	
P1	4:1:0,4
P2	4:1:0,8
Elemento Abrasivo	
Alumina 1	Calcinada
Alumina 2	Eletrofundida
Elemento Aglutinante	
Óleo 1	PNP
Óleo 2	PBS

Tabela All.3 – Especificação dos componentes do pó magnético-abrasivo.

Elemento	Especificação	Viscosidade Cinemática a 40°	Tamanho médio
Elemento Ferromagnético			
Fe	Cavaco de Ferro Fundido Cinzento	-	180,58 µm
Elemento Abrasivo			
Alumina 1	Alumina Calcinada	-	80-90 µm
Alumina 2	Alumina Eletrofundida	-	125 µm
Elemento Aglutinante			
Óleo 1	Parafínico Neutro Pesado 95	71,8 cSt	-
Óleo 2	Parafínico Bright Stock 33	487,4cSt	-

APÊNDICE III – SIMULAÇÃO FEMM 4.2

As Figuras AIII.1-2 referem-se à simulação para a ferramenta inicial feita com 9649 nós e 18936 elementos, as figuras AIII.3-4 ao conceito intermediário (12596 nós e 24830 elementos) e as figuras AIII.5-6 ao conceito final adotado (11145 nós e 21928 elementos), representando a distribuição do fluxo magnético no entreferro e no núcleo respectivamente

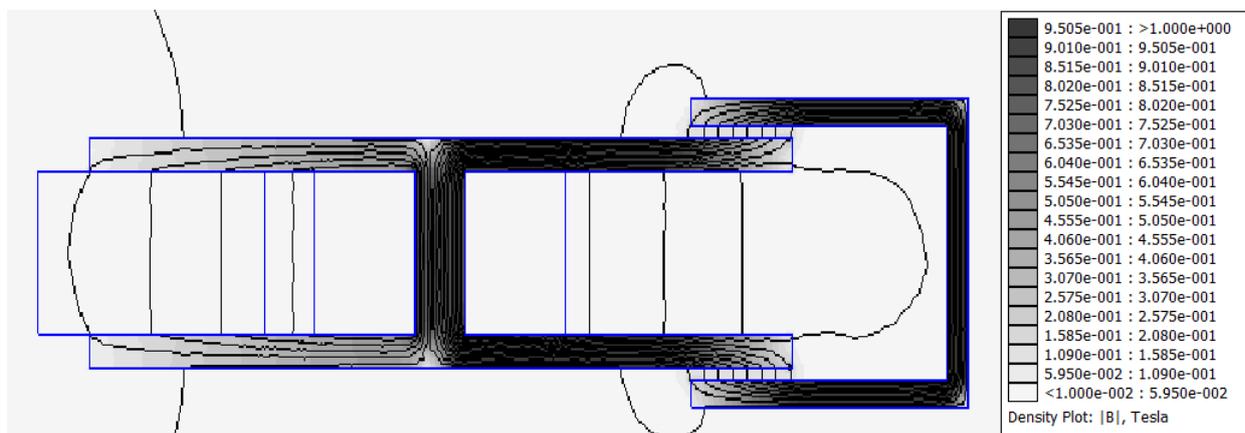


Figura AIII.1 - Distribuição das linhas de campo da ferramenta original.

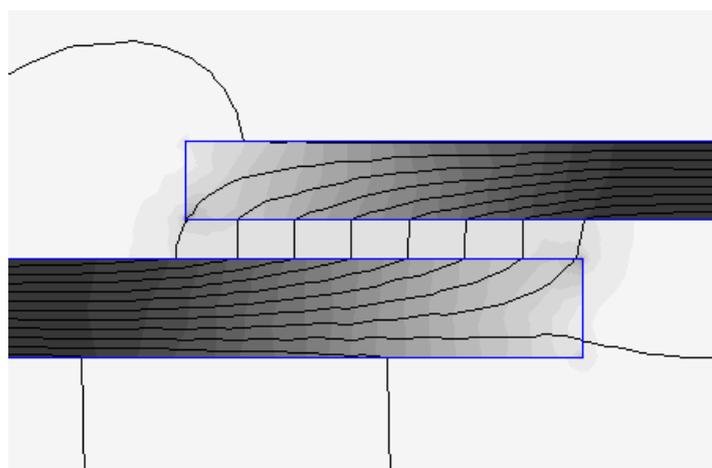


Figura AIII.2 – Detalhe da distribuição das linhas de campo no entreferro principal da ferramenta original.

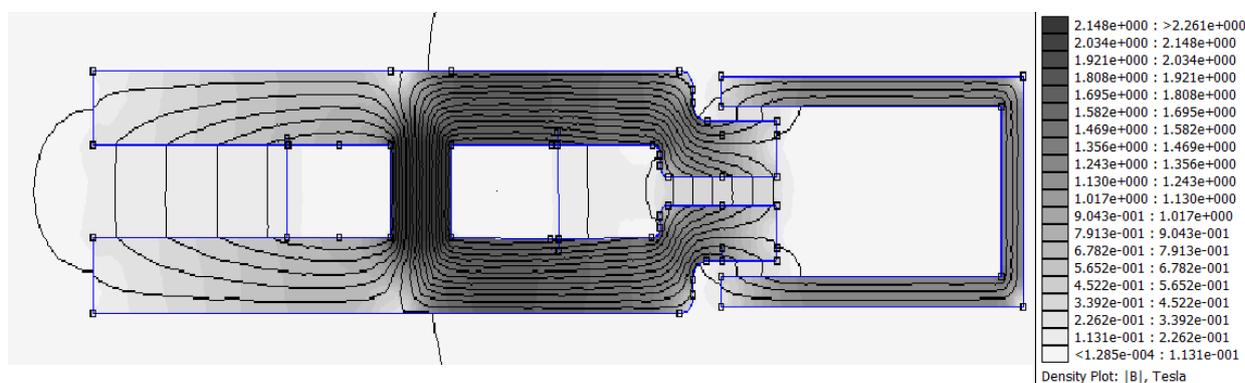


Figura AIII.3 - Distribuição das linhas de campo do conceito intermediário da ferramenta.

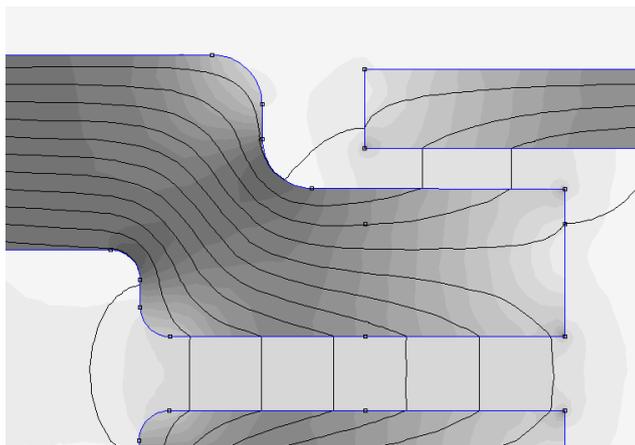


Figura AIII.4 - Detalhe da distribuição das linhas de campo no entreferro do conceito intermediário da ferramenta.

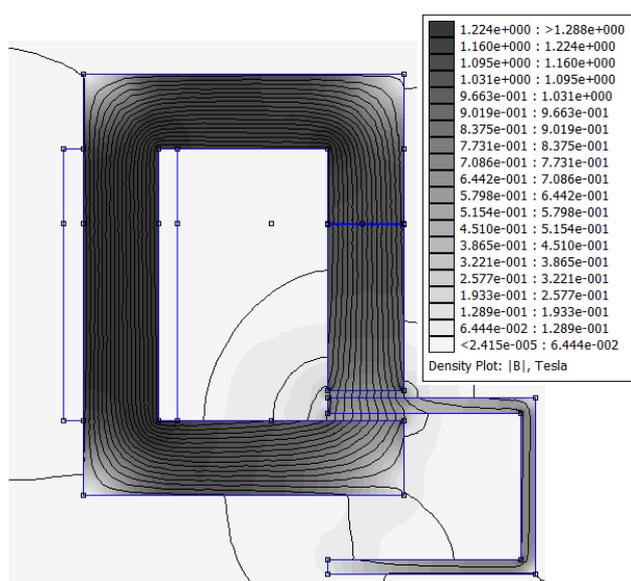


Figura AIII.5 - Distribuição das linhas de campo do conceito final da ferramenta.

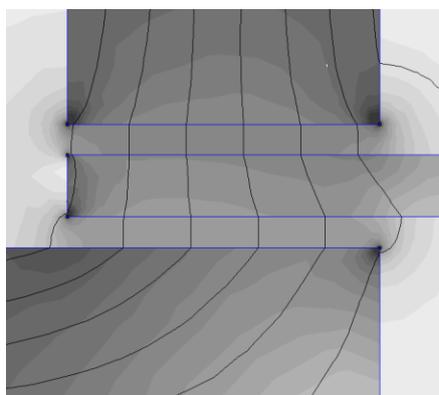


Figura AIII.6 - Detalhe da distribuição das linhas de campo no entreferro do conceito final da ferramenta.