

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais**

**PPGEM**

**Halston Mozetic**

**DESIGN DE PRODUTO: SELEÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS  
COM APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO EM NÚCLEOS DE  
ALTO-FALANTES**

**Porto Alegre  
2008**

**HALSTON MOZETIC**  
Engenheiro Mecânico

**DESIGN DE PRODUTO: SELEÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS  
COM APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO EM NÚCLEOS DE  
ALTO-FALANTES**

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

Porto Alegre  
2008

**HALSTON MOZETIC**  
Engenheiro Mecânico

**DESIGN DE PRODUTO: SELEÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS  
COM APLICAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO EM NÚCLEOS DE  
ALTO-FALANTES**

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

**APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA**

Porto Alegre, 01 de Dezembro de 2008.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira - DEG - UFRGS  
Prof. Dr. Julian Penkov Geshev - IF/LAM - UFRGS  
Prof. Dr. Vilson João Batista - DEMEC - UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Dedico este trabalho à Solange e aos nossos filhos Júlia e Guilherme.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos Professores Dr. Wilson Kindlein Júnior, Dr. Bergmann, Dr. Telmo e Dra. Liane Roldo devo meus agradecimentos pela confiança e orientação prestada.

Aos membros da banca examinadora pelas importantes contribuições elevando a qualidade do trabalho.

Meus agradecimentos especiais ao M.Sc. Eduardo Foncesa e ao Técnico Gerson Toaldo Bello pelo grande apoio, orientação e estímulo neste trabalho.

Aos colegas que colaboraram de alguma forma na realização deste trabalho e me acompanharam durante esses dois anos.

À Eletrônica Selenium, em nome de Edson Luiz Sanches Franco e Tadeslau A. S. Souza, pelo auxílio técnico sem o qual este trabalho não seria possível.

À empresa "Fazer Ciência e Inovação", em especial ao Ângelo Ribeiro Morrone, pela realização dos equipamentos para indução magnética nos tratamentos térmicos aqui apresentados.

A todos os professores que contribuíram na minha formação como engenheiro meus sinceros agradecimentos.

A CAPES, ao LdSM e à UFRGS pelo apoio técnico e financeiro dando condições materiais para a realização do trabalho.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar os resultados obtidos com o uso da técnica de campo magnético induzido durante o tratamento térmico do Ferro Fundido Nodular em desenvolvimento de núcleos de alto-falantes. Para este estudo foi escolhido como material o Ferro Fundido Nodular devido ao baixo custo de obtenção das peças e também por ser um material de fácil aquisição no mercado. Foram confeccionadas 90 amostras deste Ferro Fundido Nodular com percentuais diferenciados de Ferro, Silício e Carbono, sendo que as amostras quando foram submetidas ao tratamento térmico de recozimento também sofreram a indução magnética. Os parâmetros utilizados no tratamento térmico situaram-se na faixa de temperatura de aquecimento de 900°C até 920°C e uma indução magnética “*B*” entre 16000 e 20000 Gauss. O grande desafio deste trabalho estava no fato de que variações de composição das ligas de ferro fundido nodular, aliadas as inclusões de outros materiais não magnetizáveis, modificavam, para pior, o desempenho dos núcleos dos alto-falantes. Para obter-se, então, uma estrutura em que o fluxo magnético pudesse permear, buscou-se primeiramente selecionar a liga de ferro fundido eliminando ao máximo os materiais não magnetizáveis, e só então, estudar um processo de tratamento térmico com indução magnética que tornasse o material adequado ao uso nos núcleos de alto-falantes. Para melhorar as propriedades magnéticas de forma contundente, buscou-se através do recozimento com campo induzido um alinhamento dos domínios, ou seja, uma ordenação dos “spins” dentro dos grãos do material que juntamente com a elevação de temperatura tenderam a ter um mesmo sentido, facilitando de maneira significativa a passagem do fluxo magnético, propriedade importante para o desempenho dos núcleos de alto-falantes. Foram realizados recozimentos com campo induzido observando-se o desempenho da permeabilidade magnética inicial das peças e posteriormente medidas com equipamento de saturação de campo. Esses resultados foram correlacionados com os dados obtidos pelo uso do aço SAE 1020, nas mesmas condições de uso e teste de laboratório. Foram realizados estudos metalográficos, além de análises de composição química das amostras e a relação destes fatores com as propriedades magnéticas. Também foram estudados os dados de usinabilidade das amostras do ferro fundido nodular tratadas termicamente com indução magnética e subseqüentemente comparados com o Aço SAE 1020. Do ponto de vista científico, uma das contribuições deste trabalho, está na influência da indução de campo magnético durante o tratamento térmico das amostras, pois é possível verificar um ganho significativo nas propriedades magnéticas apresentadas pelos

núcleos dos alto-falantes durante os testes de desempenho. A outra está no fato de que ganhos correlacionados ao design do produto possibilitam utilizar o ferro fundido como uma alternativa economicamente viável e perfeitamente ajustável à alta performance dos alto-falantes. Como resultado deste estudo foi demonstrado a possibilidade do uso do recozimento com indução magnética, como forma de aumentar a permeabilidade de um material com alto teor de carbono, no caso específico, o ferro fundido nodular. Este trabalho permite afirmar que é possível desenvolver núcleos magnéticos de alto-falantes em ferro fundido nodular com alto desempenho e também sugerir que outras aplicações onde seja necessário aumento do desempenho magnético esta técnica possa ser aplicada.

Palavras-chave: Design de Produto. Seleção de Materiais. Propriedades Magnéticas. Tratamento Térmico. Ferro Fundido.

## ABSTRACT

This work aims to present the results obtained with the use of induced magnetic field during the heat treatment of Nodular Cast Iron for speaker cores. For this study development, the chosen material is the nodular cast iron due to the low trading costs and ease of purchase on the market. Ninety samples of nodular cast iron were constructed, with different iron, silicon and carbon contents. Samples, when subjected to annealing, were also subjected to magnetic induction. The final temperature on the heat treatment was in the range of 900°C to 920°C, and the magnetic induction was in the range of 16000 to 20000 Gauss. The challenge of this work was in the fact that compositional changes in the nodular cast iron, allied to inclusions of non-magnetizable materials, modify for worse the performance of speaker cores. To obtain a structure that the magnetic field could permeate, the cast iron alloys were selected to eliminate, at most, the presence of non-magnetizable materials, and only then consider a heat treatment process with magnetic induction to make the material suitable for use in speaker cores. To improve the magnetic properties, an alignment of dipoles of the material, through induced magnetic field during annealing was intended. Annealing with induced magnetic field was carried out, observing the performance of the initial magnetic permeability of the samples, and subsequently measured with field saturation equipment. The results were correlated with the obtained data from the use of the SAE 1020 steel, with the same conditions of use and laboratory tests. Metallographic and chemical composition analyses were carried out on the samples, and the correlation of these data with the magnetic properties was estimated. Also machinability of the thermal treated with magnetic induction nodular cast iron samples were analyzed and compared with the SAE 1020 steel. From the scientific point of view, one of the contributions of this work is the influence of induced magnetic field during the heat treatment of the samples, since it was possible to verify a significant gain in the magnetic properties of the speaker cores during the performance tests. Another contribution is the fact that gains correlated with the design of the product enable the use of cast iron as an economically viable and fully adjustable material to the high performance of subwoofers. As a result of this work, the possibility of using annealing with magnetic induction was presented as a way to increase the permeability of a material with high carbon content, in this particular case, the nodular cast iron. This research allows asserting that it is possible to develop speaker magnetic cores of nodular cast iron with high



performance and also suggest that this technique can be applied to other applications where it is necessary to increase their magnetic performance.

Keywords: Product Design. Material Selection. Magnetics Properties. Thermal Treatments. Cast Iron.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Inversão da Lógica de Pensamento entre Engenheiros e Designers (A Importância do Binômio Design e Engenharia como Catalizador de Inovação).....	23
Figura 2 – Diagrama de Fases para o Sistema Ferro-Carbono .....	26
Figura 3 – Estrutura do Alto-Falante .....	27
Figura 4 – Magnetismo Atômico: (A) Diamagnético (B) Magnético.....	28
Figura 5 – Alinhamento de Domínios .....	29
Figura 6 – Processo de Alinhamento Magnético do Material.....	30
Figura 7 – Curva de Magnetização de um Material Ferromagnético.....	30
Figura 8 – Fenômeno da Histerese Magnética, onde o Ciclo de Histerese com Representação de B, H e $Db/Dh$ , Onde $Db/Dh$ tem Dimensão de Permeabilidade, e é Igual à Inclinação da Curva de Histerese .....	31
Figura 9 – Materiais Magneticamente Duros e Moles .....	32
Figura 10 – Elemento Incremental de Volume.....	33
Figura 11 – Caminho “abcd”.....	34
Figura 12 – Diagrama de Fases Ferro-Carbono na Vizinhança do Eutetóide.....	36
Figura 13 – Efeito do Tempo na Decomposição da $Fe_3C$ (Cementita).....	37
Figura 14 – Micrografia Ferro Fundido Nodular, Ataque Nital 3%, Aumento 400x .....	38
Figura 15 – Fluxo Magnético Através da Superfície de Área “A” .....	41
Figura 16 – Circuito com o Anel Bobinado.....	44
Figura 17 – Curvas de Magnetização do Ferro Medidas com Diferentes Temperaturas, após o Recozimento A 800°C .....	46
Figura 18 – Campos Magnéticos Altos, a Indução Decresce com Aumento da Temperatura .....	47
Figura 19 – Permeabilidade do Ferro, em Várias Temperaturas .....	48
Figura 20 – “Histerese” do Ferro Próximo ao Ponto Curie.....	48
Figura 21 – Anel em Fofo Nodular Bobinado Preparado para o Teste de Saturação Magnética.....	49
Figura 22 – Ensaio de Saturação Magnética no Lam (Laboratório de Magnetismo da UFRGS).....	51
Figura 23 – Anel Bobinado Extraído da Peça Fundida na Bancada Submetido a Saturação Magnética .....	51
Figura 24 – Forno de Recozimento com Indução Magnética (Forno 15kw/1200°C).....	53

Figura 25 – (03 Peças) Montadas Dentro da Bobina (Solenóide) Especialmente Construída para este Trabalho.....	53
Figura 26 – Vista Frontal do Forno com Outras Peças Dentro da Bobina (Solenóide) de Indução...	54
Figura 27 – Campo Magnético X Corrente Elétrica.....	55
Figura 28 – Variação Percentual do Campo em Relação ao Centro da Peça .....	55
Figura 29 – Forno 15kw/1200 °C.....	57
Figura 30 – Fonte de Alimentação e a Solenóide de Indução.....	57
Figura 31 – Permeabilidade Magnética “ $\mu$ ” Durante Aplicação de Campo “H”, para Aço SAE 1020.....	61
Figura 32 – Indução Magnética “B” Durante Aplicação de Campo “H”, para Aço SAE 1020.....	61
Figura 33 – Permeabilidade Magnética “ $\mu$ ” Durante Aplicação de Campo “H”, para Peça L1.....	62
Figura 34 – Indução Magnética “B” Durante Aplicação de Campo “H”, para Peça L1 .....	62
Figura 35 – Permeabilidade Magnética “ $\mu$ ” Durante Aplicação de Campo “H”, para Peça L2.....	63
Figura 36 – Indução Magnética “B” Durante Aplicação de Campo “H”, para Peça L2 .....	63
Figura 37 – Permeabilidade Magnética “ $\mu$ ” Durante Aplicação de Campo “H”, para Peça L3.....	64
Figura 38 – Indução Magnética “B” Durante Aplicação de Campo “H”, para Peça L3 .....	64
Figura 39 – Gráficos de Histerese Comparativos entre as Ligas Aço, L1, L2 E L3 .....	65
Figura 40 – Curvas Comparativas de Saturação Magnética entre as Ligas Aço, L1, L2 E L3.....	66
Figura 41 – Peça Polar Antiga/ Aço SAE 1020.....	67
Figura 43 – Peça Polar L1/Fofo “Nova Forma” .....	68
Figura 44 – Micrografia de uma Amostra “Fofo Nodular L1” com Ataque de Nital 2% Aumento 100x.....	70
Figura 45 – Micrografia de uma Amostra “Fofo Nodular L1 Recozido” com Ataque de Nital 2% Aumento 100x.....	70
Figura 46 – Micrografia do Aço SAE 1020 com Ataque de Nital 2% Aumento 100x .....	71
Figura 47 – Simulação do Conjunto Magnético Atual em Aço SAE 1020 do Woofer Wpu1507 ....	73
Figura 48 – Simulação do Conjunto Magnético Utilizando a Liga L1, sem Alteração no Formato da Peça.....	74
Figura 49 – Simulação do Melhor Formato de Peça Polar Utilizando a Liga L1 .....	75
Figura 50 – Simulação do Conjunto Magnético Utilizando liga l2 e Novo Formato de Peça.....	76
Figura 51 – Simulação do Conjunto Magnético Utilizando liga l3 e Novo Formato de Peça.....	76

Figura 52 – Curva de resposta comparativa com protótipos Wpu1507-11/12/13 e Wpu1507 atual....	79
Figura 53 – Sala de Som.....	86

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Linha Típica de Vácuo para Fornos para Alta Temperatura, Fornecidos pela Eurotherm Heat Treatment - Certificada Nacap (National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program) .....	39
Quadro 2 – Ligas com sua Densidade de Fluxo .....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados Obtidos dos Ensaios de Saturação Magnética para Aço 1020 .....	59
Tabela 2 – Dados Obtidos dos Ensaios de Saturação Magnética para Peça L1 .....	59
Tabela 3 – Dados Obtidos dos Ensaios de Saturação Magnética para Peça L2 .....	60
Tabela 4 – Dados Obtidos dos Ensaios de Saturação Magnética para Peça L3.....	60
Tabela 5 – Composição Química Percentual das Amostras, com Teores de Carbono, Silício, Manganês e Fósforo .....	69
Tabela 6 – Parâmetros de Usinagem Utilizados para as Ligas L1, L2 e L3.....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ASTM – American Society for Testing Materials;

B – Densidade de Fluxo Magnético;

$B_n$  - Densidade de Fluxo na Fronteira;

CGS – Sistema (Centímetro-Grama-Segundo);

D – diâmetro externo do anel;

d – diâmetro interno do anel;

FEMM – Método de Elementos Finitos Aplicado ao Magnetismo;

FoFo – Ferro Fundido;

$f$  – frequência;

G – módulo de cisalhamento;

GAP – Espaço entre imã e a peça polar;

GO – Grão Orientado;

GNO – Grão Não Orientado;

H – Força Magnetizante;

I - Corrente Elétrica

L1 – Liga 1 da Amostra de Ferro Fundido;

L2 – Liga 2 da Amostra de Ferro Fundido;

L3 – Liga 3 da Amostra de Ferro Fundido;

LAM – Laboratório de Magnetismo;

LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física;

LACAR – Laboratório de Caracterização de Materiais;

LdSM – Laboratório de Design e Seleção de Materiais;

$l_m$  - comprimento do fio;

m – massa;

N – Número de voltas do enrolamento;

PPGEM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais;

RIM - Recozimento com Indução Magnética;

SI – Sistema Internacional de Medidas;

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

$v$  – tensão elétrica;

$\gamma$  – austenita;

$\alpha$  – ferrita;

$\Delta_{xyz}$  - Volume Incremental;

$\mu$  – permeabilidade;

$\rho$  - densidade.



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
2.1 DESIGN E ENGENHARIA .....	22
2.2 O TRATAMENTO TÉRMICO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA COMO FERRAMENTA PARA AUMENTAR A PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS .....	24
2.3 PRINCÍPIOS BÁSICOS .....	26
<b>2.3.1 A Teoria dos Domínios Magnéticos</b> .....	29
<b>2.3.2 As Relações de Fronteiras no Campo Magnético</b> .....	32
2.4 RECOZIMENTO .....	35
<b>2.4.1 Recozimento de Ligas Ferrosas</b> .....	36
<b>2.4.2 Normalização</b> .....	37
<b>2.4.3 Recozimento pleno</b> .....	38
<b>2.3.4 Recozimento subcrítico</b> .....	38
2.5 EQUIPAMENTO BÁSICO .....	39
2.6 PRINCIPAIS EFEITOS DO VÁCUO NO TRATAMENTO DE MATERIAIS .....	40
<b>2.6.2 Óxidos</b> .....	40
2.7 FORNO PARA RECOZIMENTO .....	40
2.8 FLUXO MAGNÉTICO .....	41
<b>2.8.1 Instrumentos de Medição</b> .....	42
<b>2.8.2 Medição de Histerese DC</b> .....	43
<b>2.8.3 Dimensionamento da Bobina de Teste</b> .....	44
2.9 TEMPERATURA E O PONTO CURIE .....	46
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	49
3.1 MATERIAIS .....	49
3.2 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS DE INDUÇÃO MAGNÉTICA COM RECOZIMENTO (RIM) PARA O FOFO NODULAR L1, L2 E L3 .....	52
3.3 CARACTERÍSTICAS DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO STT01/ BOBINA DE INDUÇÃO .....	54
<b>3.3.1 Composição Química</b> .....	56

<b>3.3.2 Metalografia</b> .....	56
3.4 RECOZIMENTO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA PARA AS PEÇAS L1, L2 E L3.....	56
<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	58
4.1 ANÁLISES E ENSAIOS COMPARATIVOS COM ANÉIS FABRICADOS EM AÇO SAE 1020 E FOFO NODULAR.....	58
<b>4.1.1 Peças em Aço SAE 1020 e FoFo Nodular submetidas à Indução Magnética</b> .....	58
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS QUE SOFRERAM O PROCESSO DE RECOZIMENTO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA.....	65
<b>4.2.1 Composição Química</b> .....	69
<b>4.2.2 Metalografia</b> .....	70
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS QUE SOFRERAM O PROCESSO DE RECOZIMENTO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA QUANTO A SUA USABILIDADE	71
4.4 SIMULAÇÃO DAS PEÇAS QUE SOFRERAM O PROCESSO DE RECOZIMENTO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA.....	72
4.5 DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS.....	77
<b>4.5.1 Testes e Validação das Simulações</b> .....	78
4.6 CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DAS AMOSTRAS TRATADAS.....	81
4.7 CORRELAÇÃO ENTRE PERMEABILIDADE E CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICO-METALÚRGICAS.....	81
4.8 CORRELAÇÃO ENTRE CURVA DE RESPOSTA E CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS-METALÚRGICAS.....	82
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	84
<b>6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b> .....	87
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	88
<b>APÊNDICE A – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADOS AO ELETROMAGNETISMO</b> .....	95

## 1 INTRODUÇÃO

Para adaptar-se às exigências de um mercado industrial cada vez mais concorrente, a indústria moderna se obriga a desenvolver novas técnicas e conceitos de produção, bem como investir em tecnologia para produção de novos materiais, ou substituir os já existentes por outros mais convenientes. Como conceito global, a indústria mundial busca a segurança de qualidade de seus produtos e serviços com menor investimento em material, energia, pessoal, e com a redução de custos de seus produtos e com o processo de produção.

Em indústrias de produtos de fundição o ferro fundido nodular faz concorrência ao alumínio devido as suas propriedades mecânicas, proporcionando peças mais leves. Para a caracterização desse tipo de material podem ser usados métodos não destrutivos de teste, os quais permitem um processo estável e rápido, e com menos perdas (CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 2002).

Com esta compreensão, o estudo foi realizado, o qual consiste na execução do alinhamento dos domínios magnéticos de algumas ligas, desenvolvidas e selecionadas, de FoFo Nodular. Ferro Fundido entende-se como sendo ligas ferrosas com carbono acima de 2%, e também contendo outros elementos de liga como silício, manganês, níquel e outros. As propriedades mecânicas, bem como as magnéticas, são sensíveis aos teores de carbono, tipo de liga de fundição, bem como o tratamento térmico empregado. O material apresenta uma estrutura cristalina típica caracterizada por nódulos de grafita e uma matriz metálica, que envolve estes nódulos, podendo ser ferrítica ou perlítica, ou uma combinação destas duas em função do tratamento térmico.

A importância histórica e comercial do ferro como material magnético deu origem ao termo ferromagnetismo. O ferromagnetismo é resultado da estrutura eletrônica dos átomos (VAN VLACK, 1970). Numa visão microscópica, o ferro é um material magneticamente orientado, no entanto macroscopicamente, ele não é magnético. Isso se explica devido a existência de domínios magnéticos com orientações alternadas compensado-se mutuamente. Na fronteira entre dois domínios magnéticos existe uma barreira de energia chamada barreira magnética, fronteira, ou ainda “Muro de Bloch”. Quando aplicado um campo magnético externo a um material ferromagnético, os domínios magnéticos dentro deste material são orientados na mesma direção do campo aplicado (STEGEMANN, 1990). Para um efeito

macroscópico, o efeito físico que surge durante a magnetização de um material pode ser descrito pela curva de magnetização e com a utilização de um campo magnético alternado teremos a curva ou laço de histerese.

Os parâmetros que influenciam na forma da curva de histerese dos materiais podem ser classificados em dois grupos. No primeiro grupo estão os parâmetros do magnetismo: a intensidade do campo magnético aplicado e a frequência do campo alternado. No segundo grupo estão os parâmetros microestruturais dos materiais: diferenças microestruturais e discordâncias na estrutura cristalina (CALLISTER JUNIOR, 2000).

Tanto as propriedades mecânicas quanto as magnéticas de materiais ferromagnéticos sofrem influência direta de qualquer que seja o tipo de distorção do cristal como, por exemplo, microestrutura ou composição da liga. As distorções cristalográficas dificultam os movimentos das barreiras magnéticas, bem como, das discordâncias mecânicas, o que mostra a existência da forte dependência entre esses efeitos. Isso favorece a determinação não destrutiva dos valores de resistência mecânica e dureza através do uso de testes magnetoindutivos como o da análise harmônica de correntes parasitas.

Existem requisitos básicos que um equipamento deve possuir para ser possível a determinação, através de uma solenóide, das perdas magnéticas que um determinado material, magnetizável, quando este é submetido a uma indução magnética, ou em outras palavras, quando é possível ser percebida uma variação da densidade de fluxo magnético. Estas características irão determinar o melhor desempenho que um determinado alto-falante irá ter ao longo de sua vida útil.

É conhecida a possibilidade de se relacionar as propriedades magnéticas do aço com o comportamento acústico que este material irá ter quando utilizado para fabricação do núcleo magnético, responsável pelo desempenho do equipamento de som. Este trabalho, realizado em conjunto com a Eletrônica Selenium, avaliou o processo de recozimento com indução magnética do Ferro Fundido Nodular, como uma alternativa economicamente viável e extremamente vantajosa para com os objetivos de redução de custo e também para assegurar que o produto produzido esteja dentro das normas de qualidade.

Uma vez que este trabalho foi desenvolvido para mais de um tipo de Ferro Fundido Nodular, mas de baixa variação composicional e que passa por um mesmo processo de fundição, diminuiram os fatores que influenciaram nas propriedades magnéticas do material.

Os fatores que tiveram influência neste estudo foram, principalmente, a presença de carbono, o teor de elementos não desejáveis na sua microestrutura e também a quantidade de nódulos de grafita apresentada pelas amostras após a fundição.

A fim de verificar a aplicabilidade do processo, buscou-se relacionar os dados de propriedades magnéticas, obtidos em ensaios de saturação no LAM da UFRGS, com os encontrados nos ensaios realizados pela Eletrônica Selenium em seu laboratório de testes.

Além disso, foram analisadas as variações das permeabilidades, frequências e das forças magnéticas, bem como suas relações com o desempenho dos alto-falantes. As características do FoFo Nodular obtidas a partir de análises metalográficas e do conteúdo de inclusões nas amostras, indicaram quais das composições, com seus respectivos tratamentos térmicos de recozimento, foram as melhores opções de utilização na construção dos núcleos magnéticos.

Paralelamente, foram realizados estudos observando-se a forma, do núcleo magnético, a fim de verificar a influência deste fator para o aumento do fluxo magnético, fazendo um comparativo com o material utilizado, o Aço SAE 1020.

A Eletrônica Selenium S.A. produz Alto-Falantes (Woofers, Mid-Rangers, Drivers, Tweeters), Caixas-Acústicas, Amplificadores, Mesas de Som e componentes para sonorização utilizando os processos e tecnologias mais avançadas do mercado. Para atestar a qualidade dos produtos e garantir que suas características estejam dentro das normas estabelecidas, são feitos ensaios acústicos em amostras retiradas de cada lote de peças produzidas, obtendo-se dados de limite de potência, permeabilidade, impedância, entre outras variáveis significativas para o bom desempenho do produto.

A Norma ASTM A596/A596M - 95 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995b) determina as condições básicas que um equipamento, que se utiliza das propriedades magnéticas, deve possuir para ser possível a sua utilização em aplicações que necessitem alto desempenho magnético. Através de uma solenóide que envolve um determinado material, magnetizável, submete-se o mesmo a uma indução magnética, tornando-se possível perceber uma variação da densidade de fluxo magnético através de sua estrutura cristalina. Este processo ao longo do tempo " $t$ " provoca sua saturação magnética, ou seja, uma acumulação de linhas de fluxo ao longo da rede cristalina, dificultando a passagem de outras que estejam incidindo sobre o material.

Neste trabalho, no capítulo 2 é feita uma abordagem por meio de uma revisão da literatura, onde são destacados os tópicos mais relevantes sobre tratamento térmico, princípios básicos de magnetismo, teorias dos domínios magnéticos, relações de fronteiras no campo magnético, processos e medições utilizadas.

No capítulo 3, é feita a apresentação do material estudado, os ensaios e procedimentos utilizados para obtenção de parâmetros que possibilitem a análise dos resultados

No capítulo 4, são apresentados os resultados das análises e ensaios comparativos de saturação magnética e permeabilidade dos materiais em estudo. Também é apresentada a tecnologia de recozimento com indução magnética e seus desdobramentos. Ainda no capítulo 4, é apresentado o desenvolvimento do protótipo em FoFo com o nova forma e os testes de validação das simulações com as respectivas curvas de respostas realizadas das ligas produzidas. Também é realizada a discussão sobre os resultados obtidos e a escolha pela melhor solução.

O capítulo 5, apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados desta pesquisa.

No capítulo 6, são apresentadas sugestões para futuros trabalhos.

Na parte final deste estudo são apresentadas as referências bibliográficas e mais uma breve colocação sobre o Método de Elementos Finitos Aplicado ao Eletromagnetismo (Apêndice A).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DESIGN E ENGENHARIA

A velocidade com que a tecnologia e os recursos científicos chegam até nós é realmente impressionante. Estes recursos pressupõem uma incessante adaptabilidade no desenvolvimento da inovação e na lógica da interação entre Design e Engenharia. A escolha dos materiais e dos processos produtivos é hoje quase que ilimitada, o que é uma boa e má notícia para os designers. Boa, porque podem, investindo o esforço necessário, utilizar os materiais e métodos de fabricação como fatores de inovação; má, porque a tranquilidade dos tempos em que a escolha era limitada está encerrada. Passou o tempo em que a “espada era de aço”, o “muro era de pedra”, que a “mesa era de madeira” e a “coroa era de ouro”. Existe, hoje, uma perda de reconhecibilidade “Material X Produto” (KINDLEIN JÚNIOR, 2006).

Desta maneira, devido a esta abundância de novos materiais, a inovação passa a ser uma constância na sociedade moderna. Também é importante ressaltar que a seleção dos materiais e os processos de fabricação passaram a ser um assunto não exclusivamente de engenharia, mas uma abordagem única entre design e engenharia.

Em se tratando de materiais e processos de fabricação, podemos dizer que o processo inovador na área de design está diretamente relacionado com o fator mercadológico e econômico, pois uma inovação é potencializada, quando existe o interesse e a apropriação comercial de invenções ou a introdução de aperfeiçoamentos nos bens e serviços utilizados pela sociedade (ESCOREL, 1999).

Uma das questões importantes desta relação “Design e Engenharia” está no estudo que o designer faz em relação ao funcionamento do consumidor, ou seja, a percepção que ele, consumidor, tem em relação ao produto. Normalmente, em uma equipe de concepção de produto, o designer fornece ao engenheiro um processo de desenvolvimento no qual características estruturais e funcionais são deficitárias. O engenheiro elabora produtos muito funcionais e com características técnicas claramente dominadas, mas que não leva em conta o “afeto” do consumidor (percepção, cor, forma, textura). Cada um aprenderá a linguagem através do conhecimento trazido pelo outro, proporcionando, desta maneira, os instrumentos

para interpretar e transformar a compreensão que permite reconstruir o processo de concepção (KINDLEIN JÚNIOR, 2006).

A figura 1 apresenta uma interpretação da lógica inversa de pensamento que os engenheiros e designers têm quando elaboram um novo produto. Cabe buscar uma mobilização nas diversas etapas do projeto em que designers e engenheiros possam se comunicar trazendo sua colaboração da forma mais eficiente possível.

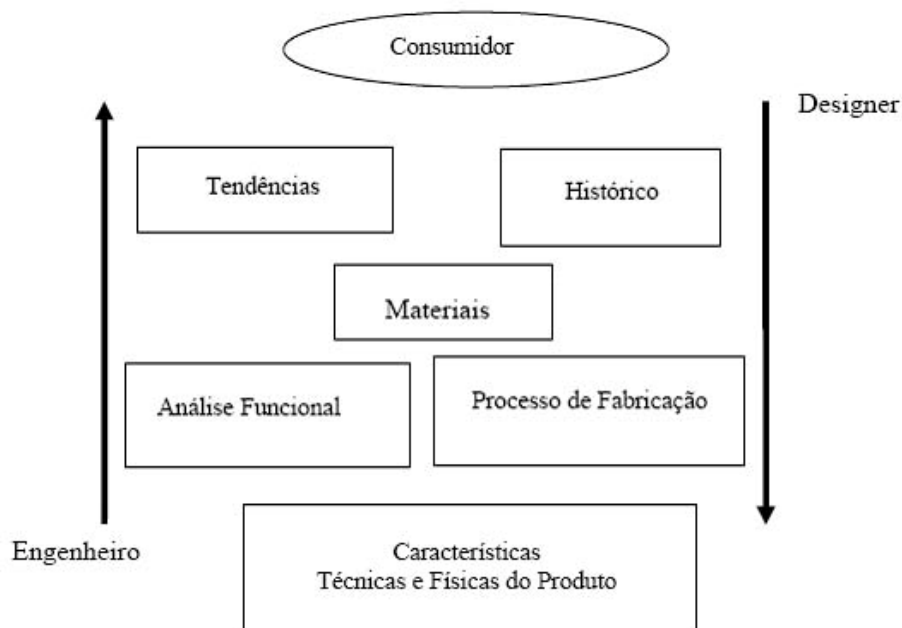


Figura 1 – Inversão da Lógica de Pensamento entre Engenheiros e Designers (A Importância do Binômio Design e Engenharia como Catalizador de Inovação)

Fonte: Kindlein Júnior, 2006, p. 7.

Especificamente, neste trabalho, a relação “Design e Engenharia” foi estudada sob a ótica de seleção de materiais e processos com aplicação de campo magnético em núcleos de alto-falantes.



## 2.2 O TRATAMENTO TÉRMICO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA COMO FERRAMENTA PARA AUMENTAR A PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

A Siderurgia e a Indústria da eletricidade, nas últimas décadas, vêm se dedicando cada vez mais em obter materiais que atendam as exigências do mercado consumidor. Um por cento do total de aços produzidos anualmente é utilizado por suas propriedades magnéticas. De um total aproximado de 7 milhões de toneladas anuais, 1 milhão é utilizada em transformadores (os aços chamados de grão-orientado – GO), 4 milhões são usados em motores elétricos de bom rendimento e 2 milhões, aço tipo SAE 1006, são usados nas aplicações de menor exigência (LANDGRAF, 2001).

O Recozimento Induzido é utilizado na metalurgia principalmente para a orientação dos grãos, buscando induzir ao material uma textura cristalográfica do tipo  $\{110\} \langle 001 \rangle$ , ou seja, quase a totalidade dos cristais que compõe o material têm seus planos  $\{110\}$  paralelos à superfície, com a direção  $\langle 001 \rangle$  paralelo à direção longitudinal do material. Nestas condições, suas propriedades magnéticas são excelentes. O principal objetivo das pesquisas realizadas vêm sendo pela busca de materiais com melhores características magnéticas, pois com a redução das dimensões e a conseqüente diminuição das perdas por Histerese e Foucault, que impactam diretamente no desempenho destes equipamentos, o rendimento destas máquinas aumentariam em até 36% (LANDGRAF, 2001).

O fator econômico é outro principal motivo da utilização destes materiais na indústria, uma vez que o processo influencia diretamente a qualidade dos produtos finais, sendo o maior ganho observado na redução de consumo de energia e o próprio rendimento mecânico gerado pelas máquinas fabricadas. O Recozimento com indução magnética permite ainda, numa fase mais avançada, melhorar as propriedades mecânicas, físicas e químicas destes materiais, uma vez que sua estrutura cristalográfica apresenta um arranjo quase que totalmente orientado facilitando a previsão de seu desempenho ao longo da vida-útil dos equipamentos com eles produzidos. Durante o processo de recozimento com indução magnética, é possível observar as mudanças na rede cristalina, associadas às curvas de histerese do material, bem como os ganhos vinculados à permeabilidade.

Aços silicosos de grão não orientado – GNO – são utilizados numa grande gama de aplicações onde alta permeabilidade ou baixa perda magnética ou ambas são requeridas. Estas propriedades são determinadas em grande parte pela textura de recozimento final, que por sua vez tem dependência com sua estrutura de grãos e textura desenvolvidas no estágio intermediários de sua produção. É interessante que se obtenha o maior número de grãos com a direção [100] e o menor número daqueles com a direção [111] paralelas à superfície, no caso uma chapa plana, devido às características de anisotropia magnética do cristal Fe-Si.

Atuando na temperatura de acabamento do processo de laminação a quente é possível modificar a estrutura “ $\gamma$ ” ou “ $\alpha$ ”, ou seja, austenita e ferrita respectivamente. Durante este processo a estrutura de grãos e a textura da chapa laminada atingem uma evolução estrutural adequada, ou seja, é obtida uma estrutura final com grãos orientados e domínios magnéticos alinhados. Na laminação à quente de um aço, com teor de carbono inferior a 2,11% e baixo teor de silício, tem-se um desempenho muito bom no que diz respeito a permeabilidade magnética utilizando o campo austenítico. Conforme pode-se localizar e observar na figura 2, nesta área torna-se fácil tratar-se termicamente o material haja vista que nessa região o teor de carbono é muito baixo e sua decomposição é total. Esta estrutura produz um material com permeabilidade magnética bem maior do que os aços com a laminação sendo executada no campo ferrítico da liga (PAOLINELLI, 2002).

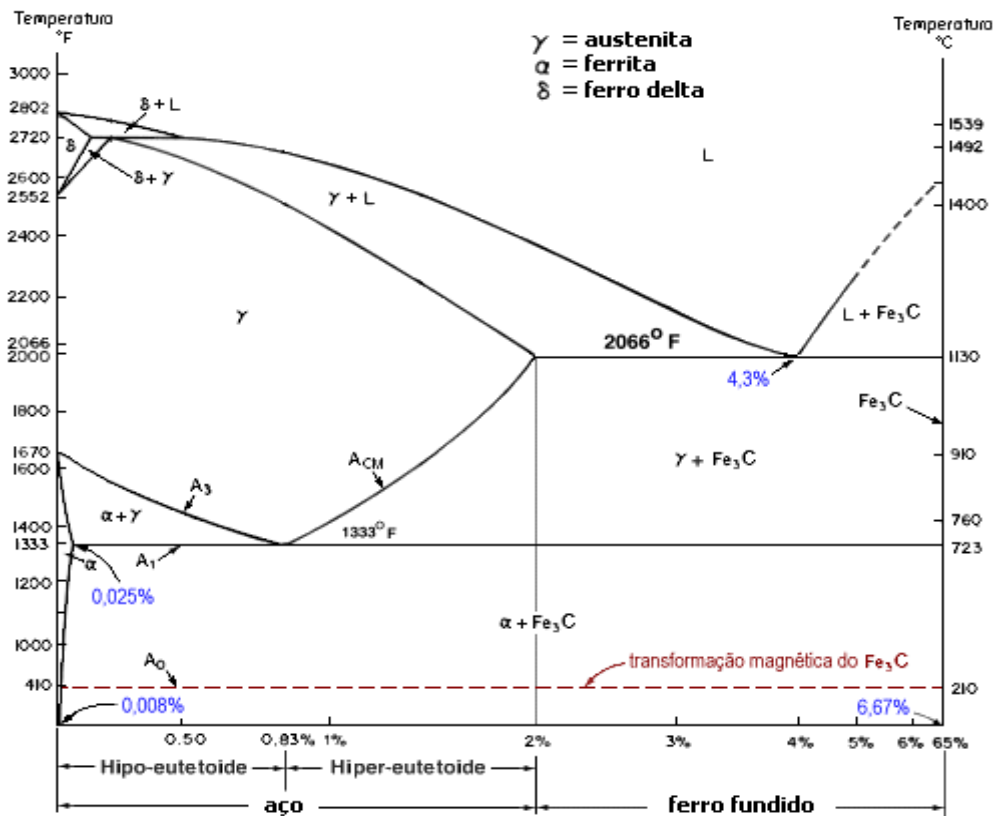


Figura 2 – Diagrama de Fases para o Sistema Ferro-Carbono  
 Fonte: ASM, v. 4, 1991.

O propósito desta pesquisa foi apresentar a evolução das propriedades magnéticas resultantes de um ferro fundido nodular com teores de carbono acima de 2,11% e com uma matriz ferrítica, ao contrário do aço com baixo teor de carbono, conforme mencionado anteriormente.

### 2.3 PRINCÍPIOS BÁSICOS

O Recozimento com Indução Magnética (RIM) se baseia na aplicação de um campo magnético externo (o campo  $H$  dado em A/m ou Oerteds), vindo de um ímã, ou no caso deste experimento, de uma corrente elétrica, para que os “momentos magnéticos atômicos” se orientem e induzam, no espaço ao seu redor, um campo magnético muito maior que o campo externamente aplicado. Desta forma, entende-se a permeabilidade magnética “ $\mu$ ” como sendo o quanto um material pode amplificar o campo nele aplicado.

Aplica-se esta propriedade, por exemplo, no caso do alto-falante. O movimento produzido no cone (parte integrante do alto-falante na figura 3), associado à corrente elétrica aplicada ao imã, gera no “GAP” (entreferro), que é espaço entre o imã e peça polar, um campo magnético que produz, como resultado, um alinhamento dos “domínios magnéticos” dos átomos de ferro. O resultado deste fenômeno gera como resposta final uma intensidade de campo magnético no interior do material, induzido por um campo que foi externamente aplicado. A propriedade, em questão, é medida em Gauss (no sistema CGS) ou em tesla (no sistema SI). O desempenho do material, ou seja, sua permeabilidade é dada pela relação entre a indução magnética e a intensidade do campo magnético que foi aplicado.

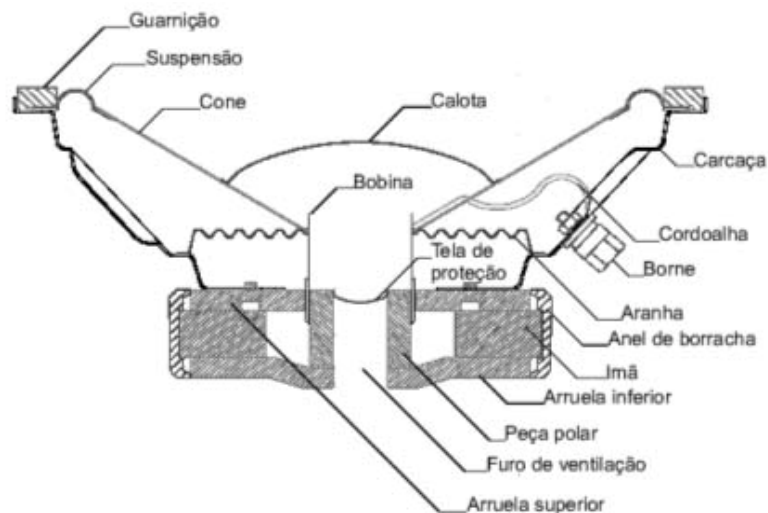


Figura 3 – Estrutura do Alto-Falante  
Fonte: Eletrônica Selenium S.A., 2008.

Os materiais metálicos magnéticos, entre eles o Ferro (Fe), o Níquel (Ni), o Cobalto (Co) e também algumas ligas por eles formadas, são os que apresentam as maiores e melhores características intrínsecas no que diz respeito à capacidade de amplificar milhares de vezes o campo externo nele aplicado (PAOLINELLI, 2002). Por esta razão, em virtude de possuírem tais propriedades, são utilizados na construção da maioria das máquinas elétricas, destacando-se os geradores, transformadores, motores e também equipamentos acústicos. Com essa variedade tão grande de diferentes tipos de materiais magnéticos se faz necessário entender porque somente estes são capazes de carregar um momento magnético permanente e outros não.

Os materiais comentados, como o ferro, são fortemente magnéticos, enquanto outros pares que figuram na tabela periódica não o são, ou apresentam esta propriedade de forma muito atenuada, dando origem assim ao termo “Ferromagnetismo” que caracteriza os elementos deste grupo. O magnetismo está associado à estrutura eletrônica dos átomos de um elemento ou composto e podem ser subdivididos em cinco grupos: Diamagnéticos, Paramagnéticos, Ferromagnéticos, Ferrimagnéticos e Antiferromagnéticos.

No máximo dois elétrons podem ocupar cada um dos níveis de energia de um átomo isolado e que isso também é válido para os átomos de uma estrutura cristalina. Esses dois elétrons têm spins contrários e, como cada elétron gira em torno de si, cria um pequeno magneto, com os correspondentes pólos norte e sul, conforme figura 4.

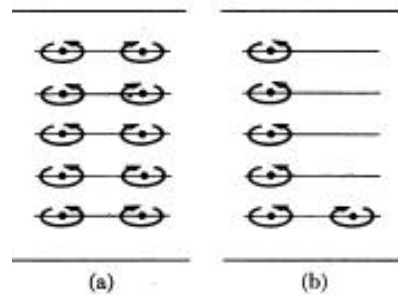


Figura 4 – Magnetismo Atômico: (a) Diamagnético (b) Magnético  
 Fonte: Filardo, [200-], p. 1.

Geralmente, o elemento tem o seu número de elétrons com os spins balanceados, ou seja, o material é magneticamente insensível. Por outro lado, quando os subníveis não estão corretamente preenchidos, ocorre um desbalanceamento dos spins, fazendo com que o material tenha um momento magnético global não nulo, ou seja, como os átomos ferromagnéticos adjacentes se alinham mutuamente de forma a terem uma orientação nesta direção, ocorre o aparecimento, nos grãos das estruturas cristalinas, dos domínios magnéticos.

Nos materiais magnéticos balanceados, os domínios estão orientados ao acaso, ou seja, o efeito magnético está nulo, sem presença alguma de qualquer tipo de campo magnético. Porém, se os domínios forem alinhados pela presença de algum campo magnético externo, em uma direção aparecerá um efeito adicional, diz-se então que o material se torna magnético e que poderá permanecer ou não após a retirada do campo externo conforme figura 5.



Figura 5 – Alinhamento de Domínios  
Fonte: Filardo, [200-], p. 1.

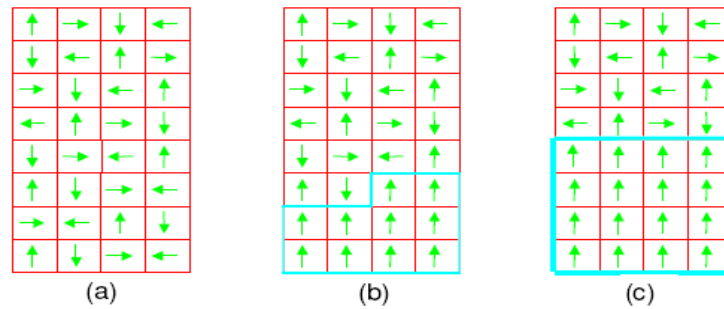
Para se estabelecer quando o efeito da magnetização é permanente ou não, diz-se que o mesmo é “material magnético duro” ou “material magnético mole”. Esta definição é apropriada, para este caso, pois os materiais mecanicamente duros são magneticamente duros. Os materiais perdem a ordenação dos domínios magnéticos quando são submetidos ao recozimento, ou seja, quando uma atividade térmica é imposta provocando a desorientação dos domínios (FILARDO, [200-]).

### 2.3.1 A Teoria dos Domínios Magnéticos

O domínio magnético é definido como sendo o espaço onde os átomos de um determinado elemento possuem o mesmo alinhamento magnético. Portanto, o domínio comporta-se como sendo um pequeno ímã permanente e para existir este comportamento, deverá ocorrer um número considerável destes dentro de uma amostra de material, ou seja, o número de domínios magnéticos de um determinado volume de material é definido a partir de complexo balanço de energia.

Na figura 6, apresenta-se esquematicamente uma amostra de material ferromagnético com seus domínios aleatoriamente orientados onde o magnetismo resultante é nulo e posteriormente passando pela aplicação de um campo externo onde seus domínios começam a sofrer uma orientação e conseqüentemente um aparecimento de um campo magnético não nulo. À medida que o campo magnético vai sendo aumentado, a dificuldade de se obter um novo alinhamento cresce proporcionalmente a esta tentativa, ou seja, começa a obter-se uma

saturação do material magnético. Projetando-se a curva resultante da densidade de fluxo  $B$ , em função da intensidade de campo magnético  $H$  aplicado tem-se a curva de magnetização conhecida, onde um aumento de  $H$  resultará um aumento menor de  $B$ . Uma força magnetizante maior resultará em uma intensidade também maior de suas linhas de fluxo magnético.



(a) - Domínios magnéticos desalinhados, (b) e (c) - se alinhando com o campo externo

Figura 6 – Processo de Alinhamento Magnético do Material  
Fonte: UNISANTA, c2006-2008.

Na curva de magnetização, da figura 7, destacam-se pontos importantes:

Região A – Permeabilidade “ $\mu$ ” é constante.

Região B - “Joelho” da curva, maior valor de  $B$  antes da saturação.

Região C - “Região de saturação”, onde um aumento de  $H$  pouco aumenta  $B$ .

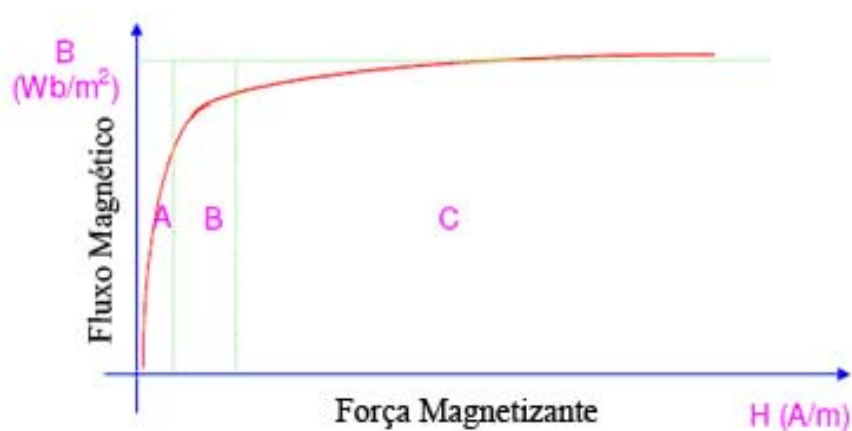


Figura 7 – Curva de Magnetização de um Material Ferromagnético  
Fonte: UNISANTA, 2006-2008.

Também é importante ressaltar que ao ser reduzido o campo magnético em um material ferromagnético, este campo não se reduz a zero e pode haver um magnetismo residual na amostra deste material. Isto ocorre porque durante o processo de retirada do campo os domínios magnéticos voltam a ter um desalinhamento natural e parte deles permanecem com a nova reestruturação de quando sofreram ação do campo externo. Para o material voltar a ter campo resultante nulo é necessário mais energia, parte dela proveniente do próprio material e outra vinda de uma fonte externa, ou seja, um campo reverso externo deve ser aplicado a fim de restaurar o equilíbrio magnético.

Quando a intensidade de campo magnético  $H$  for variada de zero até um valor positivo, desse valor positivo até um valor negativo, passando por zero, e o valor negativo até zero, obteremos uma curva característica denominada ciclo de histerese, mostrada na figura 8.

O fenômeno da histerese magnética é definido como o atraso causado na variação de  $B$ , devido a uma variação de  $H$ .

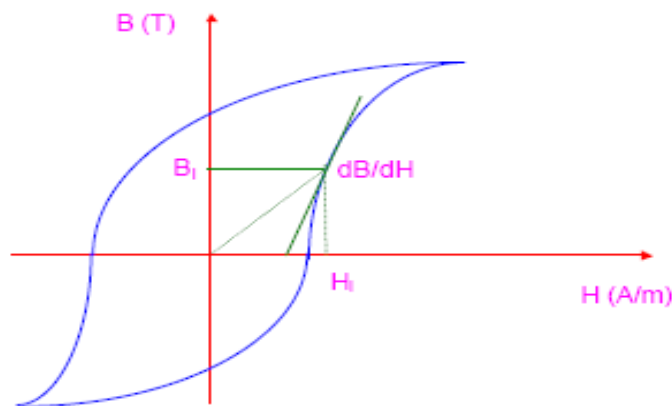


Figura 8 – Fenômeno da Histerese Magnética, onde o Ciclo de Histerese com Representação de  $B$ ,  $H$  e  $dB/dH$ , onde  $dB/dH$  tem Dimensão de Permeabilidade, e é Igual à Inclinação da Curva de Histerese  
Fonte: UNISANTA, c2006-2008.

Os materiais ferromagnéticos como salientado anteriormente podem ser definidos como macios que tem um ciclo de histerese estreito (fácil magnetização) e duros que possuem um ciclo de histerese largos (difícil magnetização), conforme figura 9. Assim, para definir curva de magnetização e permeabilidade  $\mu$ , é possível dizer que a curva de magnetização é obtida tomando-se os valores máximos positivos de  $B$  e  $H$  em vários ciclos de histerese (o primeiro variando de zero a um valor de  $H$ , o segundo de zero a um valor de  $H$  um pouco



maior, e assim por diante). A permeabilidade  $\mu$  é definida como sendo a relação entre  $B$  e  $H$  nessa curva de magnetização.

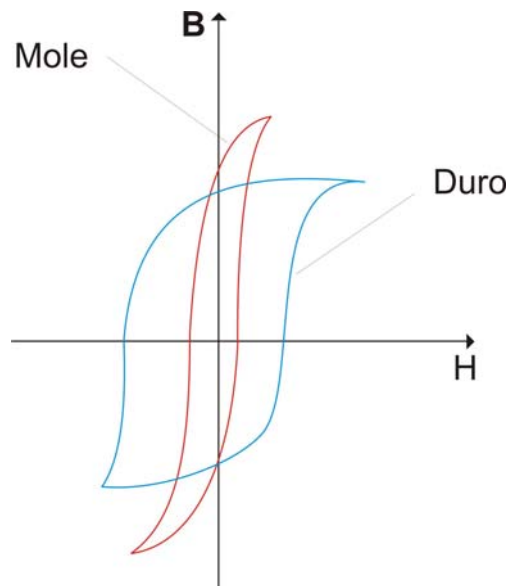


Figura 9 – Materiais Magneticamente Duros e Moles  
Fonte: UNISANTA, c2006-2008.

### 2.3.2 As Relações de Fronteiras no Campo Magnético

As condições de fronteira entre dois meios diferentes, observando do ponto de vista da condução de fluxo magnético, apresenta variações que podem ser muito relevantes em se tratando de permeabilidade magnética “ $\mu$ ”.

Considerando o volume incremental  $\Delta x \Delta y \Delta z$ , imerso em um campo magnético que cruza meios diferentes, conforme figura 10, e aplicando a lei de Gauss para o magnetismo tem-se:

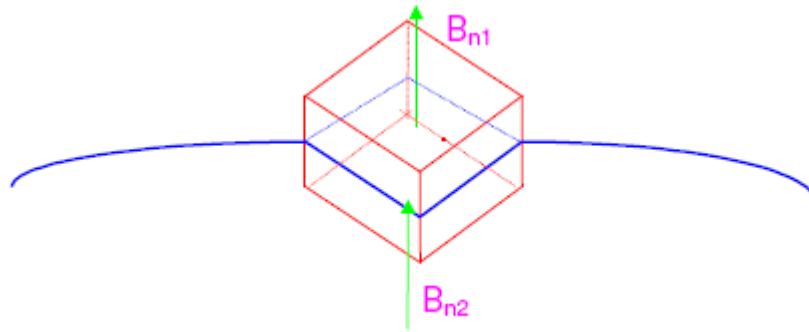


Figura 10 – Elemento Incremental de Volume  
Fonte: UNISANTA, c2006-2008.

Lei de Gauss:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0; \quad (1)$$

$$B_{n2} \Delta x \Delta z = B_{n1} \Delta x \Delta z; \quad (2)$$

$$B_{n1} = B_{n2}. \quad (3)$$

Concluindo, as componentes normais do vetor indução magnética na fronteira entre dois meios são iguais.

Lembrando que:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}; \quad (4)$$

tem-se:

$$\mu_1 H_{n1} = \mu_2 H_{n2}; \quad (5)$$

ou ainda:

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{H_{n2}}{H_{n1}}. \quad (6)$$

Ou seja, as componentes normais do vetor intensidade de campo magnético se relacionam pelo inverso entre as permeabilidades dos meios.

Considerando também o caminho “abcd” imerso em um campo magnético, conforme figura 11 e aplicando a “Lei de Ampère” tem-se:

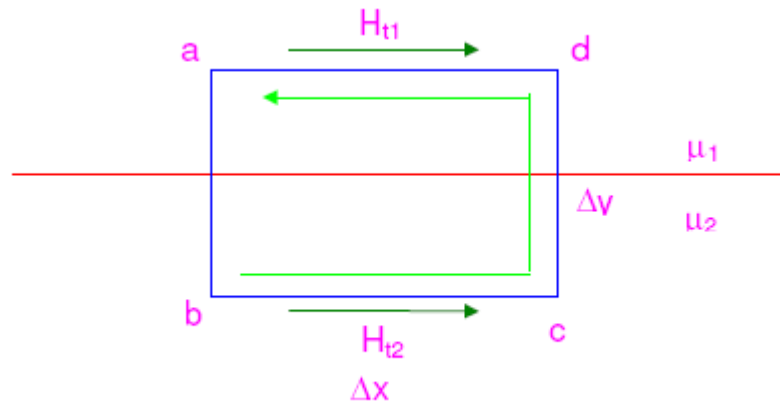


Figura 11 – Caminho “abcd”  
Fonte: UNISANTA, c2006-2008.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L} = I. \quad (7)$$

Fazendo  $\Delta y$  tender a zero, a integração é feita apenas em  $\Delta x$ , portanto:

$$H_{t2} \cdot \Delta x \cos 0 + H_{t1} \cdot \Delta x \cos 180^\circ = I; \quad (8)$$

$$\Delta x (H_{t2} - H_{t1}) = I; \quad (9)$$

$$H_{t2} - H_{t1} = \frac{I}{\Delta x}. \quad (10)$$

O termo  $I/\Delta x$  representa uma densidade de corrente na superfície da fronteira (densidade laminar de corrente), que será representada pela letra  $\kappa$ . Normalmente pode-se considerar que as correntes estão confinadas nos enrolamentos, de forma, na grande maioria dos casos,  $\kappa = 0$ . Assim:

$$H_{t2} = H_{t1}; \quad (11)$$

e:

$$\frac{B_{t2}}{B_{t1}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}. \quad (12)$$

Ou seja, as componentes tangenciais do vetor intensidade de campo magnético são iguais, e as componentes tangenciais do vetor indução se relacionam pela razão direta entre as permeabilidades magnéticas dos meios (UNISANTA, c2006-2008).

## 2.4 RECOZIMENTO

O termo “recozimento” se refere a um tratamento térmico no qual um material é exposto a uma temperatura por um período de tempo prolongado, sendo ele então resfriado lentamente. Normalmente, o recozimento é realizado com os objetivos de (1) aliviar tensões; (2) tornar o material com menor dureza, dúctil e tenaz; e/ou (3) produzir uma micro estrutura específica. É possível realizar diferentes tratamentos térmicos de recozimento; eles são caracterizados pelas mudanças que são induzidas, as quais muitas vezes são microestruturais, e que são responsáveis pela alteração das propriedades mecânicas e também elétricas, quando se trata de materiais ferromagnéticos.

Qualquer processo de recozimento consiste em três estágios, quais sejam: (1) aquecimento até a temperatura desejada, (2) manutenção ou “encharcamento” naquela temperatura, e (3) resfriamento, geralmente até a temperatura ambiente. O tempo é um parâmetro importante nesses procedimentos. Durante o aquecimento e o resfriamento, existem gradientes de temperatura entre as partes de fora e de dentro da peça; as suas magnitudes dependem do tamanho e da geometria da peça. O tempo ideal de recozimento deve ser longo o suficiente para permitir quaisquer reações de transformação necessárias. A temperatura de recozimento também é um importante fator a ser considerado; o recozimento pode ser acelerado pelo aumento da temperatura, uma vez que normalmente estão envolvidos processos de difusão (CALLISTER, 2000).

### 2.4.1 Recozimento de Ligas Ferrosas

Diversos procedimentos de recozimento diferentes são empregados para melhorar as propriedades das ligas de aço. Entretanto, antes de esses métodos serem discutidos, torna-se necessário fazer alguns comentários em relação à identificação das fronteiras entre as fases. A figura 12 mostra a parte do diagrama de fases ferro-carbono na vizinhança do eutetóide. A linha horizontal na temperatura eutetóide, identificada por convenção como  $A_1$ , é conhecida “temperatura crítica inferior”, abaixo da qual, sob condições de equilíbrio, toda a austenita terá se transformado nas fases ferrita e cementita. As fronteiras entre as fases que estão identificadas por  $A_3$  e  $A_m$  representam as linhas que compõem a “temperatura crítica superior”, para os aços hipoeutetóides e hipereutetóides, respectivamente. Para temperaturas e composições acima dessas fronteiras, somente a fase austenita irá prevalecer (CALLISTER 2000).

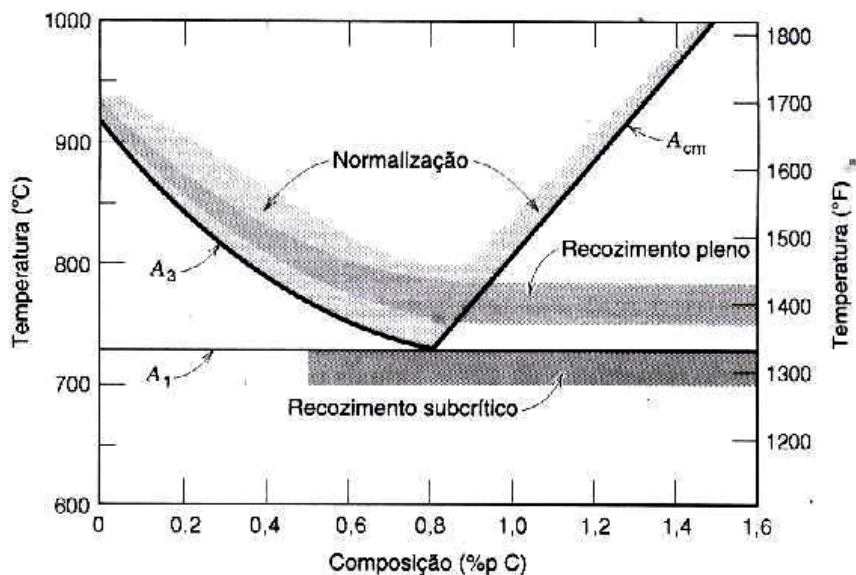


Figura 12 – Diagrama de Fases Ferro-Carbono na Vizinhança do Eutetóide  
Fonte: ASM, 1991, v. 4, p. 661.

Também é possível observar que os efeitos na estrutura do carvão de ferro do Ferro Fundido Nodular são relevantes, pois com a elevação da temperatura, conforme mostrado na figura 13 (ASM, 1991), ocorre a decomposição do carvão de ferro  $\text{Fe}_3\text{C}$  (Cementita).

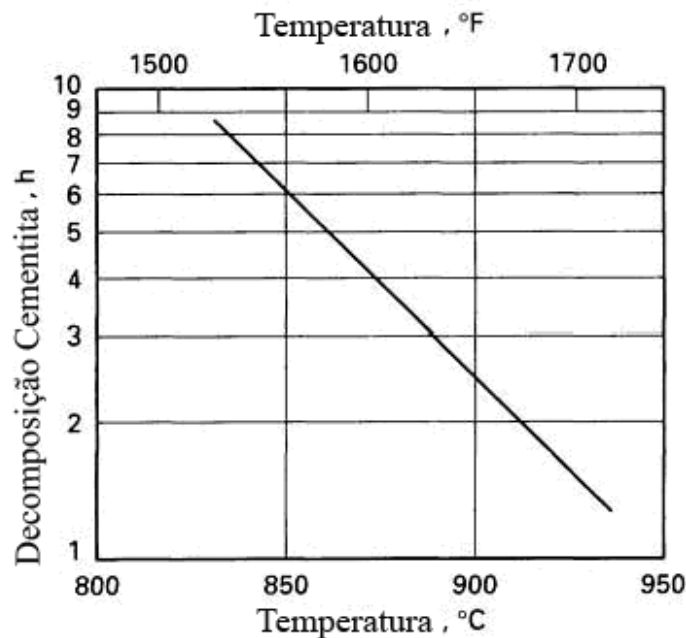


Figura 13 – Efeito do Tempo na Decomposição da  $\text{Fe}_3\text{C}$  (Cementita)

Fonte: ASM, 1991, v. 4, p. 1496.

## 2.4.2 Normalização

Aços que foram deformados plasticamente mediante, por exemplo, uma operação de laminação, são compostos por grãos de perlita (e, muito provavelmente, uma fase proeutetóide), que possuem um formato irregular e que são relativamente grandes, mas que variam substancialmente em tamanho. Um tratamento térmico conhecido por “normalização” é usado para refinar os grãos, (isto é, para diminuir o tamanho médio do grão) e produzir uma distribuição de tamanhos mais uniformes. A normalização é obtida mediante o aquecimento a uma temperatura de aproximadamente 55 a 85°C acima da temperatura crítica superior, que é, obviamente, dependente da composição, como indicado na figura 12. Após ser dado tempo suficiente para que a liga seja completamente transformada em austenita, no que se constitui um procedimento que é conhecido por “austenitização”, o tratameto é encerrado pelo resfriamento ao ar (CALLISTER, 2000).

### 2.4.3 Recozimento pleno

Um tratamento térmico conhecido por “recozimento pleno” é usado com frequência em aços com teores baixos e médios de carbono que serão submetidos a usinagem ou que irão experimentar uma extensa deformação plástica durante uma operação de deformação. A liga é austenitizada pelo seu aquecimento a até 15 a 40°C (30 a 70°F) acima das linhas  $A_3$  ou  $A_1$ , conforme indicado na figura 13, até que seja atingida uma condição de equilíbrio. A liga é então resfriada no próprio forno; isto é, o forno de tratamento térmico é desligado e tanto o forno como o aço resfriam até a temperatura ambiente à mesma taxa, um processo que demanda horas de resfriamento. O procedimento de resfriamento em recozimento pleno demanda tempo; entretanto, tem-se como resultado uma microestrutura que possui grãos pequenos e uma estrutura granular uniforme conforme figura 14 (ASM, 1991, v. 4; CALLISTER, 2000).

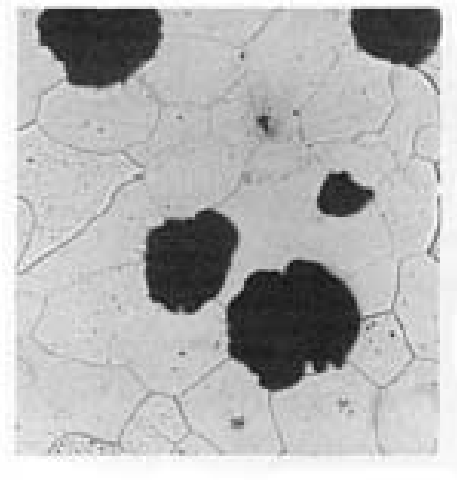


Figura 14 – Micrografia Ferro Fundido Nodular, Ataque Nital 3%, Aumento 400x  
Fonte: ASM, 1991, v. 4, p. 1488.

### 2.3.4 Recozimento subcrítico

Aços que contêm teores médios e altos de carbono e que possuem uma microestrutura composta por perlita grosseira uniforme podem ainda ser muito duros para serem convenientemente usinados ou deformados plasticamente. Esses aços, e na realidade qualquer

aço, podem ser termicamente tratados ou recozidos para desenvolver a estrutura da cementita globulizada. O tratamento térmico de “recozimento subcrítico” consiste em aquecer a liga a uma temperatura imediatamente abaixo da temperatura eutetóide, ou seja, a linha  $A_1$  conforme figura 13, ou até aproximadamente  $700^\circ\text{C}$ , na região  $\alpha + Fe_3C$  do diagrama de fases. Se a microestrutura original contiver perlita, os tempos de recozimento subcrítico irão ficar, em geral, na faixa entre 15 e 25 h. Durante esse processo de recozimento existe uma coalescência do  $Fe_3C$  para formar as partículas globulizadas (CALLISTER, 2000).

## 2.5 EQUIPAMENTO BÁSICO

Muitos processos realizados utilizando o tratamento térmico de recozimento são feitos em fornos à vácuo. Os fornos à vácuo são usados para processos em altas temperaturas, e variam em capacidade e tamanho. Os equipamentos vêm sendo melhorados e otimizados constantemente nos últimos anos e utilizados largamente na indústria aeroespacial e automotiva. O vácuo é considerado quando a pressão estiver abaixo da pressão atmosférica tanto em aplicações industriais como também em pesquisas e é fator crucial no sucesso dos trabalhos. As linhas típicas para fornos à vácuo são estabelecidas conforme o quadro 1, com extensa utilização em processos de alta confiabilidade.

<b>Linha Vácuo</b>	<b>mBar</b>
Atmosfera (ambiente)	10E+3
Baixo a médio vácuo	10E+3 a 10E-3
Alto vácuo	10E-3 a 10E-7

Quadro 1 – Linha Típica de Vácuo para Fornos para Alta Temperatura, Fornecidos pela Eurotherm Heat Treatment - Certificada Nacap (National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program)  
Fonte: EUROTHERM, 2008.



## 2.6 PRINCIPAIS EFEITOS DO VÁCUO NO TRATAMENTO DE MATERIAIS

### 2.6.1 Pressão

A Pressão parcial na região mais elevada do vácuo, o ar residual do forno, particularmente o hidrogênio (H) e o oxigênio (O) são reduzidos significativamente e proporcionarão aos componentes nelas imersos uma eliminação quase por completa da oxidação superficial. A redução do nitrogênio (N) residual também trás muitos benefícios aos materiais que de uma forma ou outra formariam alguns nitritos, mesmo que o nitrogênio ajude a diminuir a descarbonetação que modifica de maneira importante as suas propriedades.

### 2.6.2 Óxidos

A decomposição de óxidos na superfície dos componentes podem ocorrer devido as taxas de variação de temperatura, bem como os tipos de materiais que venham a ser tratados termicamente, ou seja, suas composições de liga, conforme as curvas utilizadas durante o recozimento, produzirão diversos óxidos que variarão também na sua quantidade e disposição na superfície do componente. Também é importante salientar que uma quantidade exagerada de óxidos na superfície, em se tratando de peças semi-acabadas, trás prejuízos importantes que devem ser avaliados, pois os processos de usinagem tornarão o custo final alto.

## 2.7 FORNO PARA RECOZIMENTO

Os fornos à vácuo utilizados para tratamentos térmicos, como o de recozimento, tem várias configurações, bem como diversos fabricantes. Todos eles desenvolvem o seu projeto obedecendo normas de engenharia que possibilitam operar dentro dos parâmetros exigidos pelos processos em questão e também utilizam componentes e materiais comuns que

favorecem um monitoramento dos parâmetros mais importantes, como por exemplo: câmaras cerâmicas múltiplas, sistema de vácuo, ventilação, aquecimento elétrico (resistência) e/ou gás e sistema de resfriamento.

## 2.8 FLUXO MAGNÉTICO

O Fluxo Magnético  $\phi$  pode ser representado pelo número de linhas de fluxo que penetram perpendicularmente em uma secção definida de um campo magnético conforme figura 15, equações 13 e 14.

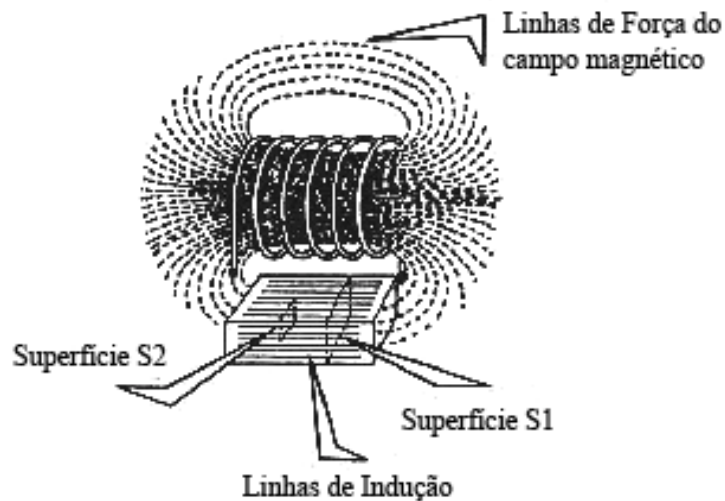


Figura 15 – Fluxo Magnético Através da Superfície de Área “A”  
Fonte: CATARINO, [200-], p. 14.

$$\phi = \int_0^A B dA . \quad (13)$$

Onde o fluxo  $B$  é a densidade de fluxo magnético através da área “A” e se tivermos um campo homogeneamente distribuído teremos:

$$\phi = B \cdot A. \quad (14)$$

O fluxo magnético “ $\phi$ ” não pode ser medido diretamente, mas é obtido relacionando a tensão elétrica “ $v$ ” com a Lei de Indução, ou seja, se o fluxo muda com o tempo “ $t$ ”, uma tensão é induzida para dentro da bobina e um fluxo pode ser medido através da equação 15.

$$v(t) = -N \cdot d\phi / dt. \quad (15)$$

Onde  $N$  é o número de voltas da bobina.

Integrando-se a expressão acima obtêm-se a equação 16.

$$\phi = \frac{-1}{N} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt + \phi_o. \quad (16)$$

Portanto, somente as mudanças de fluxo magnético entre os pontos no tempo  $t_1$  e  $t_2$  podem ser medidos. Para realizar essas medições de modo contínuo são necessários sistemas integradores analógicos e/ou digitais.

No Sistema Internacional de Medidas (SI), a unidade de fluxo magnético é o Weber [Wb], ou seja, um fluxo de 1 Weber ao redor, com 1 volt, por 1 segundo, para aparecer e desaparecer o mesmo campo magnético. Por esta razão se pratica o termo Volt-segundo [Vs] em vez de Weber, não é a unidade própria, mas representa o produto de voltagem no tempo (BOZORTH, 1951; KNELLER, 1962).

### 2.8.1 Instrumentos de Medição

As tecnologias utilizadas para medições magnéticas fornecem ferramentas que proporcionam levantamentos precisos das medidas físicas do magnetismo, assim como identificam as próprias propriedades magnéticas dos materiais envolvidos. As medidas do fluxo magnético são realizadas com a utilização do “Fluxmeter (Gaussmeter/Teslameter)” que atualmente é a tecnologia de equipamento mais versátil para esta aplicação conforme norma IEC 60404-4 (2000).

A literatura para a física básica e das propriedades magnéticas dos materiais é muito extensa. É fundamental um trabalho padronizado quando tratamos com novos materiais.

Também é importante salientar que os equipamentos utilizados para estas medições devem ter uma calibração periódica a fim de proporcionar uma maior precisão das medições. Embora coexistam os sistemas SI (System International) e o CGS (Centímetro-Grama-Segundo) no magnetismo e freqüente o uso do CGS (BOZORTH, 1951; KNELLER, 1962).

### **2.8.2 Medição de Histerese DC**

Atualmente utiliza-se a medição em bobinas conectando-se o “Fluxmeter” com medidores computacionais conforme IEC 60404-4 (2000).

Todas essas medições são calculadas e carregadas em softwares específicos de controle que usam como padrão medidas feitas em barras e fitas. A velocidade de registro das mudanças de densidade de fluxo é feita em função do tempo, ou seja,  $dB/dt$  que permite calcular os valores incrementais de fluxo magnético. Também é importante colocar que em função da velocidade dos “loops” de histerese, o equipamento através de seu software, torna-se possível corrigir os desvios das curvas. Normalmente as forças magnéticas imprimidas aos anéis, fitas, barras sólidas de aço ou material sinterizado, variam de 0,1 A/m, 100 A/m, até um máximo de 10 KA/m (IEC 60404-4, 2000).

A figura16 ilustra o método de como o ensaio com a amostra padrão (anel bobinado) é realizado e também segue de que forma são feitos os cálculos para sua construção.

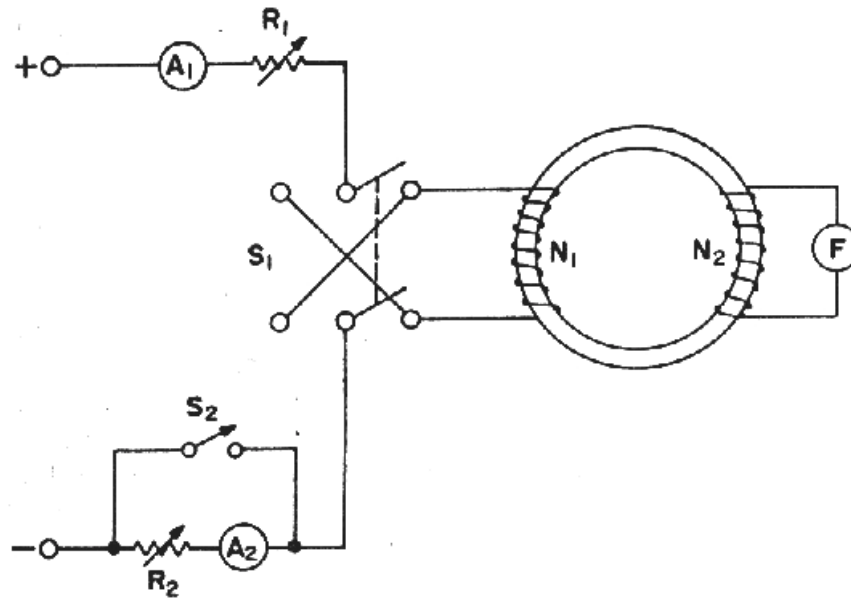


Figura 16 – Circuito com o Anel Bobinado  
 Fonte: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995b, p. 75.

### 2.8.3 Dimensionamento da Bobina de Teste

As características da bobina são calculadas como segue nas equações abaixo:

- Quando uma corrente  $I$  é aplicada na bobina primária o campo  $H$  é calculado conforme equação 17.

$$H = \frac{N_1 \cdot I}{l_m} \quad (17)$$

Onde  $N_1$  é o número de voltas do enrolamento primário e  $l_m$  o comprimento do fio onde será gerado o meio magnético, obtido conforme equação 18.

$$l_m = \pi \cdot \frac{D + d}{2} \quad (18)$$

Onde  $D$  é o diâmetro externo e  $d$  o diâmetro interno do anel.

A variação de  $H$  deve se manter muito pequena por este motivo a razão entre os anéis não deve exceder a 1.4 (STEINGROEVER, 2008). Se por alguma razão esta condição não

poder ser obedecida,  $l_m$  poderá ser melhor calculado respeitando a média da força do campo magnético aplicado, conforme equação 19.

$$l_m = \pi \cdot \frac{D-d}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}. \quad (19)$$

A tensão que é induzida na bobina secundária deve ser integrada para obter o fluxo  $\phi$ , por esta razão um fluxmeter é usado e com o fluxo  $\phi$ , a densidade  $B$  é calculada pela equação 20.

$$B = \frac{\phi}{N_2 \cdot A}. \quad (20)$$

Aqui  $N_2$  é o número de voltas do enrolamento secundário e  $A$  como sendo a área da secção transversal do anel que pode ser calculada considerando todo o perímetro da secção com altura  $h$ , demonstrado na equação 21.

$$A = \frac{D-d}{2} \cdot h. \quad (21)$$

Se o anel for constituído por chapas planas ou enrolamentos em fita, a área deverá ser calculada conforme equação 22.

$$A = \frac{2 \cdot m}{\rho \cdot \pi \cdot (d + D)}. \quad (22)$$

Onde  $m$  é a massa e  $\rho$  a densidade do material.

Uma vez que esses parâmetros de construção são definidos os testes de fluxo magnético podem ser realizados (STEINGROEVER, 2008).

## 2.9 TEMPERATURA E O PONTO CURIE

Junto com o campo magnético e o “stress”, a temperatura é o principal fator de modificação na magnetização. A grande influência da temperatura é raramente abaixo do ponto Curie ou próximo da temperatura de transformação de fase (BOZORTH, 1951).

O caminho onde ocorrem as modificações das condições de magnetização do ferro são mostradas na figura 17.

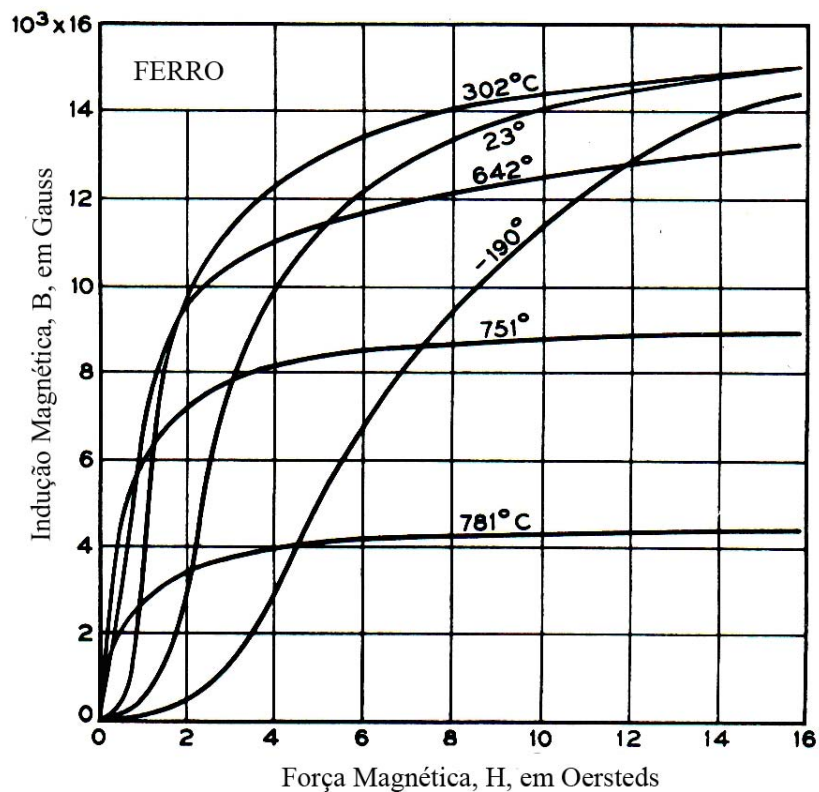


Figura 17 – Curvas de Magnetização do Ferro Medidas com Diferentes Temperaturas, após o Recozimento a 800°C  
Fonte: Bozorth, 1986, p. 713.

Nas altas temperaturas, as curvas de magnetização sobem rapidamente para valores baixos de  $H$  e se mantêm niveladas e saturadas nas induções mais baixas. A saturação continua a decrescer até aproximar-se do ponto Curie onde a magnetização do material deixa de existir. Quando um material é submetido a um campo magnético alto e constante, um

aumento da temperatura normalmente trás um decréscimo abrupto na indução, quase a zero no ponto Curie, conforme mostrado na figura 18.



Figura 18 – Campos Magnéticos Altos, a Indução Decresce com Aumento da Temperatura  
Fonte: Bozorth, 1986, p. 714.

Dependendo da permeabilidade apresentada pelo ferro e da temperatura, a força do campo magnético é praticamente constante, conforme mostra a figura 19.



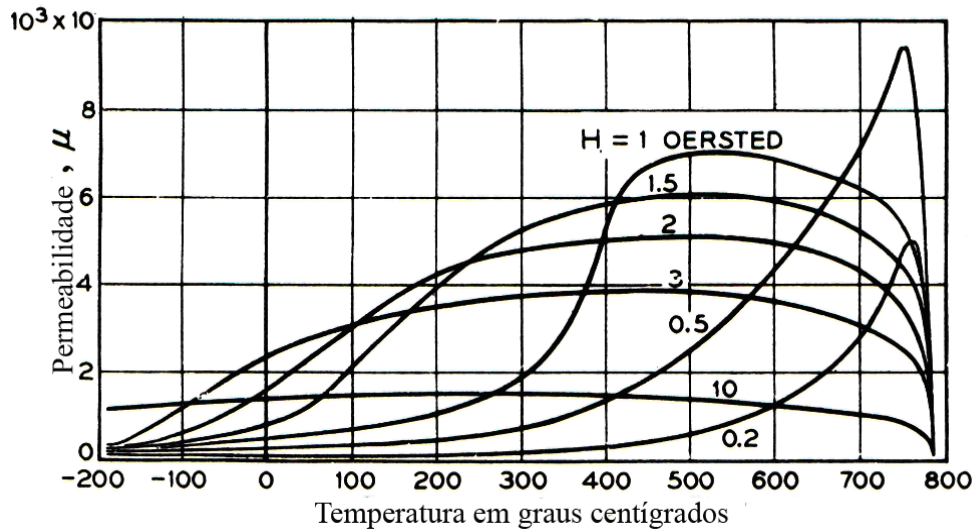


Figura 19 – Permeabilidade do Ferro, em Várias Temperaturas  
 Fonte: Bozorth, 1986, p. 714.

Outra característica importante a ser ressaltada nas curvas de histerese do ferro é que à medida que a temperatura se aproxima do ponto Curie atinge seu ponto máximo de permeabilidade, conforme mostrado na figura 20.

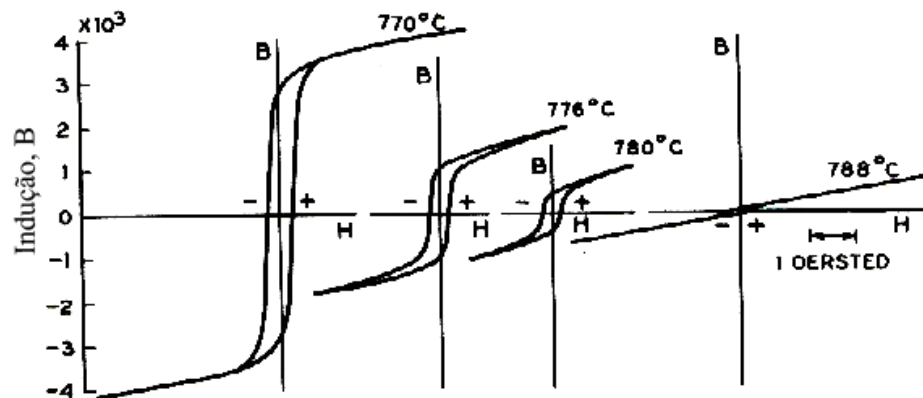


Figura 20 – “Histerese” do Ferro Próximo ao Ponto Curie  
 Fonte: Bozorth, 1986, p. 715.

Weiss e Forrer (1920-1925 apud BOZORTH, 1986) em seus ensaios selecionaram vários “Pontos Curie” onde ocorreram alterações das propriedades magnéticas das ligas e também provaram que mesmo repetindo-se vários experimentos não é possível sobrepor perfeitamente às curvas de histerese.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Foi desenvolvido um processo onde foram estudadas diversas amostras de FoFo Nodular, com varias composições percentuais de Fe-Si-C, onde buscou-se otimizar a Densidade de Fluxo Magnético “B” através de uma Força Magnetizante “H”, tendo como resultado uma maior Permeabilidade Magnética “ $\mu$ ” do meio analisado, dado pela equação 23.

$$\mu = B/H. \quad (23)$$

A partir deste desenvolvimento, construiu-se o “Processo de Indução Magnética durante o Tratamento Térmico”, ou seja, com um anel usinado, mostrado na figura 21, a partir da amostra FoFo, contendo duas espiras, sendo a bobina primária com N1= 1330 espiras (AWG 32) e N2= 496 espiras (AWG 25) e uma frequência de 60 Hz, submeteu-se as “Ligas” a uma Força Magnetizante “H” com aumento de temperatura até 910°C e posteriormente um resfriamento controlado.



Figura 21 – Anel em FoFo Nodular Bobinado Preparado para o Teste de Saturação Magnética  
Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

O trabalho foi realizado utilizando como material de análise peças fundidas, com diferentes composições percentuais de Ferro (%Fe), Silício (%Si) e Carbono (%C), provenientes da Siderúrgica Dueville Indústria e Comércio Ltda., para os ensaios de recozimento com indução magnética. Foram produzidas 30 amostras para cada tipo de liga, L1(2,67%C – 3,00%Si), L2(2,82%C – 3,20%Si) e L3(3,68%C - 6,00%Si), totalizando 90 peças fundidas. Destas, 10 peças de cada lote, L1, L2 e L3, foram submetidos ao processo de recozimento com indução magnética (RIM) e comparativos entre o comportamento magnético das peças tratadas com o Aço SAE 1020 foram realizados. Após os resultados levantados foi realizado um trabalho de otimização da forma da peça polar, ou seja, através do software de “Análise de Elementos Finitos FEMM 4.2” de propriedade da Eletrônica Selenium S.A., as peças foram redesenhadas e novamente fundidas. Os núcleos fabricados foram montados e comparados com os produzidos em aço SAE 1020.

As peças foram fundidas procurando-se obter os valores percentuais do teor de carbono (máx. 3,00%), silício (3,00%) e fósforo (0,08%), para o FoFo Nodular, conforme a norma ASTM A395 – 88 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1993). As propriedades mecânicas, como resistência ao impacto, no caso de alto-falantes não são fatores importantes na seleção do material, logo um pequeno aumento no percentual de silício e fósforo, neste caso, não é um problema durante o processo.

As figuras 22 e 23 mostram o LAM/UFRGS, onde realizou-se o trabalho e os respectivos ensaios.



Figura 22 – Ensaio de Saturação Magnética no LAM (Laboratório de Magnetismo da UFRGS)  
Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.



Figura 23 – Anel bobinado Extraído da Peça Fundida na Bancada Submetido a Saturação Magnética  
Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

### 3.2 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS DE INDUÇÃO MAGNÉTICA COM RECOZIMENTO (RIM) PARA O FOFO NODULAR L1, L2 E L3.

As Ligas fundidas para o tratamento térmico de recozimento e indução magnética foram submetidas ao seguinte processo:

- a) aquecimento até a temperatura de austenitização, 910°C mantendo nesta faixa por 4 horas e depois resfriadas ao forno em 2 etapas: etapa 1 (taxa de 40 °C/h até 700 °C) e etapa 2 (taxa de 160 °C/h até 300 °C) , caracterizando o processo de recozimento pleno, ou seja buscando uma matriz totalmente ferrítica com glóbulos de grafita conforme ASTM A 395 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1993). Durante o processo de aquecimento, a partir de 500 °C induziu-se uma corrente elétrica “*I*” de 20 A (Ampères) com tensão contínua de 160 V (Volts), utilizando-se uma bobina conforme mostrado nas figuras 24 e 25. A partir do resfriamento ao forno o sistema indutivo de corrente contínua ligado até 500 °C, quando então é desligado e o sistema segue seu resfriamento até a temperatura ambiente (durante 18 horas), quando então se encerra o processo. No processo de indução e recozimento simultâneo, utilizou-se uma fonte de alimentação com tensão de entrada 110 V AC e saída 160 V DC, para obter uma variação de corrente suficiente a fim de atender as exigências do alinhamento de domínios magnéticos. A corrente máxima de saída foi de 20 A DC e com uma potência máxima de operação de 3200 Watts. Também utilizou-se um termopar tipo K (Cromel-Alumel), cuja faixa de operação é de -200 °C até 1250 °C. A solenóide desenvolvida, para induzir o campo magnético, propiciou sua utilização durante todos os ensaios, apresentando algumas rachaduras na sua superfície devido as altas tensões envolvidas e também pelo tempo de processo. Ficou claro que, para processos contínuos de produção em série será necessário uma solenóide mais robusta e também com um revestimento cerâmico com maior espessura de parede. O RIM é um processo extremamente eficiente, podendo ser observado durante as análises das ligas um ganho significativo no que diz respeito a permeabilidade dos materiais pesquisados;
- b) foram colocadas no forno 30 peças de cada amostra, em lotes de (03) três peças por fornada, conforme figuras 24, 25 e 26.

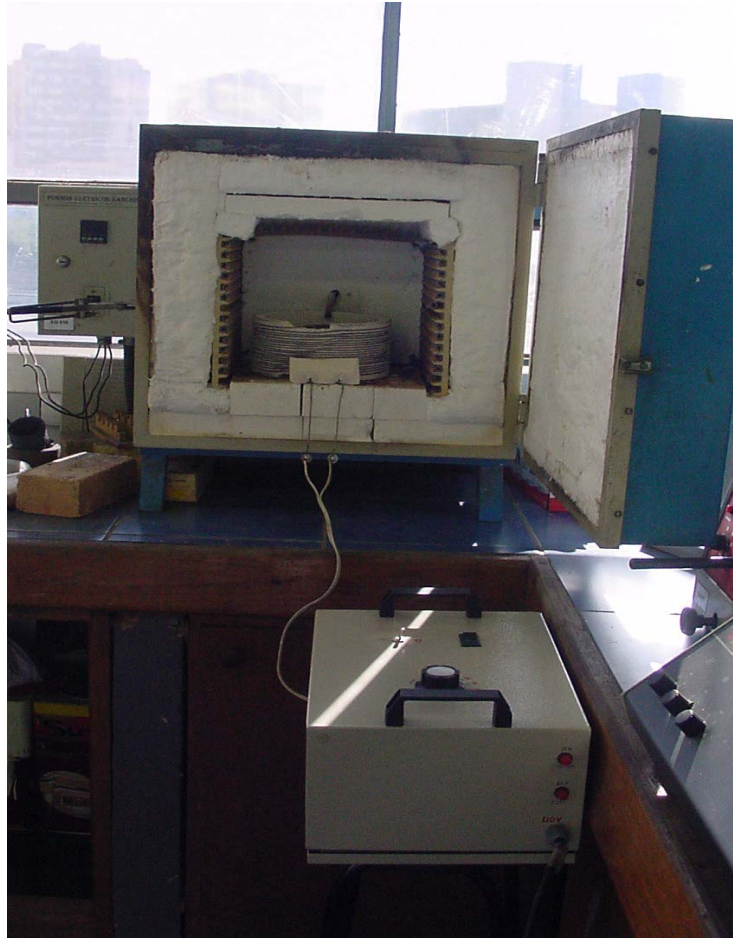


Figura 24 – Forno de Recozimento com Indução Magnética (Forno 15KW/1200°C)  
Fonte: LAMEF – LAB. METALURGIA FÍSICA/UFRGS.



Figura 25 – (03 peças) Montadas Dentro da Bobina (solenóide) Especialmente Construída para este Trabalho  
Fonte: LAMEF – LAB. METALURGIA FÍSICA/UFRGS.



Figura 26 – Vista Frontal do Forno com Outras Peças Dentro da Bobina (solenóide) de Indução  
Fonte: LAMEF – LAB. METALURGIA FÍSICA/UFRGS.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO STT01/ BOBINA DE INDUÇÃO

Os gráficos a seguir apresentam o comportamento padrão do solenóide para uma condição específica de trabalho e temperatura do enrolamento. Estas informações servem como indicação para os melhores parâmetros para o regime de trabalho utilizado durante o processo de indução magnética. A solenóide atinge uma condição de trabalho, onde a corrente “ $I$ ” máxima aplicada é de 20 A (Ampéres) e o campo “ $H$ ” gerado é de 80 Oe (Oersteds) podendo ser escolhida a melhor faixa de operação.

As curvas do campo magnético em função da corrente aplicada e da variação percentual do campo magnético são em relação a posição central (0,0,0) do eixo da peça em operação. A figura 27 mostra com clareza como se comporta o Campo magnético versus Corrente Aplicada e a figura 28 a Variação Percentual do Campo versus Posição Relativa ao Centro da Peça.

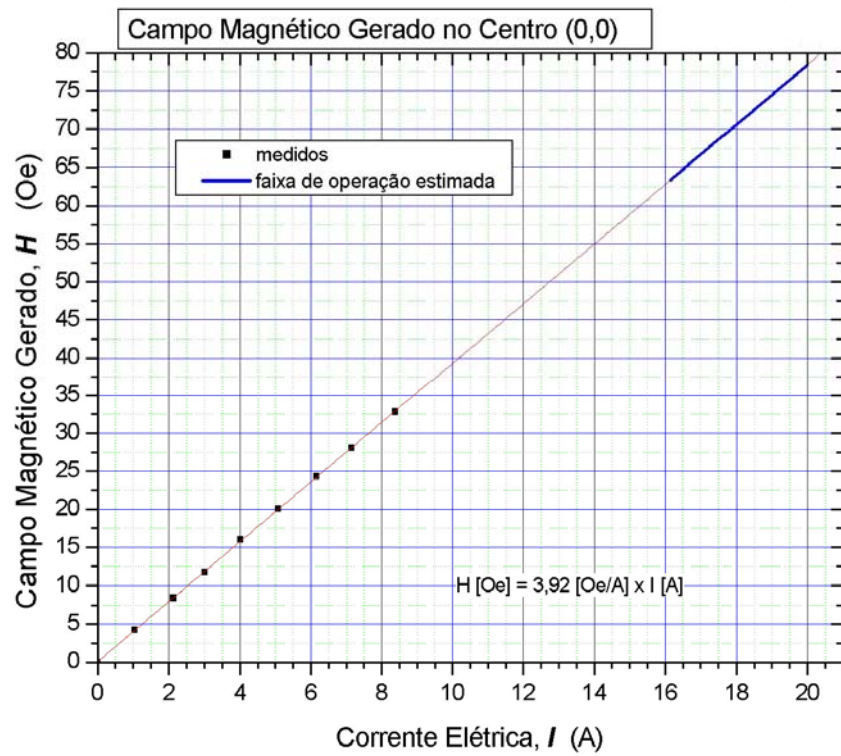


Figura 27 – Campo Magnético x Corrente Elétrica  
Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

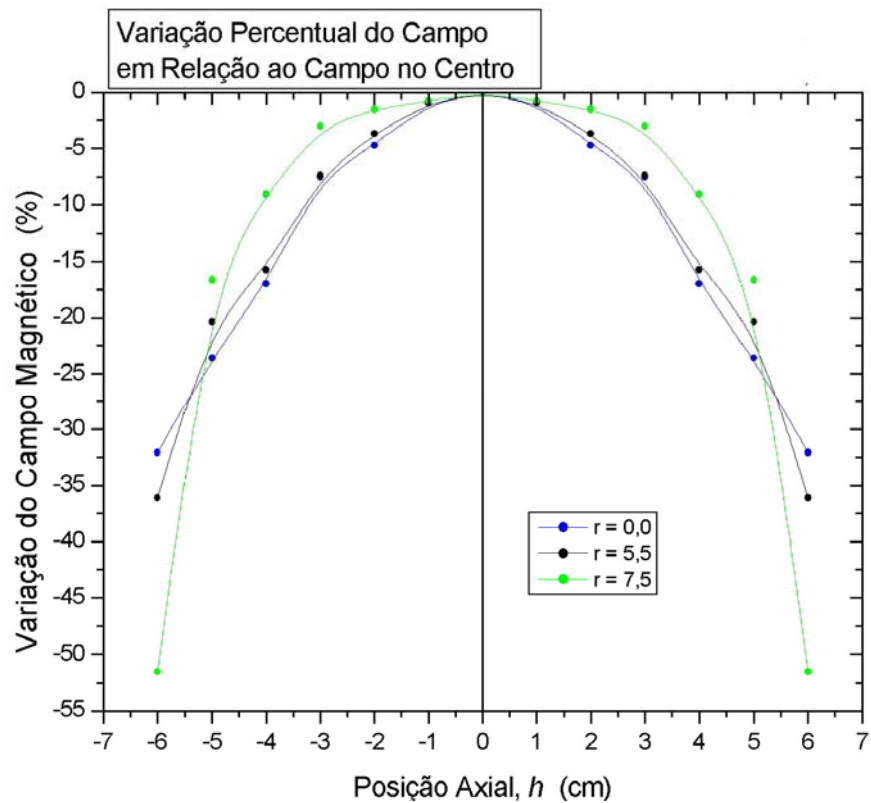


Figura 28 – Variação Percentual do Campo em Relação ao Centro da Peça  
Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.



### **3.3.1 Composição Química**

A caracterização química das amostras foi feita por espectroscopia de emissão ótica para verificar possíveis variações que poderiam influir na medida da permeabilidade magnética. O equipamento utilizado foi o espectrômetro “Spectro Stationary Metal Analyzers/SPECTRO A. I. GmbH & Co. 2003 do LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS).

### **3.3.2 Metalografia**

A fim de se obter correspondência entre o comportamento magnético e a microestrutura foram realizados preparos metalográficos com objetivo de se caracterizar a nodularização da grafita e também a presença de inclusões que influenciariam diretamente na passagem do fluxo magnético pela peça. O equipamento utilizado foi o Microscópio Nikon Eclipse ME600 do LACAR/UFRGS (Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

As amostras observadas em microscópio ótico foram lixadas, polidas e quimicamente atacadas com reagente Nital 2% (2% de ácido nítrico e 97% de álcool etílico). A análise no microscópio foi feita no centro da secção transversal das amostras.

## **3.4 RECOZIMENTO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA PARA AS PEÇAS L1, L2 E L3**

Os equipamentos utilizados nos ensaios deste trabalho foram o SST01 – Fonte de Aplicação de Campo Magnético com Solenóide Indutora construída especificamente para este trabalho e um forno SANCHIS/15KW, com temperatura máxima de 1200 °C, conforme figuras 29 e 30.



Figura 29 – Forno 15KW/1200 °C  
Fonte: LAB METALURGIA FÍSICA / UFRGS.



Figura 30 – Fonte de Alimentação e a Solenóide de Indução  
Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

## **4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1 ANÁLISES E ENSAIOS COMPARATIVOS COM ANÉIS FABRICADOS EM AÇO SAE 1020 E FOFO NODULAR**

#### **4.1.1 Peças em Aço SAE 1020 e FoFo Nodular submetidas à Indução Magnética**

Os anéis foram usinados de acordo com a norma ASTM A596/A596M - 95 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995b) e foram mantidas as características dimensionais das peças de modo a se ter uma análise comparativa dentro dos padrões especificados. Os dados retirados dos ensaios de saturação magnética sobre cada uma das peças foram obtidos no LAM da UFRGS e são mostrados nas tabelas 1, 2, 3 e 4 e figuras 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 e 38. É importante salientar que os valores medidos para saturação e permeabilidade magnética são representativos do lote de (30) trinta peças, ou seja, foram medidas (03) três peças, (01) uma peça de cada liga, L1, L2 e L3 respectivamente, pois cada anel testado teve sua composição verificada na amostra “coquilhada”, não sendo necessária a realização da medição em todas as peças. Outra consideração, a ser colocada é a medida estática de permeabilidade, que foi realizada utilizando uma frequência de 0,6 Hz e as medidas com as peças na forma final, foram realizadas com a frequência de 60 Hz. A diferença básica, entre estas duas situações, está no fato de que nas baixas frequências as correntes parasitas são muito pequenas e não interferem na permeação do fluxo magnético através do material, o que é totalmente contrário para frequências na faixa de 60 Hz onde a influência das correntes parasitas é percebida nitidamente nas curvas de permeabilidade.

As tabelas 1, 2, 3 e 4 expressam o comportamento que os materiais tiveram quando estes foram submetidos a solicitações de Força Magnética, ou seja, a intensidade de campo ao qual foram submetidos, fizeram com que sua capacidade de Permeabilidade ou Fluxo Magnético máximo, fosse obtido.

Os resultados indicam, quais materiais apresentam condições de atender as solicitações de fluxo magnético quando estes forem solicitados, no caso específico, em núcleos magnéticos de alto-falantes.

**Tabela 1 – Dados Obtidos dos Ensaios de Saturação Magnética para Aço 1020**

		AÇO 1020			
H (A/m)	B (T)	H (Oe)	B (G)	dB/dH	B/H
0	0	0	0	65,5	0
56	0,00461	0,7	46,1	76	65,5
89	0,0082	1,1	82	98,1	73,3
174	0,0199	2,2	199	655,5	91
337	0,266	4,2	2660	1248,8	628,1
578	0,6585	7,3	6585	953,2	906,6
1108	1,065	13,9	10650	407,5	764,9
2224	1,352	27,9	13520	140,9	483,8
3361	1,4621	42,2	14621	59,5	346,2
4365	1,5149	54,9	15149	38	276,2
6120	1,5904	76,9	15904	34,2	206,8

Fonte: elaborado pelo autor com base na pesquisa.

**Tabela 2 – Dados Obtidos dos Ensaios de Saturação Magnética para Peça L1**

		L1			
H (A/m)	B (T)	H (Oe)	B (G)	dB/dH	B/H
0	0	0	0	443	0
30	0,0167	0,4	167	485,8	443
58	0,0353	0,7	353	1895,7	484,3
86	0,1501	1,1	1501	3741,2	1388,9
169	0,5902	2,1	5902	2948,3	2779,2
337	0,9442	4,2	9442	1123,8	2229,7
569	1,1106	7,2	11106	384,3	1553,3
1107	1,2443	13,9	12443	144,3	894,5
1685	1,3103	21,2	13103	71,3	618,8
2218	1,3449	27,9	13449	52,8	482,5
3307	1,4188	41,6	14188	43,4	341,4
4365	1,4623	54,9	14623	26,2	266,6
6140	1,5064	77,2	15064	19,8	195,2

Fonte: elaborado pelo autor com base na pesquisa.

**Tabela 3 – Dados Obtidos dos Ensaio de Saturação Magnética para Peça L2**

H (A/m)	B (T)	L2		dB/dH	B/H
		H (Oe)	B (G)		
0	0	0	0	197,2	0
56	0,01388	0,7	138,8	222,4	197,2
84	0,02259	1,1	225,9	844,8	214
168	0,1748	2,1	1748	1476,5	828
336	0,4938	4,2	4938	1101,7	1169,5
559	0,6878	7	6878	499,5	979,2
1111	0,9006	14	9006	220,4	645,1
1667	0,9943	20,9	9943	105,1	474,7
2217	1,0469	27,9	10469	57,2	375,8
3378	1,1028	42,4	11028	37,4	259,8
4313	1,1457	54,2	11457	33	211,4
5998	1,2082	75,4	12082	29,5	160,3

Fonte: elaborado pelo autor com base na pesquisa.

**Tabela 4 – Dados Obtidos dos Ensaio de Saturação Magnética para Peça L3**

H (A/m)	B (T)	L3		dB/dH	B/H
		H (Oe)	B (G)		
0	0	0	0	138,2	0
57	0,0099	0,7	99	141,6	138,2
85	0,015	1,1	150	125,9	140,4
164	0,0256	2,1	256	605,7	124,2
339	0,2685	4,3	2685	1029,9	630,3
563	0,5374	7,1	5374	696,6	759,6
1103	0,8345	13,9	8345	309,4	602,1
1660	0,9612	20,9	9612	140,8	460,8
2204	1,03	27,7	10300	77,5	371,9
3303	1,105	41,5	11050	40,2	266,2
4417	1,1415	55,5	11415	31,1	205,7
5727	1,201	72	12010	36,1	166,9

Fonte: elaborado pelo autor com base na pesquisa.

As Curvas de Permeabilidade indicam a permeabilidade inicial, ou seja, os valores máximos que aqueles materiais podem obter em se tratando de fluxo magnético, pois são valores de “pico”, com frequências muito baixas e medidos em pequenos intervalos de tempo,

onde as correntes parasitas são desprezíveis e não interferem no desempenho do material magnetizado.

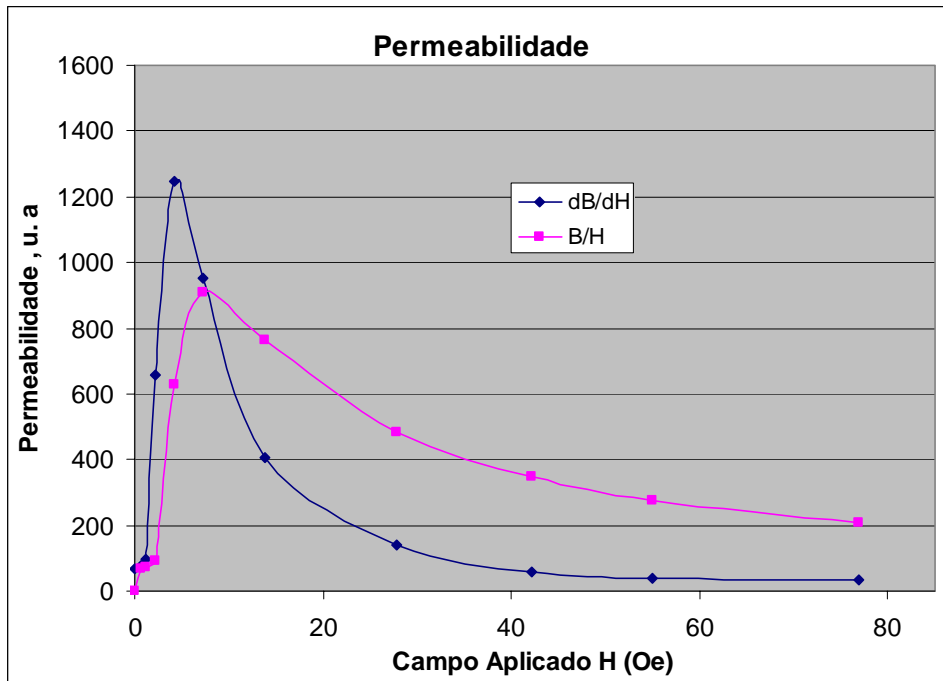


Figura 31 – Permeabilidade Magnética “ $\mu$ ” Durante Aplicação de Campo “H”, para Aço SAE 1020  
Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

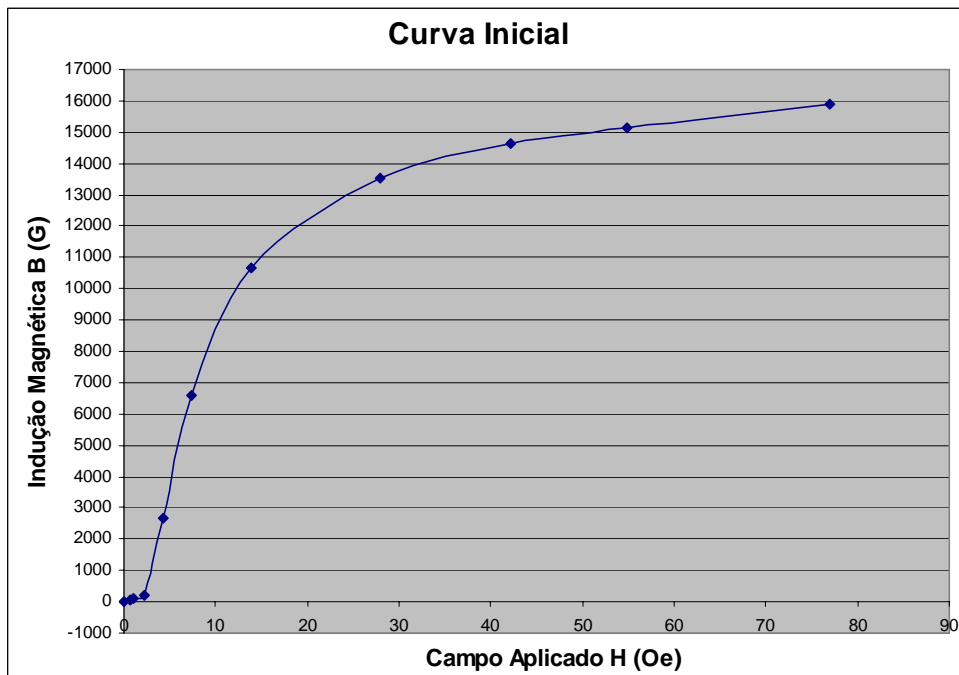


Figura 32 – Indução Magnética “B” Durante Aplicação de Campo “H”, para Aço SAE 1020  
Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

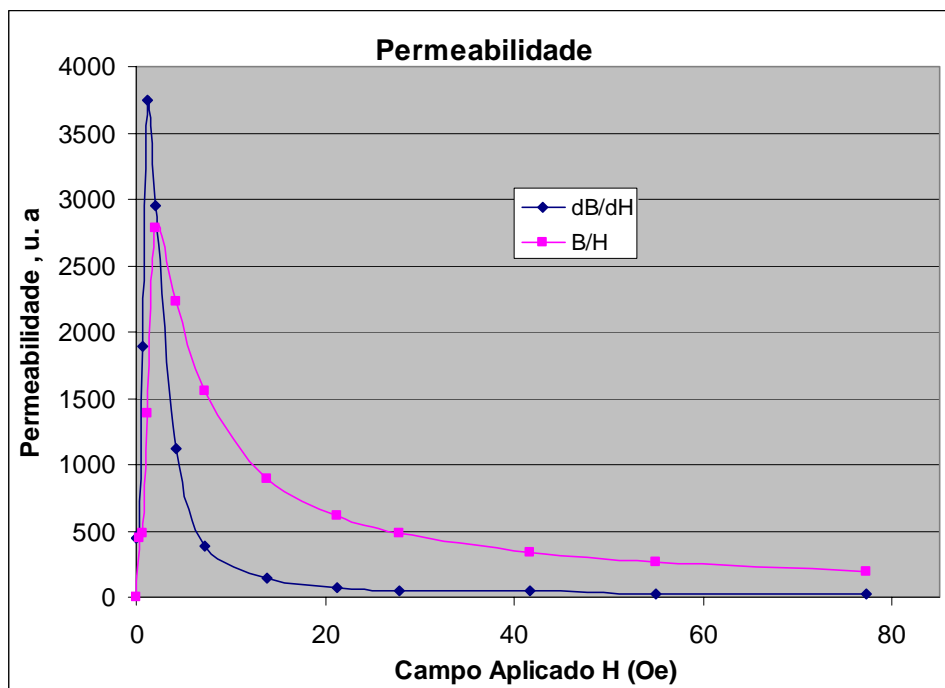


Figura 33 – Permeabilidade Magnética “ $\mu$ ” Durante Aplicação de Campo “H”, para Peça L1  
 Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

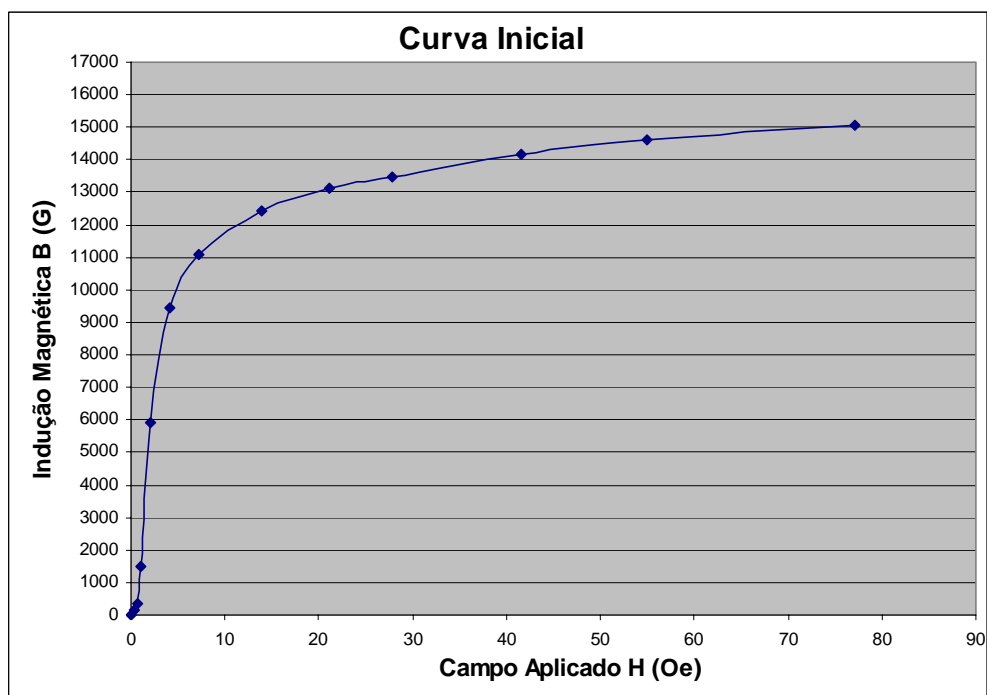


Figura 34 – Indução Magnética “B” Durante Aplicação de Campo “H”, para Peça L1  
 Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

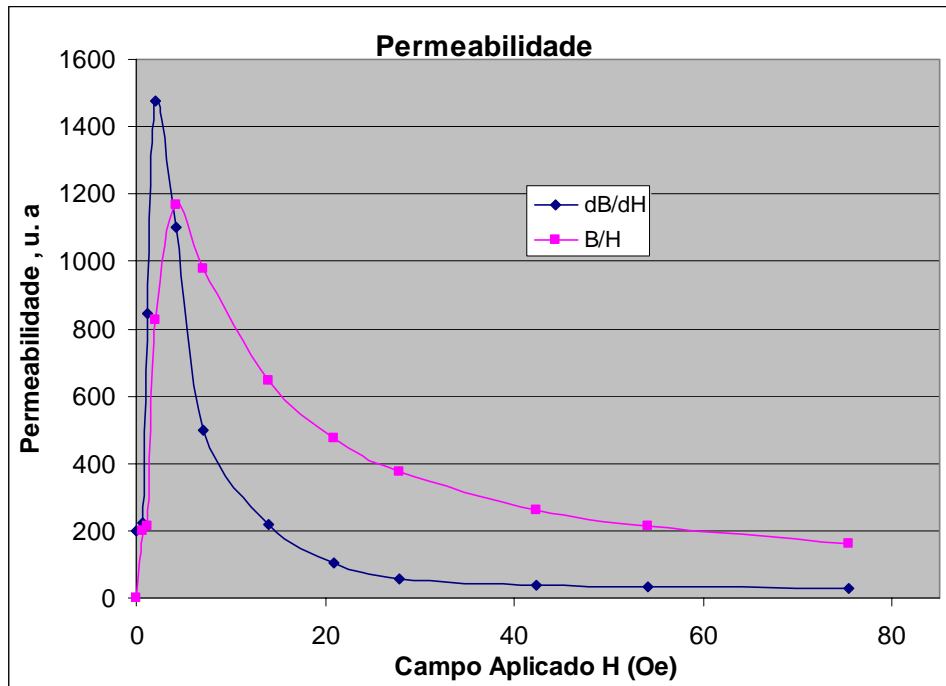


Figura 35 – Permeabilidade Magnética “ $\mu$ ” Durante Aplicação de Campo “H”, para Peça L2  
 Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

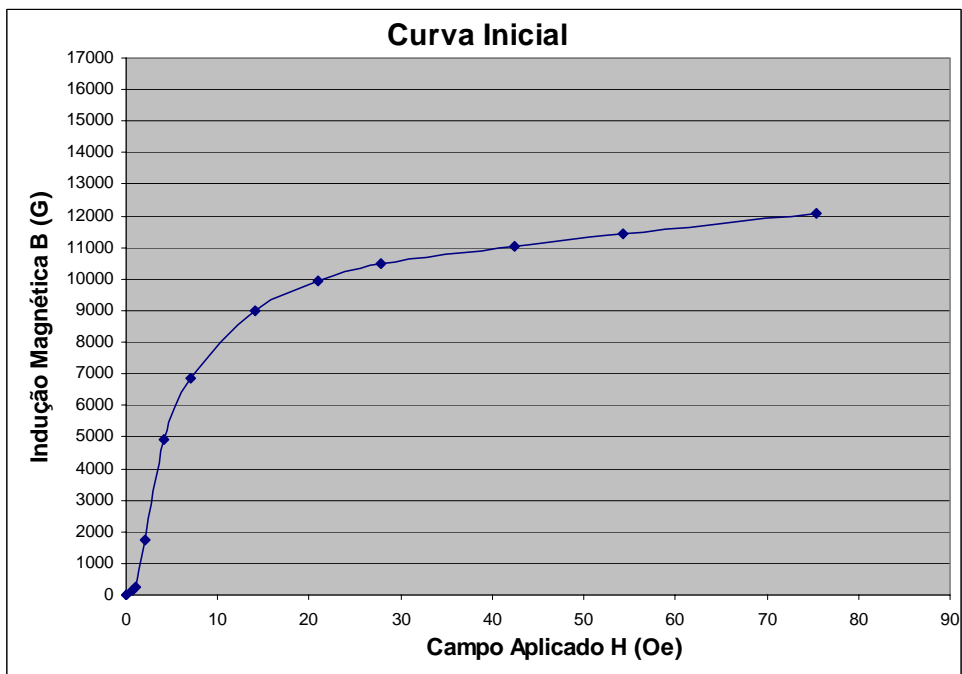


Figura 36 – Indução Magnética “B” Durante Aplicação de Campo “H”, para Peça L2  
 Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.



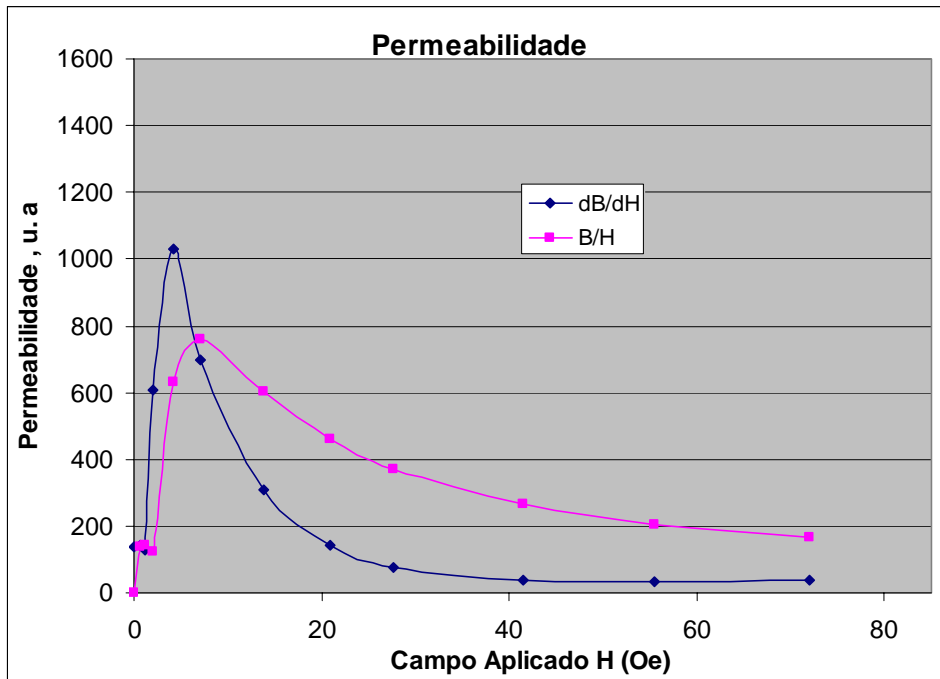


Figura 37 – Permeabilidade Magnética “ $\mu$ ” Durante Aplicação de Campo “H”, para Peça L3  
 Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

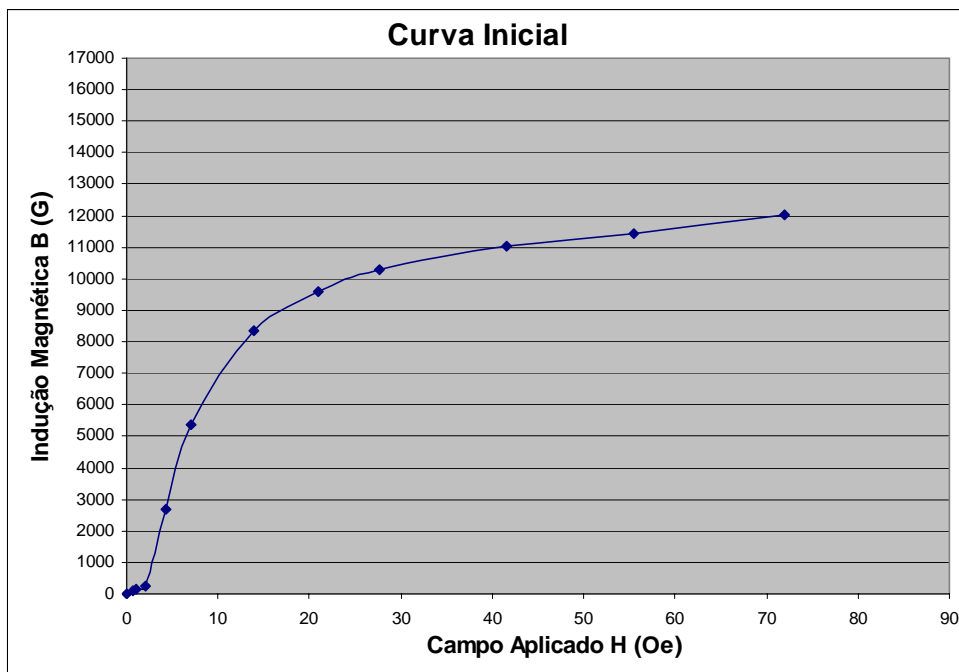


Figura 38 – Indução Magnética “B” Durante Aplicação de Campo “H”, para Peça L3  
 Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS QUE SOFRERAM O PROCESSO DE RECOZIMENTO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA

Os dados obtidos a partir dos ensaios de recozimento com indução, levam a concluir que resultados de permeabilidade magnética foram muito próximos aos do Aço SAE 1020, podendo assim ser utilizado como substituto das ligas de aço até então utilizadas. A figura 39 mostra os gráficos de histerese das ligas em FoFo Nodular L1, L2 e L3, comparadas ao Aço SAE 1020 e a figura 40 mostra as curvas de saturação magnética.

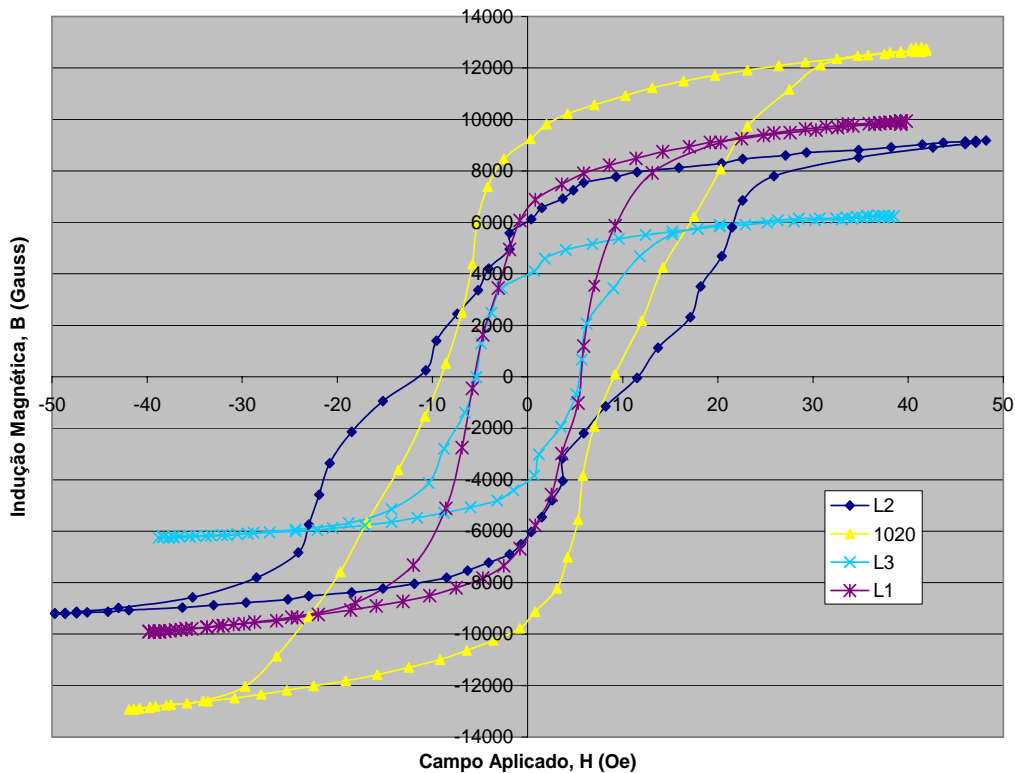


Figura 39 – Gráficos de Histerese Comparativos Entre as Ligas Aço, L1, L2 e L3  
Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

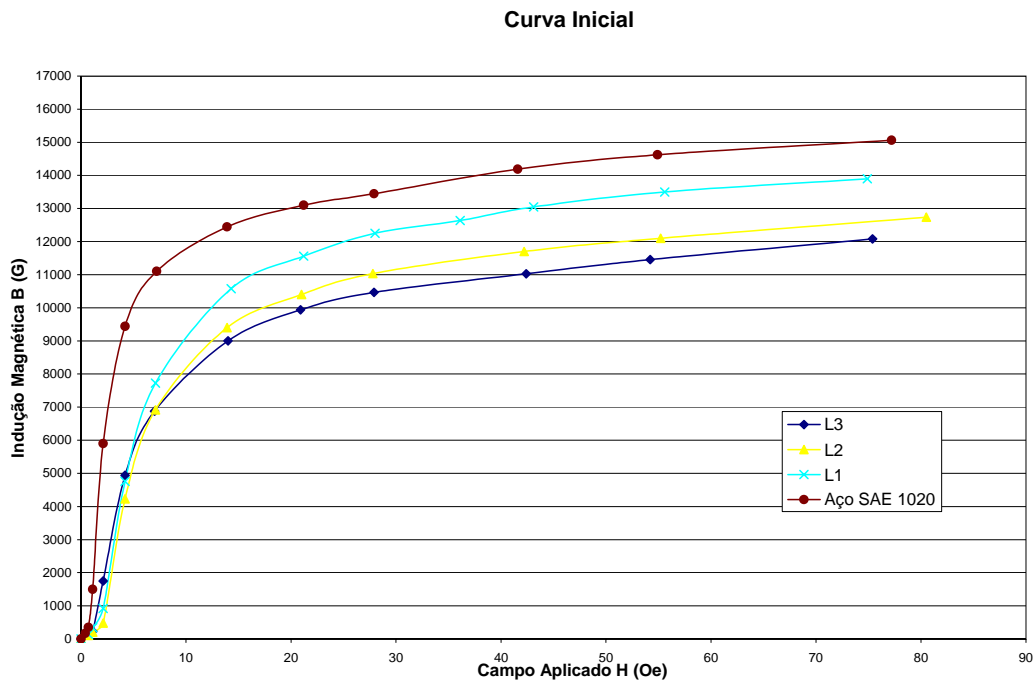


Figura 40 – Curvas Comparativas de Saturação Magnética Entre as Ligas Aço, L1, L2 e L3  
 Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO/UFRGS.

Os processos aos quais foram submetidas às amostras tratadas, produziram mudanças ainda maiores quando submetidas a um redimensionamento da forma. O processo de recozimento com indução resultou, como era esperado, numa diminuição sensível das resistências ao fluxo magnético e agora aliadas a uma nova forma, produziram resultados ainda mais satisfatórios. A figura 41 mostra a peça inicial fabricada com Aço SAE 1020 (usinada), a figura 42 a modificada produzida em FoFo e a figura 43, também em FoFo, mas com o novo formato.

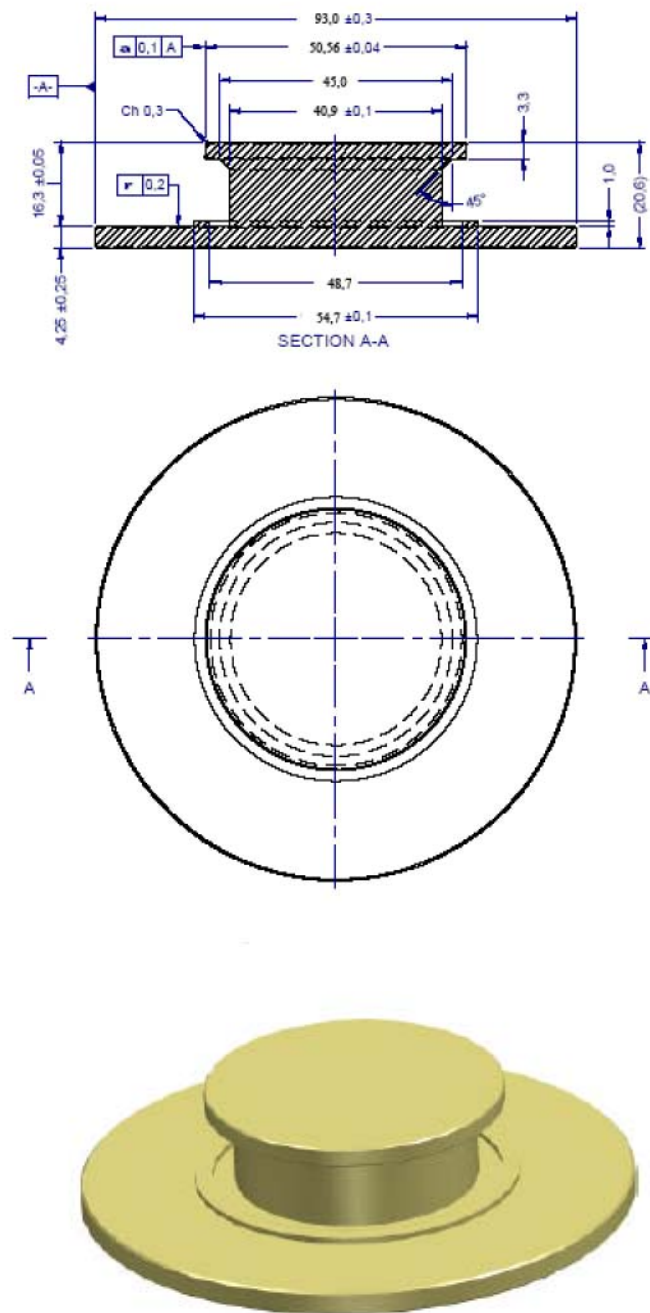


Figura 41 – Peça Polar Antiga / Aço SAE 1020  
Fonte: Desenho AutoCAD / Eletrônica Selenium S.A.



Figura 42 – Peça Polar Nova L1 Ferro Fundido Nodular  
Fonte: Foto realizada pelo autor no LdSM/UFRGS.

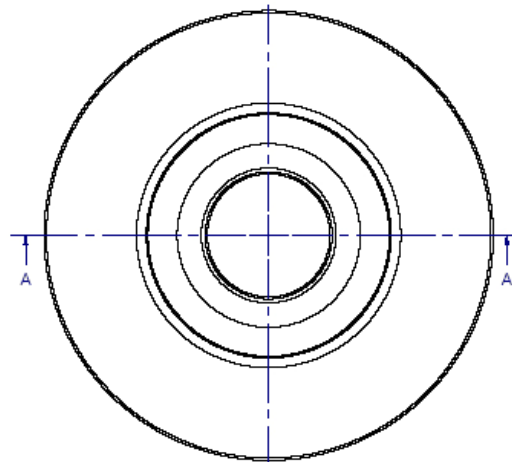
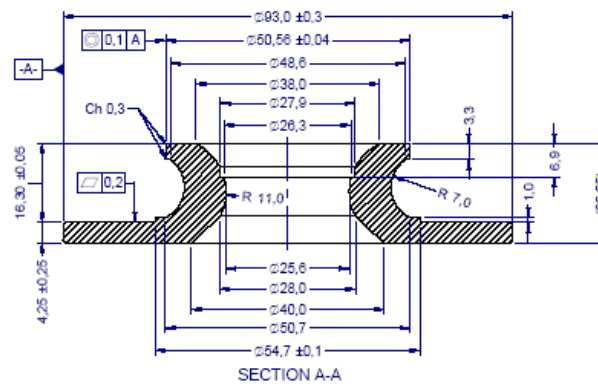


Figura 43 – Peça Polar L1/FoFo “Novo Formato”  
Fonte: Desenho AutoCAD / Eletrônica Selenium S.A., 2007.

O redimensionamento das peças, conforme mostrado acima, foi realizado utilizando-se os software FLUX 2D desenvolvido pelo Cedrat Group e o FEMM 4.2 desenvolvido pela Foster-Miller Inc., que consiste em simular conjuntos magnéticos existentes em produtos de linha, e após compará-los com os resultados obtidos nas medições físicas destes Conjuntos Magnéticos. A propriedade medida nestes testes é a Densidade de Fluxo Magnético (medido em Gauss) existente no GAP, que é o espaço entre a “Peça Polar” em FoFo e a “Ferrite” (Imã), ou seja, identifica quantas linhas de campo magnético estão passando na região do GAP, pois elas são proporcionais à força que impulsionará o cone do Alto-Falante e quanto maior a Densidade de Campo Magnético no GAP maior a Força Mecânica e maior a Pressão Sonora. Para realizar estas medições utiliza-se um Gaussmeter, dispositivo eletrônico que mede a Densidade de Fluxo Magnético que passa por uma determinada região.

#### 4.2.1 Composição Química

A análise de composição química por espectroscopia de emissão ótica realizada nas amostras selecionadas para este trabalho é apresentada na tabela 5. Nesta tabela são indicados os teores de carbono, silício, manganês e fósforo, elementos presentes em maior percentual neste tipo de Ferro Fundido, com base na ASTM E 30 – 95 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995f). Os valores apresentados para cada composição química das ligas L1, L2 e L3, são os resultados obtidos na Espectroscopia de Emissão Ótica de cada amostra “coquilhada”, de um mesmo lote de fundição de (30) trinta peças, referente às ligas L1, L2 e L3. A precisão relativa das medições realizadas foram de 3%, dados fornecidos pelo espectrômetro utilizado no LAMEF da UFRGS.

**Tabela 5 – Composição Química Percentual das Amostras, com Teores de Carbono, Silício, Manganês e Fósforo**

<b>LIGA</b>	<b>%C</b>	<b>%Si</b>	<b>%P</b>	<b>%Mn</b>
<b>L1</b>	2,67	3,00	0,08	0,34
<b>L2</b>	2,82	3,20	0,05	0,32
<b>L3</b>	3,68	6,00	0,09	0,30

Fonte: Espectrômetro de Emissão Ótica / Lamef (Lab. Metalurgia Física/UFRGS).

## 4.2.2 Metalografia

As figuras 44, 45 e 46 mostram a micrografia representativa da microestrutura encontrada nas ligas de FoFo Nodular L1 e na liga de Aço SAE 1020 utilizados neste estudo. Estas micrografias foram obtidas a partir do preparo metalográfico de uma amostra com ataque de Nital 2% com aumento 100X. A grafita esferoidal apresentou tamanhos V e VII com quantidade de nódulos de 100/mm<sup>2</sup> e uma matriz ferrítica.

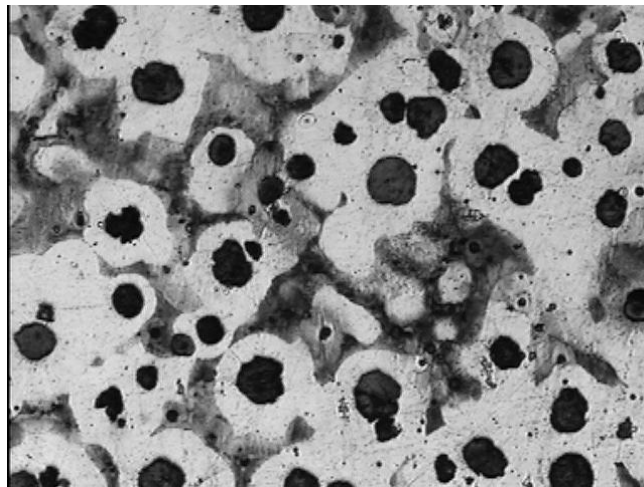


Figura 44 – Micrografia de uma Amostra “FoFo Nodular L1” com Ataque de Nital 2% Aumento 100x  
Fonte: LACAR – Laboratório de Caracterização / UFRGS.

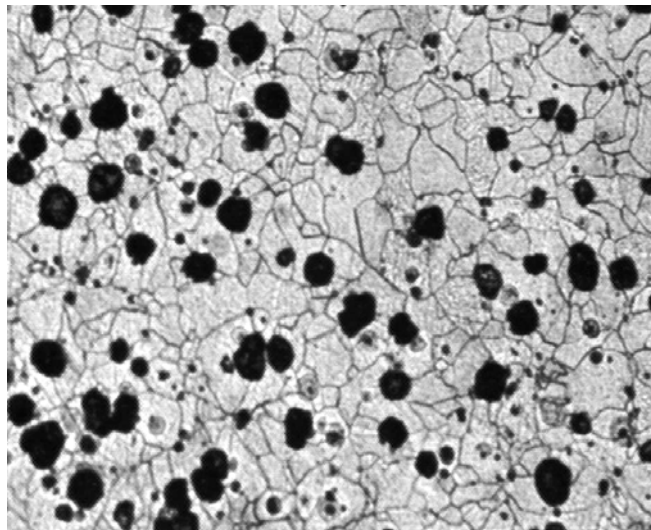


Figura 45 – Micrografia de uma Amostra “FoFo Nodular L1 Recozido” com Ataque de Nital 2% Aumento 100x  
Fonte: LACAR – Laboratório de Caracterização / UFRGS.

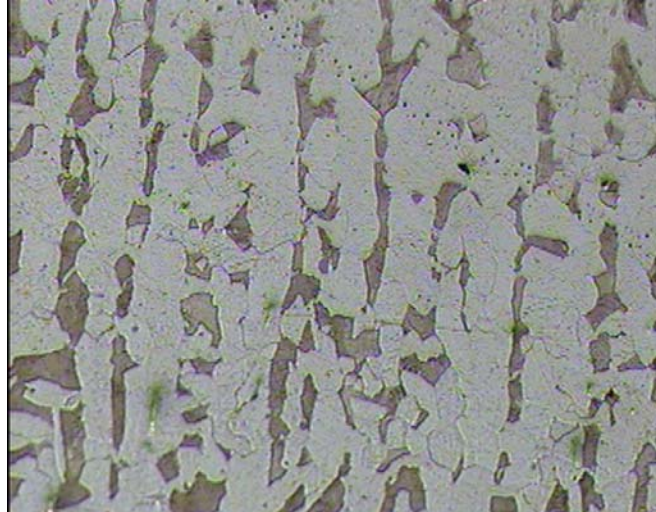


Figura 46 – Micrografia do Aço SAE 1020 com Ataque de Nital 2% Aumento 100x  
Fonte: LACAR – Laboratório de Caracterização / UFRGS.

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS QUE SOFRERAM O PROCESSO DE RECOZIMENTO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA QUANTO A SUA USINABILIDADE

Na liga L1 foram usados os parâmetros de corte normais, ou seja, os mesmos utilizados para o aço SAE 1020, não ocorrendo qualquer tipo de problema, tanto no que se refere a velocidade de corte como na qualidade do seu acabamento superficial.

Já para a liga L2 foram alterados os parâmetros de corte, pois as peças apresentaram uma periferia muito dura dificultando a usinagem e reduzindo a produtividade o processo.

Para a liga L3 também utilizou-se os mesmos parâmetros que a liga L2, já que também apresentava uma superfície muito dura.

A tabela 6 apresenta os parâmetros de usinagem utilizados e mostra que a Liga L1 foi a que apresentou a melhor opção de uso em substituição ao aço SAE 1020.



**Tabela 6 – Parâmetros de Usinagem Utilizados para as Ligas L1, L2 e L3**

<b>LIGA FoFo</b>	<b>Velocidade de Corte m/min</b>	<b>Profundidade de Corte mm</b>	<b>Avanço m/min</b>
<b>L1</b>	310	0,8 – 2,00	0,2- 0,25
<b>L2</b>	220	0,8 – 2,00	0,15
<b>L3</b>	250	0,8 – 2,00	0,10

Fonte: Eletrônica Selenium S.A.(Depto. Engenharia de Processos/Usinagem).

#### 4.4 SIMULAÇÃO DAS PEÇAS QUE SOFRERAM O PROCESSO DE RECOZIMENTO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA

A partir destes ensaios realizados os dados característicos de cada material foram inseridos no software FLUX 2D FEEMM 4.2 (Método de Análise dos Elementos Finitos aplicados ao Magnetismo) Foster-Miller Inc de propriedade da Eletrônica Selenium S.A.. Após, iniciou-se o processo de simulações utilizando o Método de Análise de Elementos Finitos (APÊNDICE A).

Uma das questões mais importante neste trabalho foi à matéria-prima utilizada, ou seja, a substituição do Aço SAE 1020 que necessitava várias etapas durante o processo até chegar ao produto final. O Ferro Fundido veio como uma alternativa a fim de reduzir este custo de fabricação, levando-se em conta que etapas seriam eliminadas e as propriedades magnéticas mantidas, seria sem dúvidas uma boa alternativa. O Produto escolhido para a realização destes testes foi o woofer modelo WPU1507, produto profissional com grande aceitação no mercado e custo de fabricação relativamente alto. Este woofer possui uma densidade de fluxo magnético no “GAP” de 10600 gauss. Esta é a característica mais importante deste trabalho, a alteração de material deve manter a densidade de fluxo, pois impacta fortemente no desempenho do produto.

O primeiro passo foi simular o conjunto magnético do WPU1507 em seu formato atual e com seu material original conforme figura 47, e determinar qual a densidade de fluxo magnético no “GAP”. Na simulação chegou-se ao valor de 10500 gauss, muito próximo do valor da peça real.

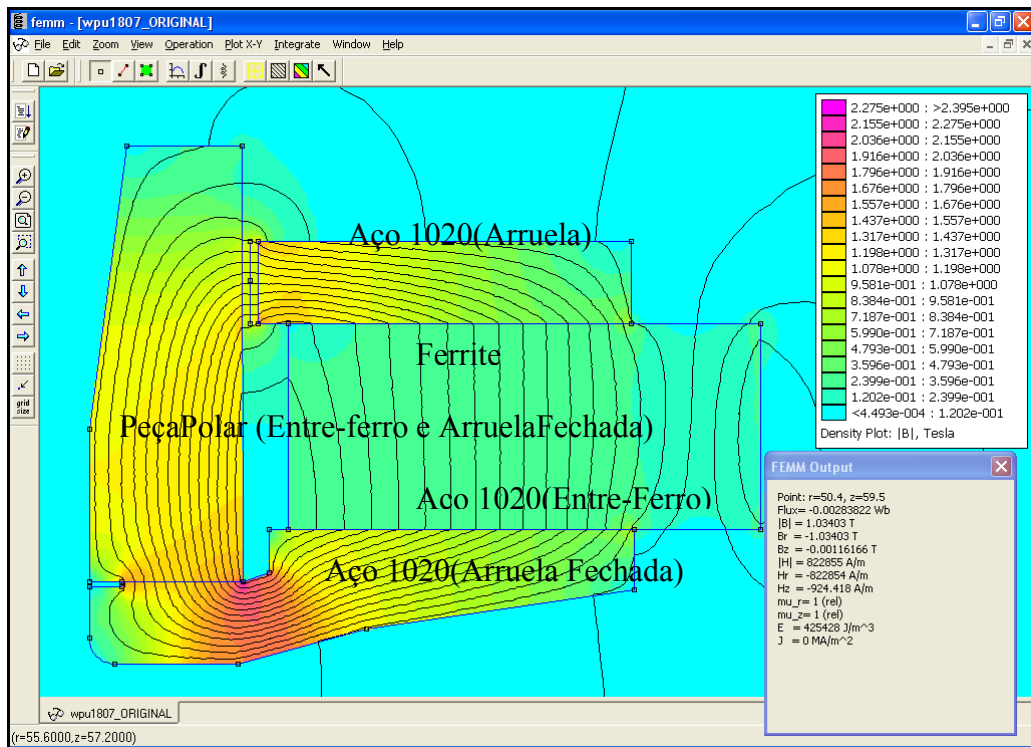


Figura 47 – Simulação do Conjunto Magnético Atual em Aço SAE 1020 do Woofer WPU1507  
Fonte: Lab. Teste Magnético da Eletrônica Selenium S.A.

Após criou-se o primeiro protótipo virtual, onde o formato do conjunto magnético é o mesmo e apenas o material foi alterado conforme figura 48. Para o primeiro protótipo utilizou-se a liga L1.

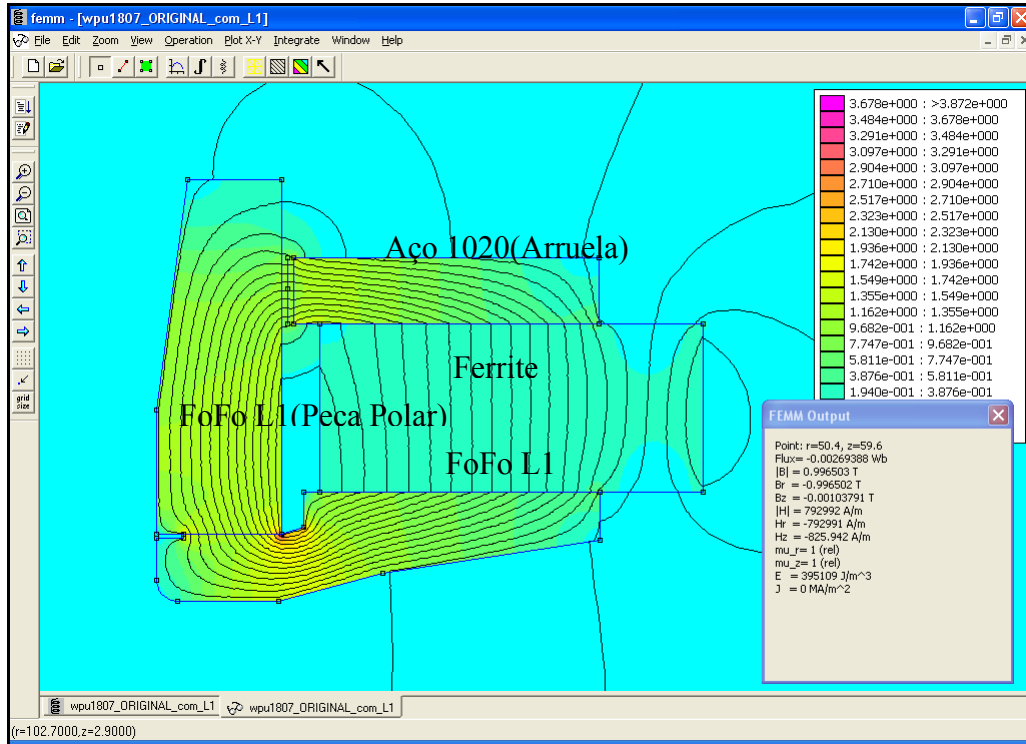


Figura 48 – Simulação do Conjunto Magnético Utilizando a Liga L1, sem Alteração no Formato da Peça  
Fonte: Lab. Teste Magnético da Eletrônica Selenium S.A.

Utilizando a liga L1 sem alteração no formato da peça chegou-se a 10100 gauss.

As simulações procederam-se alterando o formato da peça a fim de se obter uma otimização do fluxo do campo magnético. A Arruela de Ferro Fechada e o Entre-Ferro do conjunto magnético, ambos em Aço SAE 1020, foram substituídos por uma única peça chamada “Peça Polar”, sendo esta fabricada totalmente em Ferro Fundido. Após diversas simulações encontrou-se o formato ideal e com o menor peso para a Peça Polar e que também favorecesse a passagem de fluxo magnético, conforme figura 49.

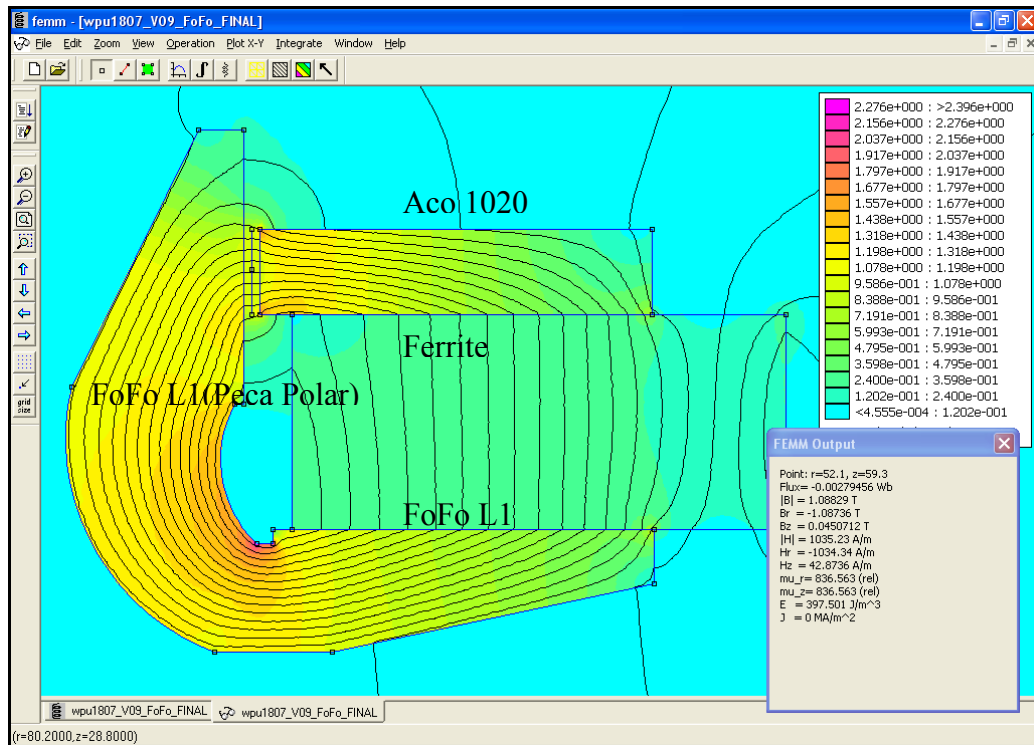


Figura 49 – Simulação do Melhor Formato de Peça Polar utilizando a Liga L1  
 Fonte: Lab. Teste Magnético da Eletrônica Selenium S.A.

Com este formato e utilizando a liga L1 obteve-se 10800 gauss de densidade de fluxo de campo magnético.

Sabendo qual o melhor formato para a Peça Polar precisou-se determinar qual o melhor material a se utilizar. Com este mesmo formato de peça foram testados os materiais L2 e L3 conforme figuras 50 e 51.

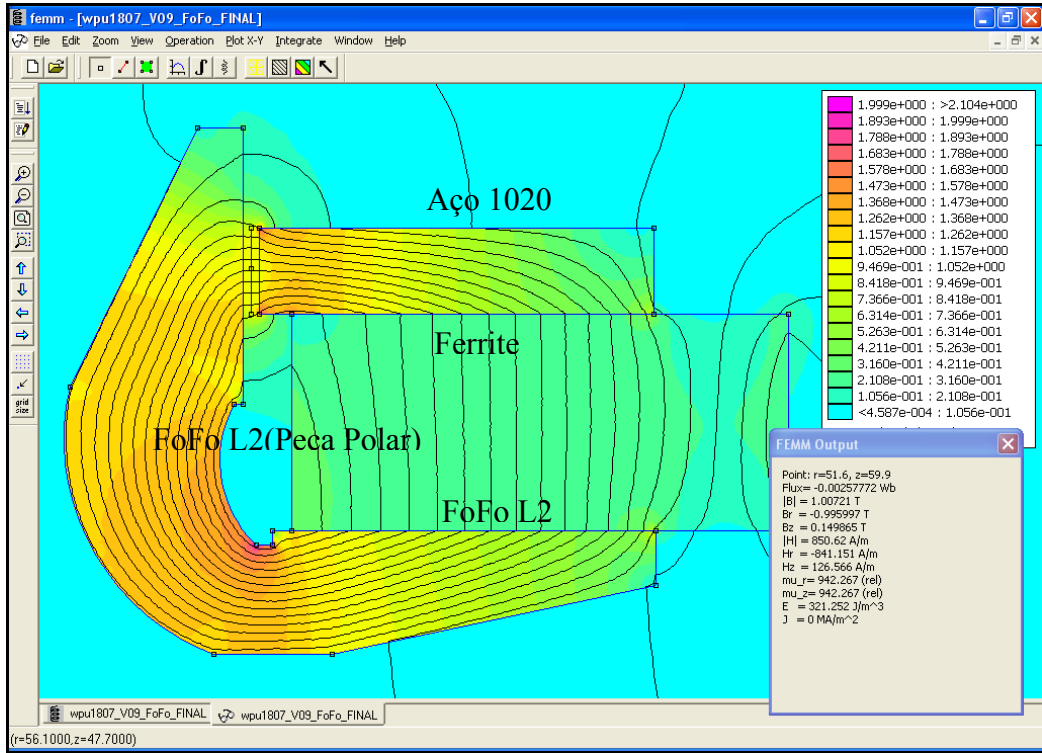


Figura 50 – Simulação do Conjunto Magnético utilizando Liga L2 e Novo Formato de Peça  
 Fonte: Lab. Teste Magnético da Eletrônica Selenium S.A.

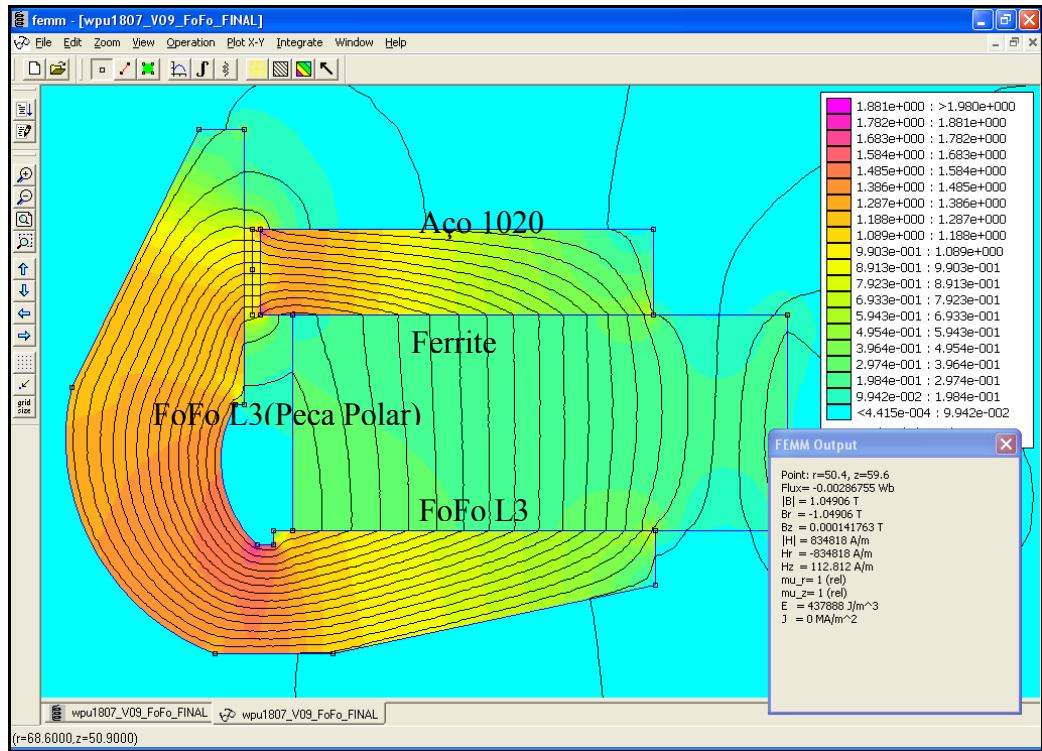


Figura 51 – Simulação do Conjunto Magnético utilizando Liga L3 e Novo Formato de Peça  
 Fonte: Lab. Teste Magnético da Eletrônica Selenium S.A.

Com estes dados foi gerada uma tabela com os materiais e as densidades de fluxo obtido. Estes dados são apresentados no quadro 2.

Peças	Densidade de Fluxo (em Gauss)
Peça com formato original com Liga L1	10100
Peça com formato original com Liga L2	9980
Peça com formato original com Liga L3	9900
Peça com novo formato com Liga L1	10800
Peça com novo formato com Liga L2	10670
Peça com novo formato com Liga L3	10580
AÇO 1020	10500

Quadro 2 – Ligas com sua Densidade de Fluxo  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim conclui-se que o melhor formato e material a ser empregado é a liga FoFo L1.

Para poder validar as simulações realizadas foram confeccionados protótipos físicos das peças simuladas.

#### 4.5 DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS

Foram feitos 10 protótipos de cada material, totalizando 30 peças. Para validação das simulações também foram confeccionados protótipos físicos, ou seja, alto-falantes foram montados para testes acústicos, num total de (03) três conjuntos de (10) dez alto-falantes.

As peças foram fundidas na Fundição Dueville, empresa de Caxias do Sul com parceria de longa data, utilizando as ligas L1, L2 e L3. Posteriormente os dados foram processados usando o Método de Análise por Elementos Finitos FEMM 4.2, podendo assim ser validado e utilizado em futuros projetos.

As peças fundidas foram enviadas para a Selenium e usinadas em tornos CNC, onde receberam o devido acabamento e o tratamento superficial.

Com as peças fornecidas os (30) trinta conjuntos magnéticos do woofer WPU1507 foram produzidos.

#### 4.5.1 Testes e Validação das Simulações

Após foram realizados os testes de Densidade de Fluxo de Campo Magnético nestes 30 conjuntos magnéticos, utilizando para isso o Gaussmeter Magnetic Field Strength Meter Gaussmeter/Teslameter FH 54.

Com estes conjuntos magnéticos foram montados (30) trinta protótipos do produto final, ou seja, foram construídos (30) trinta woofers WPU1507, só alterando o conjunto magnético em relação á peça original.

Com estes protótipos finais foram traçadas as Curvas de Resposta de cada peça e comparadas com a Curva de Resposta da peça original.

Como resultado comprovou-se as análises de Seleção de Materiais na escolha da liga L1 para substituir o Aço 1020 atualmente empregado. A figura 52, mostra à Curva de Resposta de três protótipos WPU1507 utilizando a liga L1, L2 e L3 comparando com o WPU1507 original.

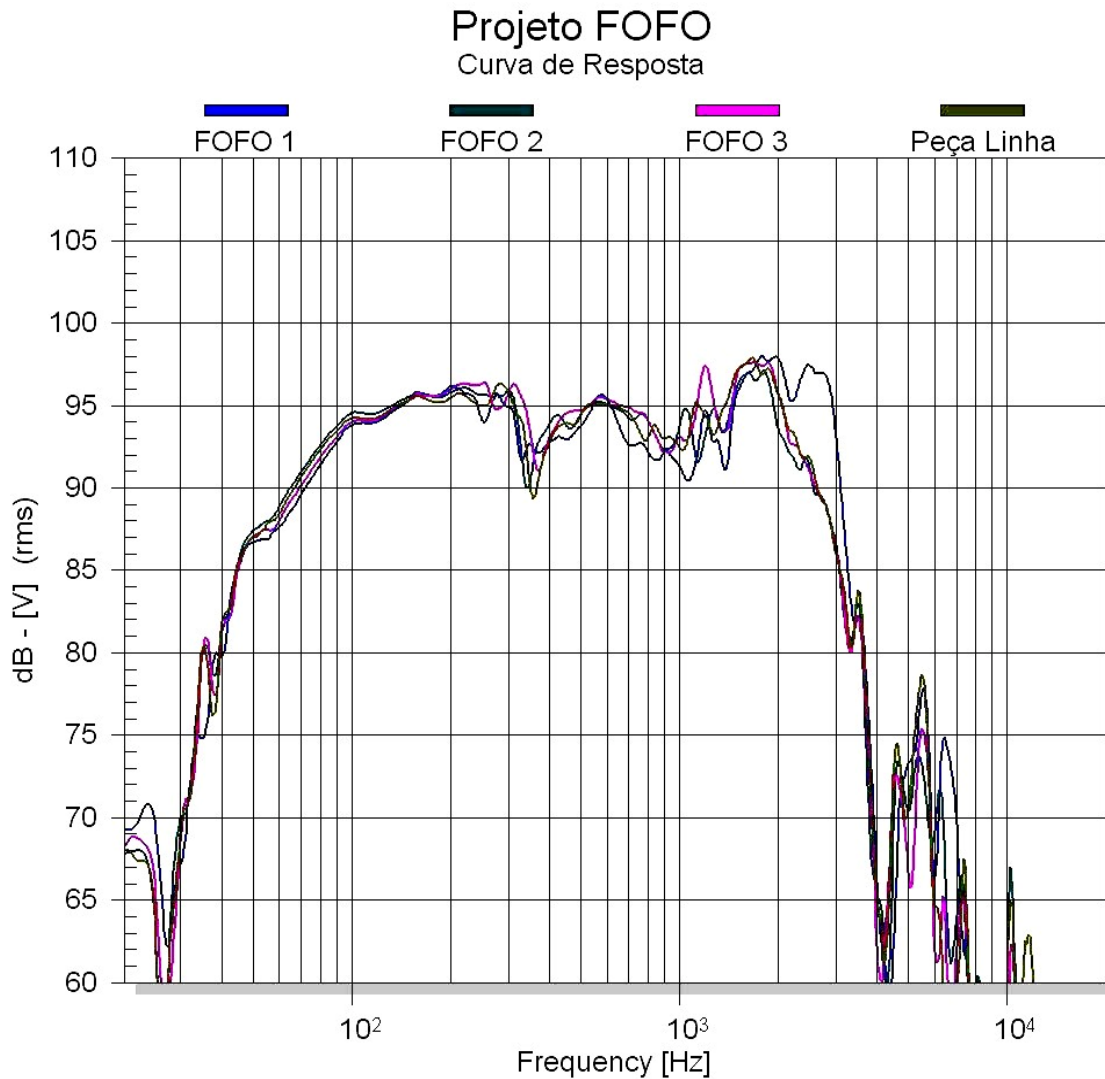


Figura 52 – Curva de Resposta Comparativa com Protótipos WPU1507-L1/L2/L3 e WPU1507 Atual  
Fonte: Laboratório de Teste Magnético da Eletrônica Selenium S.A.

Um teste acústico foi realizado comparando um woofer utilizando a liga L1 (liga selecionada) contra um woofer original. Este teste consistiu em aplicar o mesmo sinal musical para cada woofer, e assim, comparar a diferença sonora entre eles. Participaram deste teste os audiófilos da Selenium, com larga experiência neste tipo de comparação.

O resultado foi considerado excelente, onde não foi detectada auditivamente nenhuma diferença entre a mesma música tocada no woofer original e no woofer utilizando Ferro Fundido composto pela liga L1 com o seu novo formato. As peças L2 e L3, também com sua nova forma, apresentaram um desempenho muito similar ao original, perdendo apenas em eficiência, para a liga L1. O desempenho positivo foi esperado, uma vez que a análise da



Curva de Resposta já havia sido realizada com resultado dentro do especificado pelo projeto do woofer WPU1507.

A cerca das observações feitas no decorrer desta pesquisa, é possível ressaltar fatores importantes na aplicação deste processo para melhorar significativamente as propriedades magnéticas do Ferro Fundido Nodular:

O recozimento com aplicação de campo induzido nas ligas de ferro fundido produziu alterações na estrutura do material que viabilizaram uma melhora significativa na permeabilidade magnética do conjunto magnético. Também é apropriado colocar que a seleção dos materiais envolvidos no processo de fundição foi fator determinante, uma vez que elementos de liga, não magnetizáveis, foram excluídos ao máximo do processo.

O recozimento sem aplicação de campo magnético a 900-920°C, com resfriamento lento ao forno, gera uma estrutura ferrítica extremamente homogênea e com grãos de grafita bem localizados, como mostrado na figura 44 (PAOLINELLI, 2004).

Também a mudança na forma da peça polar, facilitou o fluxo magnético, fator determinante na validação dos resultados. É possível verificar as linhas de fluxo representadas nos gráficos fornecidos pelo software FLUX 2D FEMM 4.2. e os resultados de Densidade de Fluxo medido em Gauss, mostrado no quadro 2.

Um dos “Métodos de Elementos Finitos” utiliza o software FLUX 2D FEMM 4.2 que é uma ferramenta fundamental para as análises de Densidade de Fluxo Magnético, propiciando modificações de projeto significativas, como no caso específico, mudanças no design da peça polar (formato do núcleo magnético). O método consiste numa adaptação para soluções de equações diferenciais tal como “Equações de Poisson e Laplace”.

Devido as suas características de flexibilidade e estabilidade numérica, o método pode ser utilizado em sistemas computacionais como é o caso da distribuição de temperaturas e o eletromagnetismo. Em muitos casos o FEMM é a única ferramenta que pode fornecer uma solução adequada, mesmo que seja uma aproximação. Os fenômenos do eletromagnetismo são resolvidos através das “Equações de Maxwell” e apresentadas na sua forma diferencial, mas dificilmente são solucionadas na forma em que são colocadas, pois implica em encontrar uma solução (analítica ou numérica) para várias equações simultaneamente. Desta forma, costuma-se solucionar uma equação equivalente, a qual decorra das demais, para tanto introduz-se uma grandeza vetorial auxiliar chamada de “Potencial Vetor”, o qual em princípio

não tem um significado físico, apenas colabora para termos uma solução através de um meio computacional (numérico).

#### 4.6 CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DAS AMOSTRAS TRATADAS

O fato das amostras nas quais foi aplicado o processo de recozimento com indução magnética terem sofrido mudanças na microestrutura, pode ser explicado pela semelhança entre o processo de recozimento e o tratamento térmico na qual o material é submetido durante o processo de laminação, onde o material é resfriado ao ar no decorrer dos passes da transformação mecânica, como é o caso, das chapas laminadas para transformadores (PAOLINELLI, 2004).

Apesar da impossibilidade em se obter uma estrutura totalmente ferrítica nos Ferros Fundidos Nodulares, sem o tratamento de recozimento, nos aços de baixo carbono consegue-se alcançar este objetivo facilmente, ou seja, em chapas finas para uso em transformadores isto quase sempre ocorre com sucesso. Estes resultados se devem à obtenção da estrutura formada por grãos aciculares de ferrita bem distribuídos ao longo da chapa. O recozimento com indução favorece ainda mais este objetivo, já que os domínios magnéticos passam a serem orientados.

O tratamento de recozimento obteve grandes modificações nas propriedades magnéticas do material, o que facilitou a análise dos resultados dos ensaios de permeabilidade magnética.

#### 4.7 CORRELAÇÃO ENTRE PERMEABILIDADE E CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICO-METALÚRGICAS

No quadro 2, pode-se observar que as mudanças no formato da peça polar proporcionaram ganhos importantes de Densidade de Fluxo, tanto quanto no tratamento

térmico, e por estarem atuando simultaneamente atingiram a meta para a substituição da liga de aço SAE 1020, como mostrado nas tabelas 3, 4, 5 e 6.

Quanto ao efeito das variações de composição química entre as amostras analisadas, para os teores dos elementos e para o teor de carbono permite atribuir à variação da composição química uma grande influência nos resultados de permeabilidade magnética. De fato, a composição química das amostras obtidas de FoFo baseado na norma ASTM A 536 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1988a), A 247 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995a), E 30 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995f) e E 59 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1988c), possuem um controle mais rígido.

O experimento mostra que durante o processo de recozimento a anisotropia da estrutura diminui, Shokrollahi e Janghorban (2007), e à medida que a temperatura de recozimento avança, se aproximando de 550°C por 1 hora, a estrutura apresenta um tamanho de grão médio menor que 50  $\mu$ m diminuindo as perdas magnéticas. As perdas já são conhecidas, podem ser por histerese, correntes parasitas e anômalas. As perdas por histerese são as que dificultam em muito o movimento dos domínios magnéticos, desta forma uma boa seleção do material utilizado no ferro fundido auxilia a compactação e conseqüentemente uma melhora na permeabilidade magnética.

O recozimento feito em etapas, mostra que a purificação da estrutura do FoFo nodular é determinante, visto que o controle do resfriamento é um fator determinante e permite, de uma forma mais segura, fazer com que os seus domínios magnéticos permaneçam orientados.

#### 4.8 CORRELAÇÃO ENTRE CURVA DE RESPOSTA E CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS-METALÚRGICAS

Com relação às Curvas de Resposta, podemos observar que todas as ligas desenvolvidas apresentaram desempenho dentro das especificações de projeto para o woofer WPU1507. Cabe colocar que nas faixas de frequência entre  $10^3$  -  $10^4$  (Hz) o desempenho das ligas L1, L2, e L3, como do Aço 1020, também é similar fazendo seu uso preferencialmente nas baixas frequências.

Nas baixas frequências, até  $10^3$  (Hz), todas as ligas apresentam uma mesma Curva de Resposta, ou seja, todos os conjuntos magnéticos podem ser construídos com qualquer uma das ligas, L1, L2 e L3, pois a densidade magnética apresentada anteriormente mostra um perfil das linhas de fluxo magnético muito similar.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho estuda a possibilidade do uso da indução magnética durante o recozimento do Ferro Fundido Nodular, a fim de obter um aumento na sua permeabilidade magnética viabilizando seu uso em substituição ao Aço SAE 1020 dentro dos núcleos magnéticos dos alto-falantes. A confirmação das propriedades deste material, como bom condutor e de alta permeabilidade, propiciou o interesse no uso do ferro fundido nodular como um bom substituto ao Aço 1020 usinado.

Os resultados obtidos no decorrer deste trabalho permitem concluir que varias etapas foram seguidas obedecendo-se rigorosas medidas de controle. Um dos resultados mais significativos foi relativo á composição da liga, ou seja, o quanto cada elemento impactou na resposta magnética do equipamento em questão, no caso o alto-falante. Testes foram realizados observando-se as propriedades magnéticas, mas também as respostas em relação á percepção acústica e a qualidade sonora que o equipamento apresentava.

Foram importantes os resultados que as diversas composições de liga obtiveram, em especial a liga L1, pois quando submetida ao processo de recozimento com indução magnética (RIM) e com sua forma modificada, o woofer WPU1507 mostrou um grande desempenho. As ligas L2 e L3 sem alterações no formato não demonstraram condições de substituição do núcleo original, mas quando tiveram a alteração implementada, também mostraram-se eficientes. A liga L1, tendo obtido resultados de campo magnético superiores, tornou-se a melhor opção para utilização no conjunto magnético.

Outro trabalho importante na seleção dos materiais, para os núcleos magnéticos, voltou-se para a eliminação dos materiais não magnetizáveis, ou seja, aqueles que se tornavam uma barreira magnética e um impedimento ao alinhamento dos domínios. Isto torna-se claro quando estudamos a teoria dos domínios magnéticos, onde elementos não magnetizáveis tornam-se verdadeiras barreiras de fronteira. Também importante no sucesso do projeto foram os assuntos pertinentes da fundição, onde as questões como velocidade de resfriamento e demais variáveis fundamentais a este processo sofreram um controle rigoroso. Foi possível concluir quando as análises metalográficas mostraram os nódulos de grafita e a matriz ferrítica bem delineados.

O Recozimento ofereceu um ganho considerável na Permeabilidade Magnética, quando olhamos a mudança de uma estrutura perlítica para uma totalmente ferrítica, do FoFo Nodular, isto devido ao aquecimento entre as faixas de temperatura até aproximadamente 770°C, ou seja, próximo ao “Ponto Curie”. Nesta faixa de temperatura observou-se um aumento da indução magnética “B” e uma diminuição da força magnética “H”, informações estas específicas do desenvolvimento do projeto. Após a temperatura de 770°C até 910°C, observou-se uma queda na indução magnética “B”, completando-se, então, a etapa final do processo com um resfriamento lento.

Considerando que a Norma ASTM A 596/596M – 95 determina um método padrão para análise de permeabilidade e saturação magnética, conseqüentemente de suas perdas, conclui-se que é possível analisar com precisão e validar os resultados obtidos neste trabalho (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995b). O melhor indicador da performance de um material elétrico são os valores de suas perdas, em especial as perdas por histerese, pois corresponde a mais de 50% em muitos casos. Para o usuário final o que interessa são as perdas totais, mas para pesquisadores o que interessa, e muito, é o processamento com suas implicações e as mudanças geradas na estrutura do material. Também é importante inferir que não existe um modelo fixo para determinação destas perdas, mas diversas modelagens utilizam o “Método de Elementos Finitos” como o melhor caminho.

A influência da estrutura cristalina nas propriedades magnéticas é melhor avaliada quando realizamos os testes de medição da Densidade de Fluxo Magnético, pois os planos cristalinos que favorecem a passagem do fluxo magnético, no caso do ferro, é o plano {110} paralelo à superfície e a direção <001> paralela a direção longitudinal do material. O processo de Indução Magnética é uma ferramenta importante para propiciar o alinhamento dos domínios magnéticos, como é também uma ferramenta poderosa nos processos de laminação de chapas recozidas para transformadores.

O processo de fundição reduziu os custos de fabricação dos conjuntos magnéticos, pois eliminou os processos de usinagem profunda que eram realizados anteriormente, ficando apenas os processos finais de acabamento.

A modificação na forma da peça polar trouxe ganhos técnicos e também econômicos, estes na faixa de 40% (quarenta por cento), como a redução de peso e o aumento do desempenho do alto-falante. No que diz respeito aos ganhos técnicos, é possível analisar as linhas de fluxo em todas as ligas e concluir que a permeabilidade apresenta ganhos

significativos, visto que a concentração do campo magnético proporcionou um aumento no desempenho dos alto-falantes. Outro ponto também avaliado foram as observações realizadas por audiófilos especializados, que participaram dos testes de percepção sonora numa sala de som, conforme exemplo mostrado na figura 53. Cabe salientar que o teste, além dos próprios resultados obtidos pelo alto-falante com núcleo de FoFo, teve o comparativo acústico simultâneo com o mesmo alto-falante com núcleo em Aço SAE 1020. As observações feitas pelos audiófilos mostram uma preferência pelo modelo em FoFo, ou seja, sem terem a informação de qual modelo era feito em FoFo, indicaram o mesmo como o sendo o de melhor desempenho. Estas conclusões, feitas por estes especialistas em som, validaram definitivamente o sucesso do trabalho. Foi sugerido que se estendessem os estudos, para aplicação em outros modelos, a fim de avaliar o desempenho em outras faixas de frequência.

Este trabalho mostrou ser possível a utilização do processo de Recozimento com Indução Magnética (RIM), para melhorar significativamente as propriedades magnéticas de FoFos, uma vez que outras possibilidades para o seu uso são cogitadas e também são apresentadas como “Sugestões para Futuros Trabalhos”.

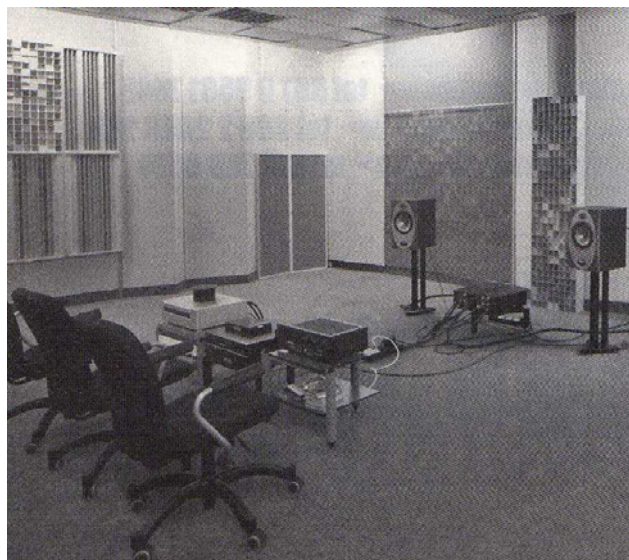


Figura 53 – Sala de Som  
Fonte: Áudio Amateur Inc., 2007

## 6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- a) utilização do equipamento de RIM para desenvolvimento e seleção de materiais ferromagnéticos de alta performance;
- b) pesquisa sobre as relações da forma do núcleo magnético com o alinhamento dos domínios através do RIM;
- c) continuar pesquisa sobre a influência da forma na percepção acústica em alto-falantes;
- d) estudo sobre o comportamento dos domínios magnéticos do ferro, quando estes são submetidos a um aumento de temperatura acima do “Ponto Curie” e a altas induções magnéticas;
- e) desenvolvimento de processos com o RIM, utilizando pó de ferro encapsulado visando diminuição de perdas magnéticas e possibilitando, assim, o seu uso na construção de máquinas elétricas mais eficientes;
- f) pesquisa sobre o rendimento elétrico de motores quando seus núcleos magnéticos são submetidos ao processo de RIM.
- g) pesquisa sobre a relação de fatores intangíveis da Seleção de Materiais comparado a fatores objetivos de Seleção ( Sound Design, Percepção e Materiais)



## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A247**: Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Casting. Philadelphia, 1995a.

\_\_\_\_\_. **ASTM A536**: Specification for Ductile Iron Casting. Philadelphia, 1988a.

\_\_\_\_\_. **ASTM A596 / A596M**: Standard Test Method for Direct-Current Magnetic Properties of Materials Using Ballist Method and Ring Specimens. Philadelphia, 1995b.

\_\_\_\_\_. **ASTM A732 / A732M**: Specification for Casting, Investment, Carbon and Low Alloy Steel for General Application, and Cobalt Alloy for High Strength at Elevated Temperatures. Philadelphia, 1988b.

\_\_\_\_\_. **ASTM A395**: Standard Specification for Ferritic Ductile Iron Pressure-Retaining Casting for Use at Elevated Temperatures. Philadelphia, 1993.

\_\_\_\_\_. **ASTM A34**: Standard Practice for Procurement Testing and Sampling of Magnetic Materials. Philadelphia, 1995g.

\_\_\_\_\_. **ASTM A340**: Standard for Terminology of Symbols and Definitions Relating to Magnetic Materials. Philadelphia, 1995d.

\_\_\_\_\_. **ASTM A36/A 36M**: Standard Specification for Carbon Structural Steel. Philadelphia, 1996a.

\_\_\_\_\_. **ASTM A773**: Standard for Test Method for Direct-Current Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with D-C Electronic Hysteresigraphs. Philadelphia, 1995c.

\_\_\_\_\_. **ASTM E30**: Standard Test Methods for Chemical Analysis of Steel, Cast Iron. Philadelphia, 1995f.

\_\_\_\_\_. **ASTM E59**: Practice for Sampling Steel and Iron for Determination of Chemical Composition. Philadelphia, 1988c.

\_\_\_\_\_. **ASTMA 341**: Standard for Test Method for Direct-Current Magnetic Properties of Materials Using D-C Permeameters and the Ballistic Test Methods. Philadelphia, 1995e.

ASM. **Metal-Handbook**. Ohio: ASM International, 1991. 15 v.

AUDIO AMATEUR INC., **An Annual Publication of Amateur Inc., Publishers of Voice Coil**, 2007.

BARTOSIEWICZ, L. et al. Influence of austempering temperature on microstructure and fracture toughness of a high-carbon, high-silicon and high-manganese cast steel. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR TESTING AND FAILURE ANALYSIS, 16., 1990, Ohio. **Proceedings...** Ohio: ISTFA ASM, 1990. p. 323-336.

\_\_\_\_\_. Development of austempered ductile cast iron (ADI) with simultaneous high yield strength and fracture toughness by a novel two-step austempering process. In: SYMPOSIUM TMS, Detroit, 1999. **Proceedings...** Detroit: AMS-TMS Student Chapter, 1999. p. 135-138.

BERTOTTI, G. Stochastic model for magnetic hysteresis. In: BERTOTTI, G. **Hysteresis in magnetism for physicist, materials scientists, and engineers**. Torino: Academic Press, 1998. p. 399-428

BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism, VAN Nostrand**. Nova York: IEEE Magnetic Society, 1951.

\_\_\_\_\_. **Ferromagnetism**. Nova York: IEEE Magnetic Society, 1986.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS EN 60404, magnetic material**: part 2. methods of measurement of magnetic, electrical and physical properties of magnetic sheet and strips. London, 1998.

BUSCHOW, K. H. J. **Handbook of magnetic materials**. Amsterdam: Elsevier Science, 1995. v. 8.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Materials science and engineers: an Introduction**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **A importância do design para sua empresa**. Brasília, 1998.

CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **Fundamentals of harmonic analysis of eletromagnetic fields**. Hannover/Rio de Janeiro, 2000.

CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS. **Caracterização das Propriedades Mecânicas do Ferro Fundido Nodular por Análise Harmônica dos Sinais das Correntes Parasitas**, Hannover/Rio de Janeiro, 2002.

CULLITY, B.D. **Elements of X-ray diffraction**. Reading: Addison-Wesley, 1974.

\_\_\_\_\_. **Introduction to magnetism material**. Reading: Addison-Wesley, 1972.

CATARINO, J. **Electrotecnia-Magnetismo**. Setúbal: Escola Superior de Tecnologia, [200-]. Disponível em: <[hppt://Itod.est.ips.pt/joseper/SCE/Electrotecnia-Magnetismo.pdf](http://Itod.est.ips.pt/joseper/SCE/Electrotecnia-Magnetismo.pdf)>. Acesso em: 2 out. 2008.

SCOREL, A. L. **O efeito multiplicador do design**. 2. ed. São Paulo: SENAC, 1999.

EUROTHERM. **Forno de Tratamento Térmico**. Creditado Nadcap (National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program – Programa de Creditação de Fornecedores da Defesa e Aeroespacial Nacionais, AS7102 – Nadcap para Tratamento Térmico). São Paulo, 2008.

FEISTE, K. L. et al. Caracterização das propriedades mecânicas de ferro fundido nodular por análise harmônica dos sinais das correntes parasitas. In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 6., 2002, Salvador. **Anais...** São Paulo: ABENDE, 2002. COTEQ 220. Disponível em: <<http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/PDF/COTE220.pdf>>. Acesso em: 4 ago. 2008.

FILARDO, J. V. **Perdas magnéticas**. Curitiba: UFPR, [200-]. Disponível em: <<http://eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/JulianoFilardo.pdf>>. Acesso em: 4 ago. 2008.

FIORILLO, F. **Measurement and Characterization of Materials**. Torino: Elsevier 2004.

FISCHER, O.; SCHNEIDER, J. Influence of deformation process on the improvement of non-oriented silicon steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Bilbao, v. 254-255, p. 302-306, 2003.

GUNDLACH, R. B.; MULLINS, J. D. Improving the properties of austenizing ductile iron. SAE 2002 WORLD CONGRESS, 2002, Detroit, Michigan. **Proceedings...** Warrendale, PA: SAE World Headquarters, 2002. SAE Technical Paper Series 2002-01-139.

HARATANI, T. et al. Contribution of shear banding to origin of Goss texture in silicon iron. **Metal Science**, London, v. 18, p. 57-65, 1984.

IEE, C. S. The texture evolution of non-oriented silicon steel. In: ICOTOM, 12., 1999, Montreal. **Proceedings...** Montreal: NRC Research Press, 1999. p. 1083-1088.

IEC 60404-4, **Methods of measurement of the d.c. magnetic properties of solid steel.** Geneva: IEC, 2000.

IEC 60404-5, **Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically hard (permanent magnet) material.** Geneva: IEC, 2004.

IEC 61807 TR, **Methods of measurement of magnetically hard materials at elevated temperature,** Geneva: IEC, 1999.

IEC 60404-6, **Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 200 Hz by means of ring methods.** Geneva: IEC, 2003.

JACK, A.G.; MECROW, B.C.; DICKINSON, P.G. **Iron loss in machines with powdered iron stators.** In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE, Seattle, USA, 1999. **Proceedings...** Washington: IEMDC, 1999. p. 48-50.

KINDLEIN, W. J. **Importância do Binômio Design e Engenharia como Catalizador de Inovação.** Porto Alegre: Laboratório de Design e seleção de Materiais/UFRGS, 2006.

KNELLER, E. **Ferromagnetismus.** Berlin: Springer, 1962.

LANDGRAF, F. J. G. **Propriedades magnéticas de aços para fins elétricos.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2001.

LANDGRAF, F. J. G.; EMURA, M. Loos and permeability improvement by stress relieving of fullyprocessed electrical steel with small deformations. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, São Paulo, v. 242 pp. 152-156, 2002.

LANDGRAF, F. J. G.; HERNALSTEENS, C. Crescimento de grão induzido por deformação em aço baixo carbono. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 49., 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 1995. v. 1, p. 135-148.

LECHERMANN, F.; FAHNLE, M.; SANCHES, J. M. Intermetallics. **Journal of Magnetic and Magnetic Materials**, North-Holand, v. 13, p. 1096, 2005.

LEICHT, J. et al. Magnetic properties of 6,5% silicon content non-oriented electrical steel under sine and PWM excitation. **Journal of Magnetic and Magnetic Materials**, North-Holand, v. 320, p. 385-388, 2008.

LIFSHIN, E. **X-ray characterization of materials**. New York: Wiley-VCH, 1999.

MOSES, A.J.; LEICHT, J. Loss Separation in amorphous ribbon under sinusoidal and PWM magnetization conditions. **PTB-E-81 report series of Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig**, v. 81, p. 181-185, 2003.

MOSKOWITZ, L. R. **Permanent magnet design and application handbook**. Boston, MA: Cahners Books International, 1976.

MUÑOZ-MORRIS, M. A.; MORRIS, D. G. Microstructure and mechanical behaviour of a Fe-Ni-Al alloy. **Materials Science and Engineering**, Madrid, v. A 444, p. 236-241, 2007.

\_\_\_\_\_. Desenvolvimento do produto GNO-110 de perdas magnéticas ultra baixas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS DA ABM, 2., 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 1997.

PAOLINELLI, S. C. Efeito da temperatura de acabamento sobre a estrutura e as propriedades magnéticas de um aço grão não orientado com 1,3% de Si. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 23-27, 2004.

\_\_\_\_\_. Non-oriented silicon steel recrystallization texture study. **Materials Science Forum**, Zuerich, v. 48, p.779-784, 2002.

PETZOW, G.; EFFENBERG, G. **Ternary alloys, a comprehensive compendium of evaluated constitutional data and phase diagrams**. Weinheim: Wiley-VCH, 1988.

PEREIRA, L. A. **Método dos elementos finitos aplicado ao eletromagnetismo**. Porto alegre: PPGEE, 2000. Disponível em:

<diana.ee.pucrs.br/~lpereira/fem2000/FEM2D\_Eletromagnetismo.pdf>. Acesso em: 10 out. 2008.

PUTATUNDA, S. K. Tests evaluation. **Materials Science and Engineer**, Stanford, v. 23, n. 5, p. 325-332, 1995.

PUTATUNDA, S. K. et al. Materials characteristics. **Materials Science and Engineering**, Detroit, v. 30, p. 221-234, 1993.

PUTATUNDA, S. K.; AMBOOKEN, M. T.; PULLUM, B. J. Thermo-magnetic processing of ductile cast iron. **Materials Science and Engineer**, Stanford, v. 460-461, p. 31-38, 2007.

REED HILL, R.E. **Physical metallurgy principles**. 2nd ed. New York: D. Van Nostrand Company, 1973.

SIEVERT, J. et al. European intercomparison of measurements on permanent magnets. **IEEE Transactions on Magnetics**, Stockholm, v. 29, n. 6, p. 2887-2889, 1993. Report EUR 15036 EN, 1993.

SMITH, W. F. **Structure and metallurgy of engineering alloys**. New York: McGraw Hill, 1981.

STALLYBRASS, C.; SCHNEIDER, A.; SAUTHOFF, G. The strengthening effect of (Ni, Fe)Al precipitates on the mechanical properties at high temperatures of ferritic Fe-Al-Ni-Cr alloys. **Intermetallics**, v. 13, p. 1263, 2005.

STEGEMANN, D. **Fundamentos do método de correntes parasitas**. Belin: Weka Druck, 1990. v. 1.

STEINGROEVER, S. **Magnetic measuring techniques**. Köln, Germany, : Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, 2008.

USHIODA, K.; HUTCHINSON, W. B. Role of shear Bands in Annealing Texture formation in 3%Si-Fe(111)[112] Single Crystals. **ISIJ International**, Tokyo, v. 29, n. 10, p. 862-867, 1989.

UNISANTA. **Ferromagnetismo e relações de fronteira no campo magnético**. São Paulo, c2006-2008. Disponível em: <<http://professores.unisanta.br/Santana/downloads>>. Acesso em: 11 ago. 2008.

VAN VLACK, L. **Princípio de ciência dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

WERNER, F. E. **Steels for lamination in energy efficient motors**, Report N° 91-11, 1991.

## APÊNDICE A – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADOS AO ELETROMAGNETISMO<sup>1</sup>

### Método dos Elementos Finitos Aplicados ao Eletromagnetismo

O FEMM tem o início da sua utilização na década de 40, mas a sua utilização vem sendo observada, com mais força, nos últimos anos.

Ele é um método matemático que soluciona equações diferenciais parciais como equações de Poisson e Laplace que possuem uma característica peculiar pela flexibilidade e fácil adaptação a sistemas computacionais. É um método e uma ferramenta capaz de solucionar com uma excelente aproximação problemas nas diversas áreas da engenharia como é o caso do eletromagnetismo.

As equações de Maxwell regem os fenômenos no eletromagnetismo e são apresentadas abaixo:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{S}; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho. \quad (4)$$

$\vec{E}$  - Intensidade do campo elétrico (grandeza vetorial)

$\vec{H}$  - Intensidade do campo magnético (grandeza vetorial)

---

<sup>1</sup> Elaborado pelo autor com base em: PEREIRA, 2000.



$\vec{D}$  - Densidade de campo elétrico (indução elétrica, grandeza vetorial)

$\vec{B}$  - Densidade de campo magnético (indução magnética, grandeza vetorial)

$\vec{S}$  - Densidade superficial de corrente elétrica (grandeza vetorial)

$\rho$  = Densidade volumétrica de cargas (escalar).

Nas expressões anteriores,  $\nabla$  representa o operador “Nabla”, dada pela relação de coordenadas cartesianas:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}.$$

(5)

Onde  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  e  $\vec{k}$  são os vetores unitários nas direções x, z e y respectivamente e  $\nabla \times$  e  $\nabla \cdot$  (rotacional e divergente).

Logo  $\nabla$  é um operador vetorial, podendo ser obtido através do produto vetorial e escalar onde ele for utilizado.

No caso entre intensidades e densidades de campo elétrico/magnético, para materiais isotrópicos lineares.

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}; \tag{6}$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}; \tag{7}$$

$$\vec{S} = \sigma \cdot \vec{E}. \tag{8}$$

$\mu$  - permeabilidade magnética,  $\varepsilon$  - permissividade elétrica e  $\sigma$  - condutividade elétrica, são grandezas escalares (constantes) para materiais isotrópicos lineares.

Para o caso de fenômenos estáticos, as equações (1) – (4) se reduzem a seguinte forma:

$$\nabla \times \vec{E} = 0; \tag{9}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{S}; \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0; \quad (11)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho. \quad (12)$$

As equações (6)-(8) seguem válidas. Neste caso existe uma independência entre o campo elétrico e o campo magnético. Para o estudo de campos magnéticos estáticos, os quais serão abordados mais adiante pelo método dos elementos finitos, necessita-se considerar apenas as seguintes equações:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{S}; \quad (13)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0; \quad (14)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} .$$

(15)

As equações acima são as equações fundamentais da magnetostática. Para a derivação do Método dos Elementos Finitos ainda é utilizado o Teorema de Green no Plano, o qual estabelece que para duas funções  $u(x,y)$  e  $v(x,y)$  vale a relação:

$$\iint_A \nabla^2 u(x, y) \cdot v(x, y) \cdot dA = - \iint_A \nabla u(x, y) \cdot \nabla v(x, y) \cdot dA + \oint_{L(A)} \nabla u(x, y) \cdot v(x, y) \cdot dl . \quad (16)$$

As equações de Maxwell são raramente solucionadas na forma em que estão colocadas nas expressões (13) a (16), pois implicaria encontrar uma solução (analítica ou numérica) que satisfaça três equações simultaneamente, o que torna o processo de solução em geral mais difícil, sobretudo quando se procura uma solução numérica aproximada. Neste caso, torna-se mais difícil encontrar parâmetros para a solução que satisfaçam simultaneamente três equações segundo um determinado critério de otimização.

Desta forma, costuma-se solucionar uma equação equivalente, a qual decorre das três equações citadas. Para tanto, introduz-se uma grandeza vetorial auxiliar chamada de "Potencial Vetor", o qual em princípio não possui um significado físico, servindo apenas para

facilitar a solução numérica. O potencial vetor  $A$  é definido de tal forma que a indução  $B$  seja obtida por meio do seu rotacional:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B}. \quad (17)$$

De acordo com a equação 17, a indução magnética  $\vec{B}$  é obtida através da derivação do potencial, logo o potencial vetor será:

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0. \quad (18)$$

Assim tem-se a equação de Poisson:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = -\mu \cdot \vec{S}. \quad (19)$$

Quando  $\vec{S} = 0$ , temos a equação de Laplace:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = 0. \quad (20)$$

A equação acima pode ser escrita como  $\nabla^2 A = 0$ , conhecida como operador Laplaciano e pode resolver problemas de contorno e potencial conforme equação abaixo, utilizando o “Método dos Elementos Finitos Aplicados ao Magnetismo”:

$$\frac{\sigma^2 A}{\partial x^2} + \frac{\sigma^2 A}{\partial y^2} = -\mu \cdot S. \quad (21)$$

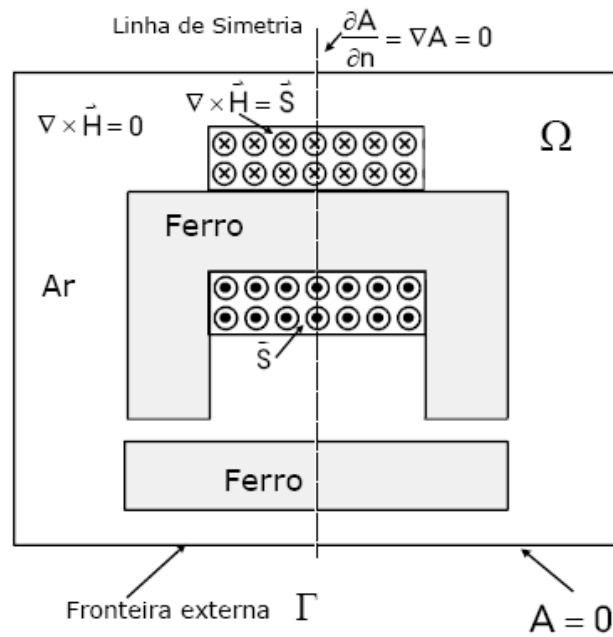


Figura 1: Fenômeno de Magnetostática.

A figura 1 mostra um exemplo de fenômenos eletromagnéticos com domínio  $\Omega$  onde a solução é procurada na fronteira “n” e limitada por um contorno retangular  $\Gamma$  em torno da estrutura magnética. Também mostra as regiões em que circula corrente ( $S$  diferente de zero) e por outro lado, onde não existe corrente ( $S$  igual a zero), valendo assim a equação de Laplace.

Após estas considerações segue-se definindo as condições de contorno e a discretização dos domínios, ou também conhecido como subdivisão de domínios. Esta subdivisão de domínios também é chamada de “elementos” que posteriormente formam seus respectivos triângulos. Cada “vértice” com seus elementos fornecem os pontos, “nós” que alimentam o Método dos Elementos Finitos.

As figuras 2 e 3, mostram um exemplo de distribuição de campo magnético através de suas linhas de fluxo e sua representação discretizada.

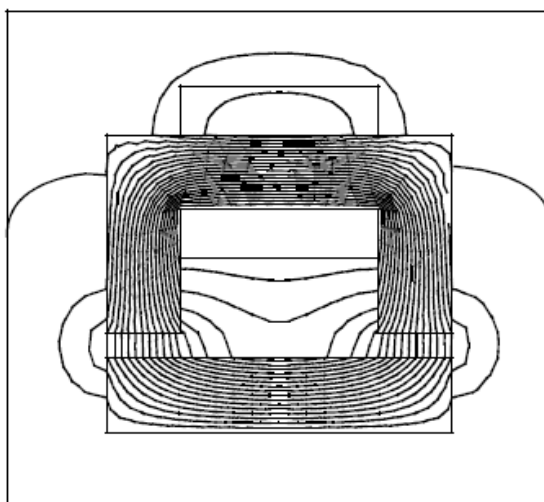


Figura 2: Distribuição de Campo Magnético.

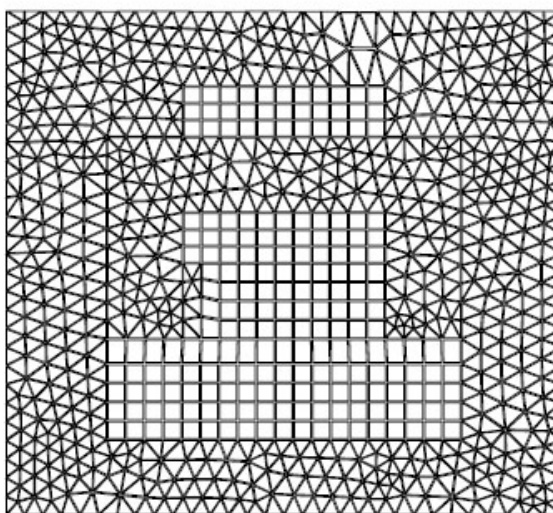


Figura 3: Representação Discretizada do Campo Magnético (malha).