

**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**

**PPGE3M**

**Halston Mozetic**

**Tese de Doutorado**

**MICRO ESTAMPAGEM E RECOZIMENTO CONJUGADO COM CAMPO  
INDUZIDO: EFEITOS NO DESEMPENHO ELETROMAGNÉTICO PARA  
CHAPAS ELÉTRICAS DE GRÃO NÃO ORIENTADO**

**Orientador: Prof. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer**

**Porto Alegre  
2014**

**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**

**PPGE3M**

**MICRO ESTAMPAGEM E RECOZIMENTO CONJUGADO COM CAMPO  
INDUZIDO: EFEITOS NO DESEMPENHO ELETROMAGNÉTICO PARA  
CHAPAS ELÉTRICAS DE GRÃO NÃO ORIENTADO**

**Halston Mozetic**  
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Laboratório de Transformação Mecânica 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 Doutor em Engenharia.

**Área de Concentração:** Processos de Fabricação  
**Orientador:** Prof. Dr. -Ing. Lírio Schaeffer

**Porto Alegre  
2014**

**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**

**PPGE3M**

**TESE PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM  
ENGENHARIA**

**MICRO ESTAMPAGEM E RECOZIMENTO CONJUGADO COM CAMPO  
INDUZIDO: EFEITOS NO DESEMPENHO ELETROMAGNÉTICO PARA  
CHAPAS ELÉTRICAS DE GRÃO NÃO ORIENTADO**

**Doutorando:** Halston Mozetic

**Orientador:** Prof. Dr. –Ing. Lúrio Schaeffer (DEMET/PPGEM/UFRGS)

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Eng. Vicente Mariano Canalli (PUC/RS)

Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias (FEEVALE)

Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha (DEMET/PPGEM/UFRGS)

**Suplente:** Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (UFRGS)

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M/UFRGS

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Ing. LÍrio Schaeffer pelo apoio, oportunidade e orientação a mim dedicada.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

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

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

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela disponibilização da infraestrutura utilizada neste período.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quadro de Epstein 50, 60 Hz. ....	26
Figura 2 – Esquemática do “Quadro de Epstein”. ....	26
Figura 3 – Diagrama de fases para o sistema Ferro-Carbono.....	29
Figura 4 – Diagrama de fases de um liga Ferro-Silício.....	30
Figura 5 – Corte da chapa GO .....	31
Figura 6 – Direções de magnetização do Ferro .....	32
Figura 7 – Estrutura cúbica do Ferro .....	32
Figura 8 – Curva de magnetização para três direções .....	33
Figura 9 – Influência dos elementos de liga nas perdas por histerese .....	34
Figura 10 – Linhas de força para materiais: (a) paramagnéticos, (b) diamagnéticos e (c) ferromagnéticos .....	34
Figura 11 – Induções magnéticas no Quadro de Epstein: a) linhas orientadas de fluxo magnético. b) induções nos três pontos indicados.....	35
Figura 12 – Representação esquemática do magnetismo atômico: (a) diamagnético (b) magnético.....	36
Figura 13 – Representação esquemática do alinhamento de domínios .....	37
Figura 14 – Domínios magnéticos adjacentes: (a) separados por parede de Bloch de $180^\circ$ , e (b) detalhe da parede de domínio. ....	38
Figura 15 – Representação esquemática do processo de alinhamento magnético do material: a) domínios magnéticos desalinhados. b) se alinhando sob ação de campo magnético. ....	39
Figura 16 – Curva de magnetização de lâminas de aço silício com frequência de 1 Hz .....	39
Figura 17 – Fenômeno dos ciclos de histerese magnética típicos com representação de B, H.40	
Figura 18 – Representação esquemática de ciclos de histerese para diferentes materiais, onde, no gráfico (a), as perdas magnéticas, representadas pela área interna (em cinza), são menores.41	
Figura 19 – Representação esquemática das perdas em função da frequência. ....	42
Figura 20 – Fenômeno da histerese magnética típicos com representação de B, H: a) somente perdas por histerese; b) perdas por histerese e correntes de foucault; c) perdas por histerese, correntes de foucault e excedentes. ....	42
Figura 21 – Influência da adição de silício na resistividade elétrica (à esquerda) e nas .....	43
propriedades mecânicas dos aços (à direita).....	43
Figura 22 – Influência da área do contorno de grão nas perdas. ....	44

Figura 23 – Comportamento das perdas magnéticas e suas componentes em função do tamanho de grão.....	45
Figura 24 – Influência da área do contorno de grão nas perdas para diferentes frequências ...	45
Figura 25 – Crescimento das perdas histeréticas Ph em função da deformação plástica á frio.	46
Figura 26 – Elemento incremental de volume.....	46
Figura 27 – Caminho “abcd” .....	47
Figura 28 – Processo de fabricação dos aços elétricos GO .....	49
Figura 29 – Processo de fabricação dos aços elétricos GNO .....	50
Figura 30 – Processo de recozimento contínuo para aços elétricos. ....	50
Figura 31 – Diagrama de fases Ferro-Carbono na vizinhança do Eutetóide.....	51
Figura 32 – Efeito do tempo na decomposição da Fe <sub>3</sub> C (cementita) .....	52
Figura 33 – Fluxo magnético através da superfície de área “a” .....	55
Figura 34 – Quadro de Epstein/circuito.....	57
Figura 35 – Curvas de magnetização do ferro medidas com diferentes temperaturas, após o recozimento a 800°C.....	60
Figura 36 – Campos magnéticos altos, a indução decresce com aumento da temperatura .....	61
Figura 37 – Permeabilidade do Ferro, em várias temperaturas .....	61
Figura 38 – “Histerese” do Ferro próximo ao ponto Curie .....	62
Figura 39 – Variação das propriedades intrínsecas do Fe .....	63
Figura 40 – “Chapa elétrica sem corte” aço ABNT 35F 420M.....	65
Figura 41 – “Chapa elétrica com corte” aço ABNT 35F 420M. ....	65
Figura 42 – “Chapa elétrica com corte convencional e RCIM”, aço ABNT 35F 420M. ....	66
Figura 43 – “Chapa elétrica com corte à fio”, aço ABNT 35F 420M. ....	66
Figura 44 – Prensa Frasson 45 toneladas para corte da “chapa elétrica”, ABNT 35F 420M...	67
Figura 45 – Operação de corte da “chapa elétrica”, ABNT 35F 420M.....	67
Figura 46 – Ferramenta de corte da “chapa elétrica”, ABNT 35F 420M.....	67
Figura 47 – Detalhe do rotor/estator após o “corte convencional” da “chapa elétrica”, aço ABNT 35F 420M.....	68
Figura 48 – Detalhe do rotor/estator após o “corte a fio” da “chapa elétrica”, aço ABNT 35F 420M .....	68
Figura 49 – Detalhe do conjunto rotor/estator, após o “corte a fio” da “chapa elétrica”, ABNT 35F 420M .....	68

Figura 50 – Detalhe do rotor/estator montado, processo “corte a fio” x “processo corte convencional” “chapa elétrica”, ABNT 35F 420M.....	69
Figura 51 - Detalhe do rotor (direita)/estator(esquerda) montado, processo “corte a fio” x “processo corte convencional “ chapa elétrica”, ABNT 35F 420M.....	69
Figura 52 - Detalhe do rotor(direita)/estator(esquerda) montado, processo “corte a fio” x “processo corte convencional “ chapa elétrica”, ABNT 35F 420M.....	70
Figura 53 – detalhe do conjunto rotor(esquerda)/estator(direita) meV, “processo corte convencional “chapa elétrica”, ABNT 35F 420M.....	70
Figura 54 – Detalhe do conjunto esquerda rotor(direita)/estator(esquerda) meV, “processo corte a fio “chapa elétrica”, ABNT 35F 420M.....	71
Figura 55 – Chapas de FeSi no forno Heraeus® K 1250, 4,5 kW, para O RCIM .....	72
Figura 56 – Conjunto “processo corte convencional“, esquerda chapa elétrica sem tratamento térmico e direita chapa elétrica com tratamento térmico e indução de campo RCIM, chapa elétrica ABNT 35F 420M.....	72
Figura 57 – Conjunto rotor/estator meV, “processo de corte convencional com tratamento térmico e indução magnética”, chapa elétrica, ABNT 35F 420M.....	72
Figura 58 – Curva do tratamento térmico com indução magnética aplicada .....	74
Figura 59 – Enrolamento de indução magnética .....	75
Figura 60 – Bobina de indução magnética e fonte de alimentação .....	75
Figura 61 – Forno de recozimento com indução magnética (forno 4,5 kW/1250°C) .....	76
Figura 62 – Campo magnético x corrente elétrica.....	77
Figura 63 – Difração RX FeSi - posição O1 - S/ RCIM.....	78
Figura 64 – Difração RX FeSi – posição T2 - S/ RCIM .....	78
Figura 65 – Metalografias FeSi aço ABNT 35F 420M sem RCIM, feitas por microscopia ótica	79
Figura 66 – Metalografias FeSi Aço ABNT 35f 420M Com RCIM, feitas por microscopia ótica. ....	80
Figura 67 – Resistividade Das Chapas FeSi Aço ABNT 35f 420M .....	80
Figura 68 – Chapa FeSi aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M - s/ RCIM recozimento e indução de campo elétrico. Difração – Lab. Difração/Física-UFRGS.....	82
Figura 69 – Chapa FeSi aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M – Composição das fases s/ RCIM - recozimento e indução de campo elétrico. Difração – Lab. Difração/Física-UFRGS .....	82
Figura 70 – Chapa FeSi aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M c/ RCIM – Recozimento e indução de campo elétrico. Difração – Lab. Difração/Física-UFRGS.....	83

Figura 71 – Chapa FeSi aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M c/ Rcim - Recozimento e indução de campo elétrico. Difração – Lab. Difração/Física-UFRGS. ....	83
figura 72 – chapa fesi aço Abnt Nm71-2000/ 35F 420M c/ Rcim - recozimento e indução de campo elétrico (reorientação magnética). Difração – Lab. Difração/Física-UFRGS.....	84
Figura 73 – Chapa FeSi aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M – Composição das fases c/ RCIM - Recozimento e indução de campo elétrico (reorientação magnética). Difração – Lab. Difração/Física-UFRGS. ....	84
Figura 74 – Chapas de FeSi aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas a saturação magnética.....	85
Figura 75 – Chapas aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética (MEV/EBSD).....	87
Figura 76 – Chapas padrão P1 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	88
Figura 77 – Histerese das chapas padrão P1 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética.....	88
Figura 78 – Chapas padrão P2 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	89
Figura 79 – Histerese das chapas padrão P2 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética.....	89
Figura 80 – Chapas padrão P3 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	90
Figura 81 – Histerese das chapas padrão P3 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética.....	90
Figura 82 – Chapas padrão P4 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	91
Figura 83 – Histerese das chapas padrão P4 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética.....	91
Figura 84 – Chapas padrão P5 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	92
Figura 85 – Histerese das chapas padrão P5 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética.....	92
Figura 86 – Chapas padrão P6 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	93

Figura 87 – Histerese das chapas padrão P6 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética.....	93
Figura 88 – Chapas corte a fio 1 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	94
Figura 89 – Histerese das chapas corte a fio 1 aço ABnt NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética.....	94
Figura 90 – Chapas corte a fio 2 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas a saturação magnética.....	95
Figura 91 – Histerese das chapas corte a fio 2 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética .....	95
Figura 92 – Chapas corte a fio 3 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas a saturação magnética.....	96
Figura 93 – Histerese das chapas corte a fio 3 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética .....	96
Figura 94 – Chapas corte a fio 4 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas a saturação magnética.....	97
Figura 95 – Histerese das chapas corte a fio 4 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética .....	97
Figura 96 – Chapas corte a fio 5 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas a saturação magnética.....	98
Figura 97 – Histerese das chapas corte a fio 5 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética.....	98
Figura 98 – Chapas corte a fio 6 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas a saturação magnética.....	99
Figura 99 – Histerese das chapas corte a fio 6 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética.....	99
Figura 100 – Chapas aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	100
Figura 101 – Chapas corte convencional 1 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	101
Figura 102 – Histerese das chapas corte convencional 1 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética .....	101
Figura 103 – Chapas corte convencional 2 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	102

Figura 104 – Histerese das chapas corte convencional 2 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética .....	102
Figura 105 – Chapas corte convencional 3 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	103
Figura 106 – Histerese das chapas corte convencional 3 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética .....	103
Figura 107 – Chapas corte convencional 4 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	104
Figura 108 – Histerese das chapas corte convencional 4 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética .....	104
Figura 109 – Chapas corte convencional 5 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	105
Figura 110 – Histerese das chapas corte convencional 5 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética .....	105
Figura 111 – Chapas corte convencional 6 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética.....	106
Figura 112 – Histerese das chapas corte convencional 6 aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à saturação magnética.....	106
Figura 113 – Chapas padrão “P”- corte a fio “CF” - corte convencional “CC” aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na bancada submetidas à saturação magnética .....	107
Figura 114 – Histerese das chapas padrão “P”- corte a fio “CF” - corte convencional “CC” aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - submetida à saturação magnética.....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química percentual de aços elétricos. ....	30
Tabela 2 – Linha típica de vácuo para fornos para alta temperatura.....	54
Tabela 3 – Composição química aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M .....	77
Tabela 4 – Ensaio de resistividade .....	81

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC – Alternate Current

ASTM – American Society for Testing Materials

B – Densidade de Fluxo Magnético

$B_n$  – Densidade de Fluxo na Fronteira;

$B_r$  – Indução magnética de remanência

CCC – Cúbico de corpo centrado

CFC – Cúbico de face centrada

CGS – Sistema (Centímetro-Grama-Segundo)

DL – Direção de laminação

DN – Direção normal

DT – Direção transversal

D – Diâmetro externo do anel

EBSD – Electron Backscattering Diffraction (Difração de Elétrons Retroespalhados)

E.R.s/RCIM PLP – Ensaio de Resistividade sem RCIM (Padrão Longitudinal Processadas)

E.R.s/RCIM PTP – Ensaio de Resistividade sem RCIM (Padrão Transversal Processadas)

E.R.c/RCIM LC – Ensaio de Resistividade com RCIM (Convencional Longitudinal)

E.R.c/RCIM TC – Ensaio de Resistividade com RCIM (Convencional Transversal)

FEMM – Método de Elementos Finitos Aplicado ao Magnetismo

GAP – Espaço entre ímã e a peça polar

GO – Grão Orientado

GNO – Grão Não Orientado

LAM – Laboratório de Magnetismo

LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física

LACAR – Laboratório de Caracterização de Materiais

LdTM – Laboratório de transformação Mecânica

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MET – Microscópio Eletrônico de Transmissão

N – Número de voltas do enrolamento

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

RCIM - Recozimento Conjugado com Indução Magnética

SI – Sistema Internacional de Medidas

TG – Tamanho de Grão

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

% – Percentagem (ou percentual)

(hkl) – Índice de um plano cristalográfico específico

[uvw] – Índice de Miller de uma direção cristalográfica específica

{hkl} – Índice de uma família de planos cristalográficos

{hkl}<uvw> – Componentes de textura

<uvw> – Índice de Miller de uma família de direções cristalográficas

Fe – Ferro alfa (ferrita) – fase sólida do metal ferro com estrutura cristalina CCC

Fe – Ferro gama (austenita) – fase sólida do metal ferro com estrutura CFC

Al – Alumínio

Mn – Manganês

S – Enxofre

MnS – Sulfeto de Manganês

Oe – Oersted

P<sub>t</sub> – Perdas totais

P<sub>h</sub> – Perdas histerética

P<sub>p</sub> – Perda parasítica

P<sub>a</sub> – Perda anômala

T – Tesla

T<sub>c</sub> – Temperatura de Curie

ρ – Resistividade elétrica

f – Frequência

γ – austenita

α – ferrita

μ – permeabilidade

ρ – densidade

H – Campo magnético aplicado no material

μ<sub>0</sub> – Permeabilidade magnética absoluta no vácuo

B<sub>r</sub> – Indução magnética de remanência

J<sub>s</sub> – Polarização Magnética de Saturação

Hz – Unidade de frequência

W – Unidade de potência

Kg – Unidade de massa

nm – nanômetro

$\mu\text{m}$  – micrometro

## RESUMO

O trabalho aborda o desenvolvimento e implantação de um processo de recozimento conjugado com campo magnético induzido. Para este trabalho foi escolhido como material o FeSi, ABNT NM71-2000/ 35F 420M com GNO (Grão-Não-Orientado) devido ao baixo custo de obtenção das peças e também por ser um material de fácil aquisição no mercado. O processo tem como benefício minimizar as perdas magnéticas produzidas pelo corte convencional na borda das chapas elétricas. Para realizar o processo o sistema é composto de um forno, enrolamento de indução e fonte de alimentação. Os parâmetros utilizados no tratamento térmico situam-se na faixa de temperatura de aquecimento até 910°C e uma indução magnética mínima na faixa de 80 até aproximadamente 1,5 T. Para melhorar as propriedades magnéticas de forma contundente na região deformada buscou-se através do recozimento conjugado com campo induzido um alinhamento dos domínios, ou seja, uma ordenação dos “spins” que juntamente com a elevação de temperatura tenderam a ter um mesmo sentido, facilitando de maneira significativa à passagem do fluxo magnético, propriedade importante para o desempenho dos núcleos das máquinas elétricas. Para avaliar o desempenho do processo, chapas do mesmo material foram cortadas por eletroerosão a fio, onde o perfil do corte permitiu um fluxo magnético uniforme e constante. O efeito do processo de recozimento com indução de campo magnético foi medido conforme determina a norma, ou seja, utilizando o “Quadro de Epstein” para chapas elétricas. Os resultados foram correlacionados com os dados obtidos a partir do uso do ferro-silício, ABNT NM71-2000/35F 420M, com as mesmas condições de uso e testes de laboratório. 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 nas propriedades magnéticas apresentadas. Este trabalho permite afirmar que é possível desenvolver e melhorar as propriedades magnéticas em ferro silício com alto desempenho e também sugerir que outras aplicações, onde seja necessário aumento do desempenho magnético, este processo possa ser aplicado.

**Palavras-chave:** Indução de Campo. Propriedades Magnéticas. Recozimento. Chapas de Ferro Silício.

## ABSTRACT

This work presents and discusses the development and application of an annealing process together with the induced magnetic field. For this study development, the chosen material is the iron silicon, ABNT NM71-2000/ 35F 420M, due to the low trading costs and eases of purchase on the market. The process has the benefit of minimizing magnetic losses produced by conventional cutting the edge of the hot plates. To carry out the process system consists of a furnace, induction coil and power supply. The parameters used in the heat treatment are in the range of heating temperature to 910 ° C and a minimum magnetic induction in the range of about 80 to 1.5 T. The challenge of this work was in the fact that structure changes in the silicon iron, allied to inclusions of non-magnetizable materials, modify for worse the performance of magnetic cores. To obtain a structure that the magnetic field could permeate, the silicon 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 cores of electrical machines. 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 FeSi, ABNT NM71-2000/35F 420M, with the same conditions of use and laboratory tests. 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 cores electrical machines during the performance tests. 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 silicon iron. This work suggests that it is possible to develop and improve the magnetic properties of iron and silicon with high performance also suggest that other applications where necessary increase in magnetic performance, this process can be applied.

**Keywords:** Induction Field. Magnetics Properties. Annealing. Silicon Iron Sheets.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	20
1.1 JUSTIFICATIVA .....	20
1.2 OBJETIVOS .....	20
1.3 FLUXOGRAMA DO PROCESSO .....	24
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	25
2.1 PROCESSOS E APLICAÇÕES DOS AÇOS ELÉTRICOS .....	25
2.2 O RECOZIMENTO CONJUGADO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA (RCIM) COMO FERRAMENTA PARA AUMENTAR A PERMEABILIDADE E A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DOS MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS. ....	27
2.3 PRINCÍPIOS BÁSICOS DO MAGNETISMO.....	33
2.3.1 A Teoria dos Domínios e Perdas Magnéticas.....	38
2.3.2 AS Relações de Fronteira no Campo Magnético.....	46
2.4 RECOZIMENTO.....	48
2.4.1 Recozimento de Ligas Ferrosas .....	51
2.4.2 Normalização.....	52
2.4.3 Recozimento Pleno .....	52
2.4.4 Recozimento Subcritico.....	53
2.5 EQUIPAMENTOS BÁSICOS .....	53
2.6 PRINCIPAIS EFEITOS DO VÁCUO NO TRATAMENTO DE MATERIAIS .....	54
2.6.1 PRESSÃO.....	54
2.6.2 ÓXIDOS .....	54
2.7 FORNO PARA RECOZIMENTO .....	55
2.8 FLUXO MAGNÉTICO .....	55
2.8.1 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO .....	56
2.8.2 MEDIÇÃO DE HISTERESE .....	57
2.8.3 DIMENSIONAMENTO DO QUADRO DE TESTE .....	58
2.9 TEMPERATURAS E O PONTO CURIE.....	59
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	64
3.1 MATERIAIS .....	64

3.3 PROCEDIMENTOS PARA O PROCESSO DE RECOZIMENTO CONJUGADO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA (RCIM), UTILIZANDO CHAPAS DE FERRO SILÍCIO, ABNT NM71-2000/ 35F 420M GNO (GRÃO NÃO ORIENTADO) ESPESSURA 0,35MM.....	73
3.4 CARACTERÍSTICAS DO ENROLAMENTO DE INDUÇÃO MAGNÉTICA.....	74
3.5 CARACTERÍSTICAS DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO STT01/ENROLAMENTO DE INDUÇÃO.....	76
3.6 Composições Químicas, Propriedades Mecânica e Elétrica.....	77
3.6.1 A Composição Química do Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M .....	77
3.6.2 AS Propriedades Mecânicas do Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420MN .....	78
3.6.3 AS Propriedades Magnéticas do Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420MN.....	79
3.7 METALOGRAFIA.....	79
3.8 RESISITIVIDADE.....	80
3.9 DIFRAÇÃO.....	81
3.10 BANCADA DE ENSAIO “QUADRO DE TESTE EPSTEIN”. .....	85
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>86</b>
4.1 ANÁLISES E ENSAIOS COMPARATIVOS .....	86
4.2 CARACTERIZAÇÕES DAS PEÇAS QUE SOFRERAM O PROCESSO DE RECOZIMENTO CONJUGADO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA (RCIM).....	108
4.3 CORRELAÇÕES ENTRE PERMEABILIDADE E CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICO-METALÚRGICAS.....	108
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>110</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....</b>	<b>112</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>113</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

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 segurança, a qualidade de seus produtos e serviços com menor investimento em material, redução do consumo de energia, qualificação dos colaboradores e a redução de custos com processos de produção de última geração.

Nas últimas décadas, com a globalização, ocorreu um crescimento sem precedentes na área de tecnologia, muito especificamente no que diz respeito a novos processos de produção e materiais. O setor elétrico, foco deste trabalho, não deixou de ser influenciado de maneira preponderante em função das questões relativas ao consumo e geração de energias limpas e reaproveitáveis.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi propor um processo de tratamento térmico conjugado com indução de campo elétrico, ou seja, buscando ganhos importantes com a redução das perdas por histerese do material em uso.

Com esta compreensão, trabalho que está sendo realizado consiste na execução do alinhamento dos domínios magnéticos do Ferro Silício Grão-Não-Orientado (GNO) para uso em núcleos de motores, núcleos de geradores, reatores para iluminação, medidores de energia e transformadores, onde as chapas são manufaturados utilizando-se o FeSi com até 3% de silício e espessura de 0,35mm. O Ferro Silício entende-se como sendo ligas ferrosas com baixo teor de carbono, menos de 1%, e também contendo outros elementos de liga como silício, manganês, níquel e outros, com valores ainda menores (BECKLEY, 2002; BOZORTH, 1993; CULLITY, 1972).

As propriedades mecânicas, bem como as magnéticas, são sensíveis aos teores de carbono e o tratamento térmico empregado. O material apresenta uma estrutura cristalina

típica caracterizada por uma matriz metálica ferrítica podendo sofrer tratamentos térmicos a altas temperaturas.

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 à existência de domínios magnéticos com orientações alternadas se compensado 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 se obtém 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 magneto indutivos como o da análise harmônica de correntes parasitas.

Existem requisitos básicos que um equipamento deve possuir para ser possível a determinação, através de um solenoide, 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 micromotor irá ter ao longo de sua vida útil.

Uma vez que este trabalho está sendo desenvolvido para um mesmo tipo de Ferro Silício, de baixa variação composicional e que passa por um mesmo processo de fundição, diminuem os fatores que influenciam nas propriedades magnéticas do material. Os fatores que tem influência neste estudo são, principalmente, o efeito gerado pelo corte da chapa na sua borda, causando um desalinhamento do fluxo magnético, presença de carbono e o teor de elementos não desejáveis na sua microestrutura.

A fim de verificar a aplicabilidade do processo, buscou-se relacionar os dados de propriedades magnéticas, obtidos em ensaios de saturação com o “Quadro de Epstein” no LdTM – Laboratório de Transformação Mecânica e no LAM – Laboratório de Magnetismo da UFRGS, cujo equipamento foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa em magnetismo.

Além disso, são analisadas as variações das permeabilidades, frequências e das forças magnéticas, bem como suas relações com o desempenho eletromagnético das chapas a serem utilizadas para os micromotores. As características do FeSi obtidas a partir de análises metalográficas e do conteúdo de inclusões nas amostras, também auxiliaram a identificar quais os conjuntos de chapas, de onde foram extraídos pequenos “rotores e estatores” que apresentaram melhor desempenho para futura construção destes equipamentos.

Paralelamente, foram realizados estudos observando-se a forma das bordas do núcleo magnético, rotor/estator, a fim de verificar a influência deste fator para o aumento do fluxo magnético e conseqüentemente o recozimento e indução magnética apropriada a esta situação.

A Norma ASTM A343/A343M - 03 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2008a), Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic Properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter-Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame, determinam 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 um enrolamento 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.

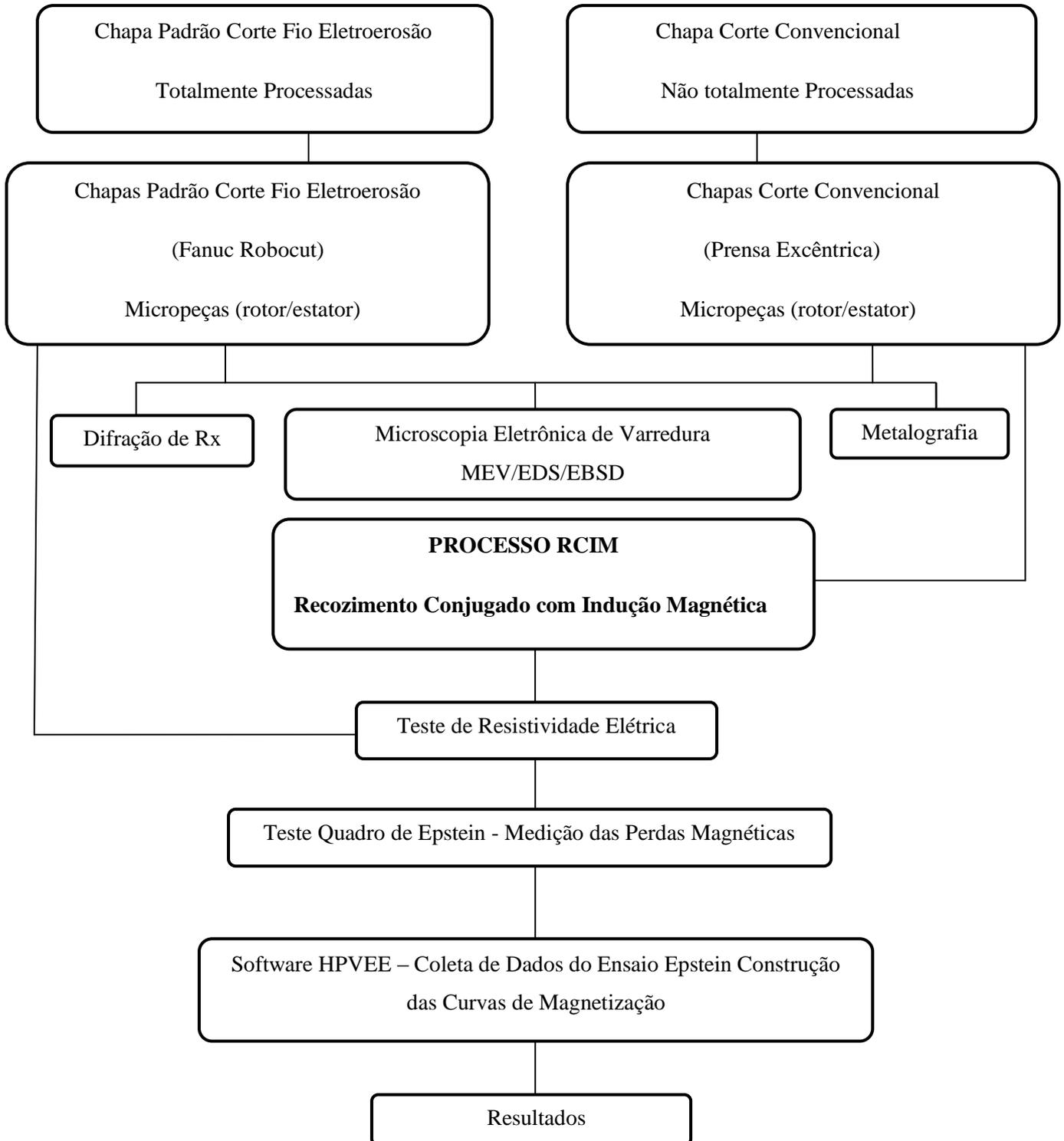
No capítulo 3, é feita a apresentação do material estudado, os ensaios e procedimentos que estão sendo utilizados para obtenção de parâmetros que possibilitem a análise dos resultados.

No capítulo 4, são apresentados os resultados preliminares das análises e o desenvolvimento do protótipo de um micromotor com núcleo de chapas com o novo processo de indução para alinhamento do campo. Também é realizada a discussão preliminar sobre os resultados obtidos e a escolha pela melhor solução.

O capítulo 5 apresenta as conclusões preliminares obtidas a partir dos resultados já apresentados desta pesquisa.

No capítulo 6, são apresentadas sugestões para futuros trabalhos.

## 1.3 FLUXOGRAMA DO PROCESSO



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROCESSOS E APLICAÇÕES DOS AÇOS ELÉTRICOS

A velocidade com que a tecnologia e os recursos científicos chegam até nós é realmente impressionante. Estes avanços pressupõem uma incessante adaptabilidade no desenvolvimento da inovação e na lógica da interação dos processos. Com este objetivo a utilização do processo de “Recozimento Conjugado com Indução Magnética”, para melhorar o desempenho do material, e o “Quadro de Epstein”, como uma ferramenta para levantamento e identificação dos parâmetros relacionados às perdas magnéticas, mostrado na figura 1, busca-se mostrar as melhorias geradas no desempenho do material e conseqüentemente a constatação dos efeitos positivos gerados pelo do novo processo. O Silício tem por característica melhorar a permeabilidade magnética, diminuir as perdas por histerese, diminuir as perdas por correntes parasitas e proporcionar uma redução no envelhecimento do material com o tempo. Também em quantidades maiores o Silício diminui o valor de saturação, ou seja, limita seu desempenho magnético, o que deve ser cuidadosamente tratado. Observando-se a questão relativa ao processo de fabricação se permite dizer que o Silício não colabora durante a laminação, por diminuir a ductilidade, mas o fato de melhorar consideravelmente o desempenho eletromagnético sua utilização de forma adequada é compensatória. Os aços elétricos são ligas que apresentam em sua composição química ferro-silício com teores de silício na faixa de 1,5% até aproximadamente 5,0% e cujo desempenho magnético apresenta baixa perda, ou seja, tem uma excelente polarização e também por esta razão são chamados de “aços magnéticos macios” (BOZORTH, 1993). De acordo com a teoria magnética, as perdas no núcleo são geradas pela potência despendida em forma de calor dentro do equipamento elétrico, sejam por histerese, correntes parasitas ou por problemas de falhas no isolamento entre as lâminas. Nos processos de tratamento térmico se consegue reduzir significativamente os teores de Carbono, para valores bem próximos ou menores que 0,003%, característica específicas dos aços de aplicação elétrica. Dentre esses materiais, destacam-se os Aços de Grão-Não-Orientado (GNO) aplicados em geradores motores elétricos, transformadores de pequena dimensão e reatores de iluminação. Também os Aços de Grão-Orientado (GO) aparecem em aplicações importantes como em transformadores de grande porte, reatores de potência, turbogeradores e hidrogenadores. Os Aços de Grão-Não-Orientado são idealmente isotrópicos, sendo utilizados em máquinas rotativas, as quais requerem um maior grau de

isotropia no plano da chapa, e em pequenos transformadores (IPT, 2001). A grande vantagem do uso destes materiais está ligada ao fato de poder-se dimensionar equipamentos com porte econômico, ou seja, ocupam espaços menores dentro dos projetos de engenharia.

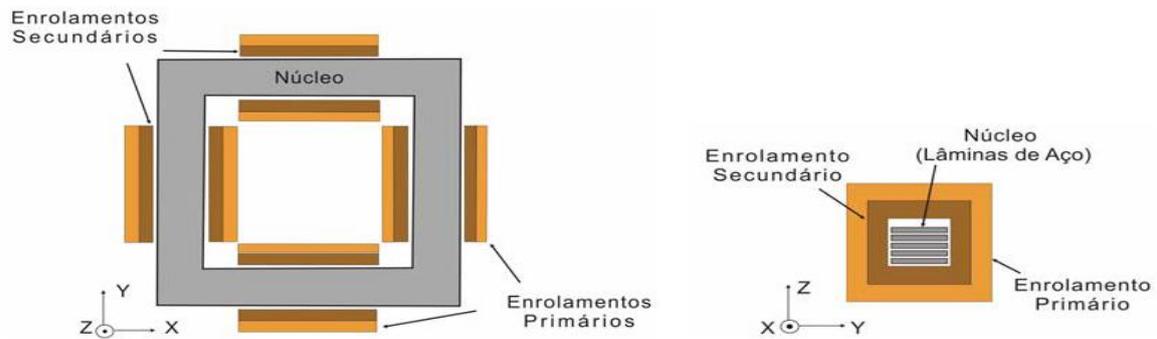


Figura 1 – Quadro de Epstein 50, 60 Hz.  
Fonte: Silva Junior (2007).

Conforme mostrado na figura 2, e de acordo com a ASTM A343/A343M – 03/2008 definiu-se a montagem das chapas a serem avaliadas e também o método para identificar o ganho da eficiência desejada para os núcleos dos equipamentos elétricos. O material usual para esta aplicação é composto basicamente por Ferro e Silício com teores que giram ao redor 2% a 4%. Quando tratamos de motores e geradores estes percentuais ficam entre 2% a 3% e nos motores de alto rendimento, transformadores de potência os valores ficam no intervalo de 3% a 5% (AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS, 2008a).

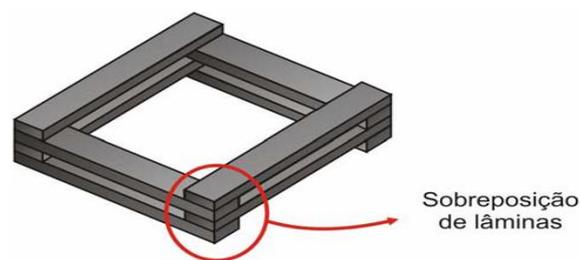


Figura 2 – Esquematização do “Quadro de Epstein”.  
Fonte: Silva Júnior (2007).

## 2.2 O RECOZIMENTO CONJUGADO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA (RCIM) COMO FERRAMENTA PARA AUMENTAR A PERMEABILIDADE E A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA 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 (aços chamados de grão-orientado – GO), 4 milhões são usados em motores elétricos (aços chamados de grão-não-orientado – GNO) 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 vem sendo pela busca de materiais com melhores características magnéticas, pois com a redução das dimensões e a consequente diminuição das perdas por Histerese e Foucault, que impactam diretamente no desempenho destes equipamentos, o rendimento destas máquinas aumentariam em até 36% (LANDGRAF, 2001).

A recristalização gerada pelo recozimento de um material quando este está encruado faz aparecerem as discordâncias e conseqüentemente o aumento da energia livre do material. Outra conseqüência é a formação de grãos com tamanho pequeno que vai reduzindo a medida que a energia livre vai se dissipando (FALLEIROS; CAMPOS, 2001).

O fator econômico é outro principal motivo da utilização destes materiais e processos na indústria, uma vez que 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 magnético tem como diferença básica sobre o convencional, apenas pelo campo que se aplica no material, a fim de realizar as transformações na textura do aço elétrico. Este tipo de tratamento térmico, Recozimento Conjugado com Indução Magnética (RCIM), permite ainda, numa fase mais avançada, melhorar além da permeabilidade, 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, de grande monta, vinculados à permeabilidade.

A temperatura e o percentual de silício tem peso fundamental na microestrutura do aço elétrico, uma vez que, aumentos de até 20%, são constatados em comparação com o processo convencional (CHEN, 1986). Tentativas foram realizadas em 1913, por Pender e Jones, na busca das texturas favoráveis [110] (100) (CHIKAZUMI; GRAHAM, 1969).

No início da década de 1960, Skorski (1967), utilizou campo magnético acima da temperatura Curie, com Ferro “Armco” e aços de baixo teor de carbono, obtendo resultados no que se refere ao tamanho de grão, melhores que os obtidos com o recozimento convencional. Em 1981, Martikainen e Lindroos aplicaram campos magnéticos na ordem de 1,5 Tesla nas temperaturas de 700 °C e 725 °C, e Masahashi, Matsuo e Watanabe (1998), verificaram uma grande influência do campo magnético quando aumentado na ordem de 10 vezes em aços com teores próximos a 3,5%, pois o alinhamento de grãos na direção (001) foi constatado.

Entre os anos de 2002 à 2010, C. Bacaltchuk, observou que aplicação de campos magnéticos de alta intensidade alteram o processo de recristalização e nucleação do grão, provocando um aumento das texturas favoráveis, ou seja, com valores de maiores misorientação causando um melhor desempenho dos aços elétricos (BACALTCHUK, 2004; BACALTCHUK; BRANCO; GARMESTANI, 2005, 2008, BACALTCHUK et al., 2008, 2010).

Aços silicosos de grão não orientado – GNO – são utilizados numa grande gama de aplicações onde alta permeabilidade ou baixa perda magnética 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 desenvolvida 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 FeSi.

Atuando na temperatura de acabamento do processo de laminação à 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 a 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 se pode localizar e observar na figura 3, 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).

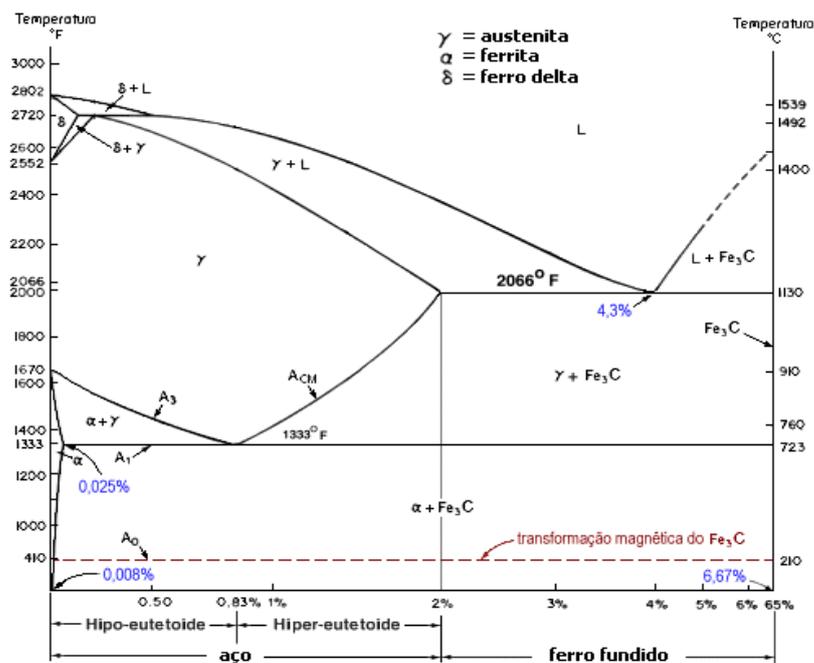


Figura 3 – Diagrama de Fases para o Sistema Ferro-Carbono  
 Fonte: ASM (1991, v. 4).

A aplicação dos aços elétricos, no caso, GO e GNO, baseiam-se no princípio de magnetização na direção das arestas do cubo da célula unitária, mais facilmente obtida do que na diagonal das faces. Estes aços apresentam em sua liga composição de ferro-silício, sendo que os teores representativos estão descritos na tabela 1 (BOZORTH, 1993).



O Aço silício GNO possui comportamento magnético mais isotrópico do que o GO, o que significa propriedades magnéticas quase uniformes em todas as direções do material. Por isso esta categoria de aços elétricos é usada em máquinas rotativas aonde a direção do fluxo magnético muda constantemente. O aço elétrico de GNO tem, em geral, grãos de tamanho entre 20 e 200  $\mu\text{m}$  (DORNER et al., 2009).

O processo Aço Silício grão orientado GO, foi obtido e patenteado por Norman Goss, em 1934 e constituiu-se por um processo de laminação e etapas de recozimento. O aço elétrico GO tem grãos de tamanhos bastante grandes, variando de milímetros até alguns centímetros e também se apresentam com uma forte anisotropia no ferro-silício. Observando-se as curvas de magnetização, nota-se que nas direções [001], conforme figura 5, as principais direções de magnetização, que são as arestas do cubo, ali existem uma maior facilidade de magnetização e também as menores perdas e maior permeabilidade. A permeabilidade também está fortemente vinculada com o teor de carbono e outros elementos que venham estarem presentes na liga.

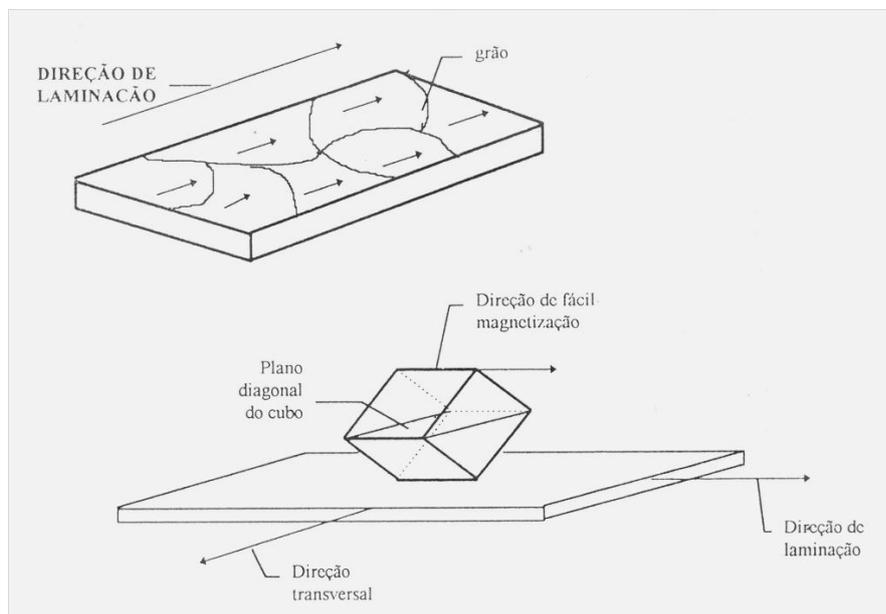


Figura 5 – Corte da chapa GO  
Fonte: Santos (2005).

A estrutura do aço silício GO apresenta uma maior facilidade de magnetização quando efetuada paralela à direção de laminação, ou seja, quando o plano diagonal do cubo (110) está paralelo ao plano da chapa, conforme figura 6 – Estrutura cristalina do ferro.

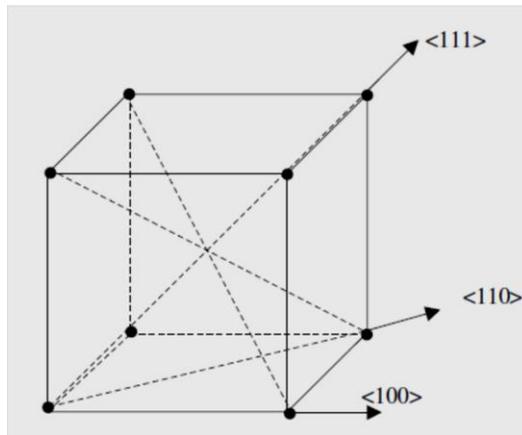


Figura 6 – Direções de magnetização do ferro  
Fonte: Bozorth (1993).

A textura Goss é compreendida como a combinação do plano (110), que é o plano diagonal do cubo, com a direção de laminação [001] conforme figura 7 - Estrutura cúbica do ferro.

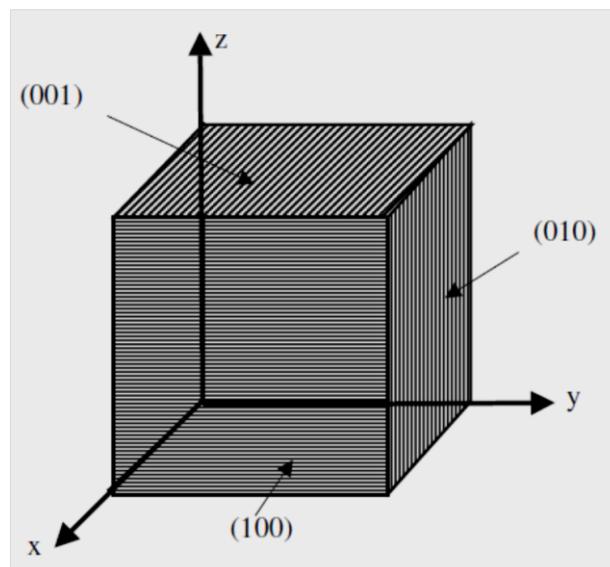


Figura 7 – Estrutura cúbica do ferro  
Fonte: Bozorth (1986).

Observando-se as curvas de magnetização conforme figura 8, pode-se avaliar que a saturação na direção  $\langle 100 \rangle$  ocorre com uma intensidade de campo “H” reduzida, enquanto as direções  $\langle 110 \rangle$  e  $\langle 111 \rangle$  necessitam uma maior intensidade de campo “J” para a saturação. Podemos concluir, então, que a direção exerce um papel muito importante para um aumento da magnetização.

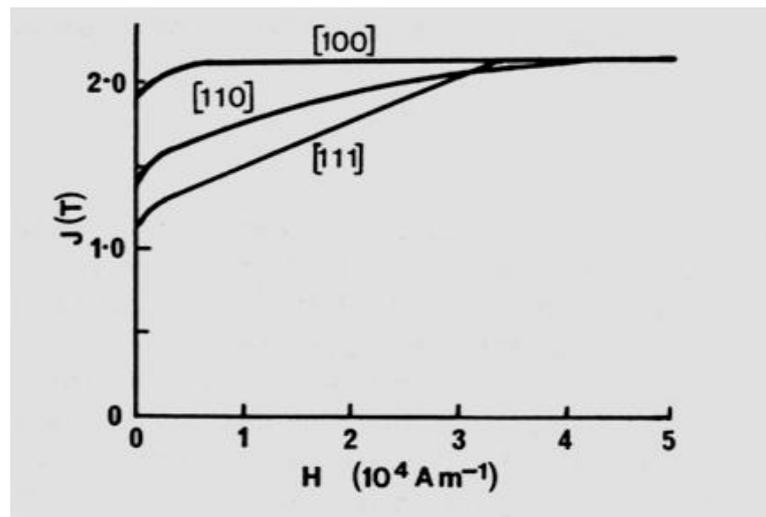


Figura 8 – Curva de magnetização para três direções  
Fonte: McCurrie (1994).

Além das questões ligadas a anisotropia do próprio cristal, temos a anisotropia de esforços mecânicos ou magneto elásticas que deformam a estrutura cristalina da matéria causando um prejuízo significativo no fluxo magnético do material. Para tal problema os tratamentos térmicos são aconselhados para alívio das tensões causadas pela deformação naqueles locais.

### 2.3 PRINCÍPIOS BÁSICOS DO MAGNETISMO

As propriedades magnéticas dos aços e ligas sempre tiveram grande relevância nos estudos de engenharia. Hoje, ainda mais, com a necessidade de redução de consumo de energia se tornou ainda mais forte. Materiais como Ferro, Níquel, Cobalto e outras ligas tem a capacidade de adquirir momentos magnéticos bastante elevados como, Neodímio e o Samário ligado ao Cobalto. Estas características fazem destes elementos os principais materiais usados na construção de equipamentos elétricos e com isso a possibilidade de serem otimizadas, ou seja, diminuição das perdas, redução de tamanho, peso e assim se tornando cada vez mais eficientes. Além do silício, como elemento básico, existem mais elementos com esta propriedade, demonstrados na figura 9 (BOZORTH, 1993).

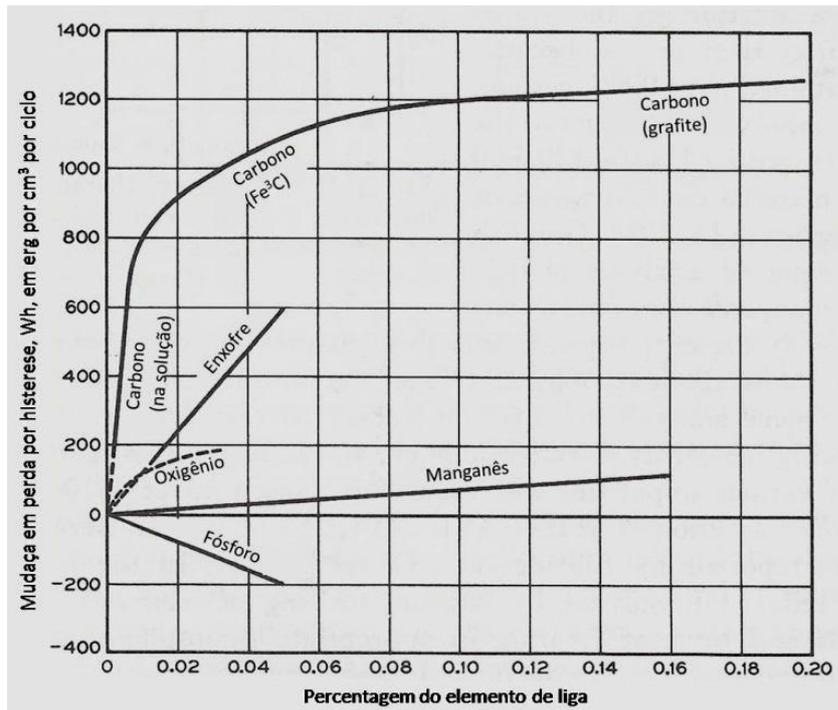


Figura 9 – Influência dos elementos de liga nas perdas por histerese  
Fonte: Bozorth (1993).

Esses materiais são chamados de ferromagnéticos, pois quando submetidos a um campo magnético orientam-se conforme sua direção tornando-se fortemente magnetizados. De outra forma materiais paramagnéticos se orientam paralelamente ao campo, mas de uma forma mais fraca. Como exemplo, podemos citar o Cromo, Manganês, Alumínio, Molibdênio, Titânio, terras raras, seus sais e óxidos. Depois se têm os materiais diamagnéticos, ou seja, aqueles que têm orientação normal ao campo aplicado e podemos citar o ouro, cobre, silício e também supercondutores. Já os materiais ferrimagnéticos, são aqueles que apresentam forte magnetização permanente, características dos ímãs. A figura 10 mostra o comportamento para materiais paramagnéticos (a), diamagnéticos (b) e ferromagnéticos (c).

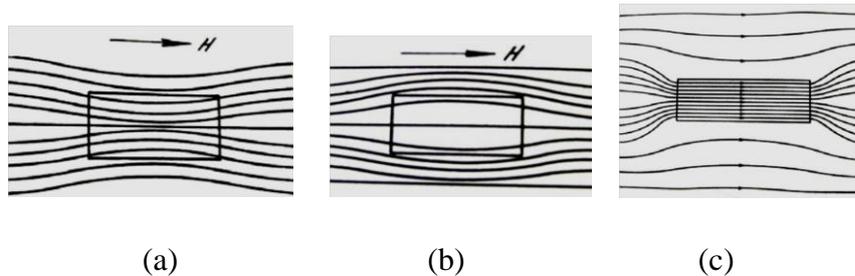


Figura 10 – Linhas de força para materiais: (a) paramagnéticos, (b) diamagnéticos e (c) ferromagnéticos  
Fonte: Chiaverini (1996).

O Recozimento Conjugado com Indução Magnética (RCIM) 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 um enrolamento, 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 das chapas elétricas que mesmo tendo sua “borda” alterada pelo processo de corte, forçará um direcionamento das linhas de fluxo magnético, melhorando significativamente seu rendimento. 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, conforme mostrado na figura 11.

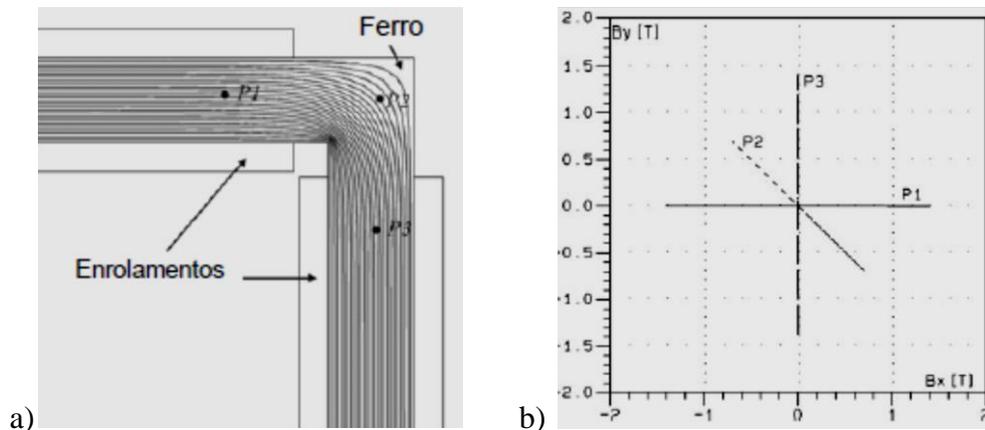


Figura 11 – Induções Magnéticas no Quadro de Epstein: a) linhas orientadas de fluxo magnético. b) induções nos três pontos indicados.

Fonte: Silva Júnior (2007).

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 12.

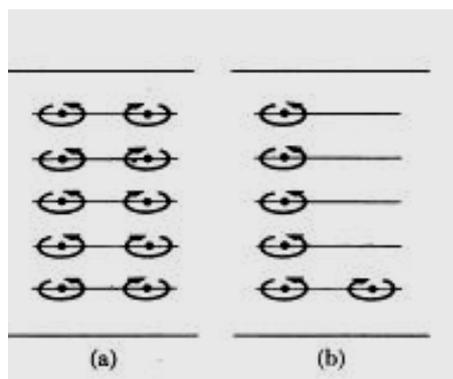


Figura 12 – Representação esquemática do Magnetismo Atômico: (a) Diamagnético (b) Magnético.  
Fonte: Landgraf (2001).

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 13.

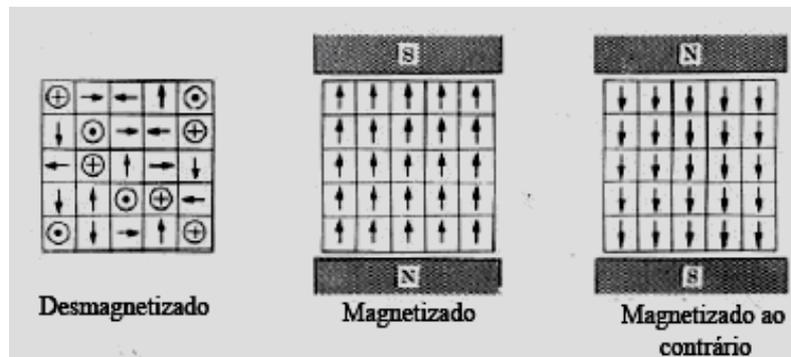


Figura 13 – Representação esquemática do Alinhamento de Domínios  
Fonte: Landgraf (2001).

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. Os domínios são separados por zonas de transição onde a direção de magnetização se afasta da orientação do próprio domínio, tendendo a seguir a orientação do domínio adjacente. As paredes de domínio, também chamadas de “Paredes de Bloch”, são definidas pelos ângulos entres os vetores de saturação, que são de  $180^\circ$  e de não- $180^\circ$  (BOHN, 2005; BOHN et al., 2004; CULLITY, 1972). A figura 14 ilustra esta situação, mostrando os domínios adjacentes separados pelas paredes de Bloch.

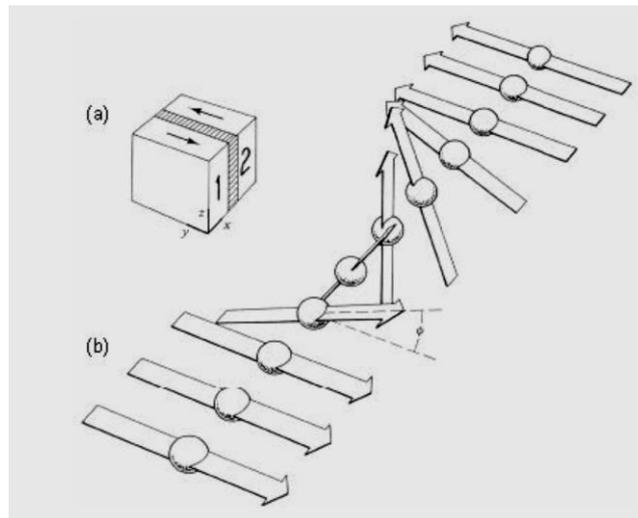


Figura 14 – Domínios magnéticos adjacentes: (a) separados por parede de Bloch de  $180^\circ$ , e (b) detalhe da parede de domínio.

Fonte: Bohn (2005).

### 2.3.1 A Teoria dos Domínios e Perdas Magnéticas.

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 15, 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.

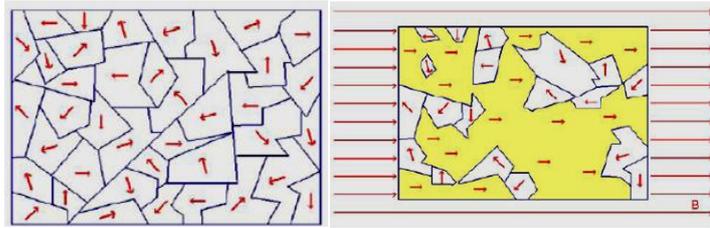


Figura 15 – Representação esquemática do Processo de Alinhamento Magnético do Material: a) domínios magnéticos desalinhados. b) se alinhando sob ação de campo magnético.  
Fonte: Soares (2008).

Na curva de magnetização, da figura 16, destacam-se pontos importantes com medições no “Quadro Epstein” com frequência de 1 Hz e também identificando as regiões de deslocamento e rotação dos domínios magnéticos.

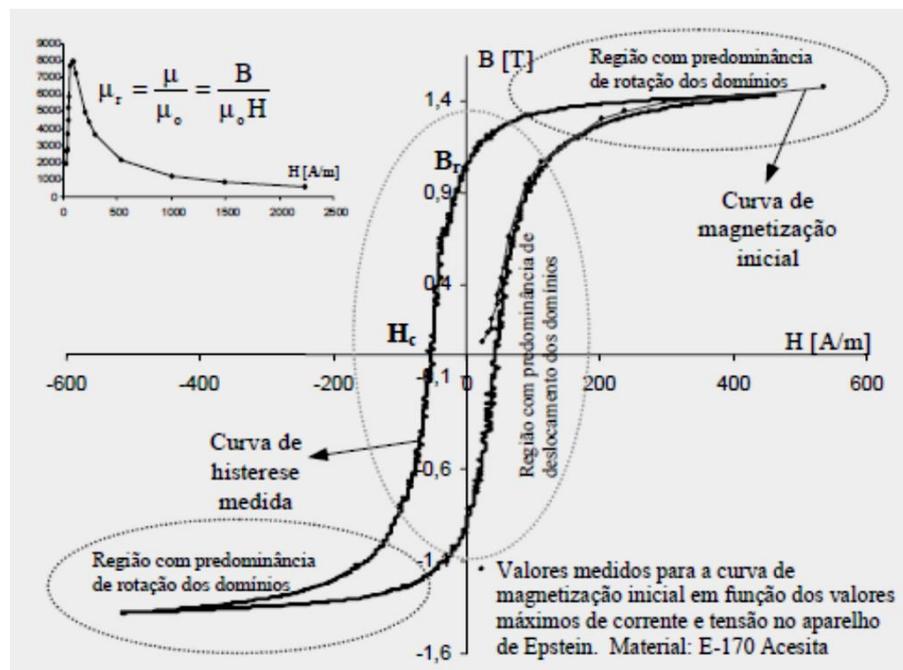


Figura 16 – Curva de Magnetização de Lâminas de Aço Silício com frequência de 1 Hz .  
Fonte: Batistela et al. (2002).

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 permanece 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, obtêm-se uma curva característica denominada ciclo de histerese, mostrada na figura 17.

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

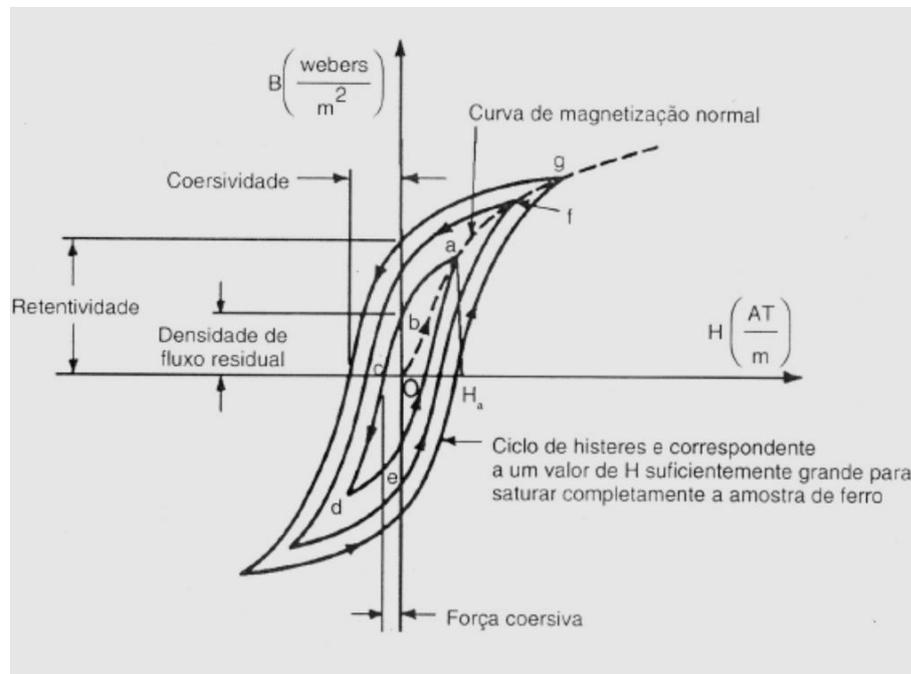


Figura 17 – Fenômeno dos ciclos de histerese magnética típicos com representação de  $B$ ,  $H$ .  
Fonte: Santos (2005).

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 largo (difícil magnetização), conforme figuras 18. 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. A permeabilidade cresce para ligas que apresentam o ciclo

B-H estreito, ou seja, o aumento da permeabilidade diminui a retentividade, a coercividade e o magnetismo remanescente (BOHN et al., 2004).

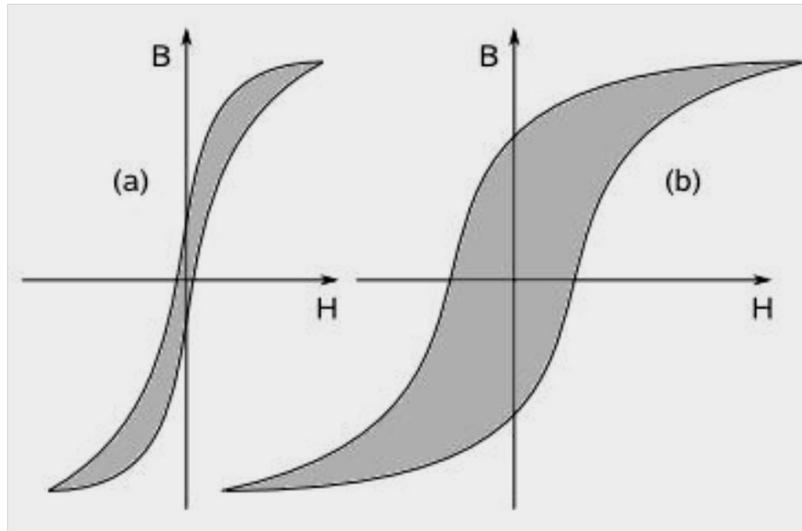


Figura 18 – Representação esquemática de ciclos de histerese para diferentes materiais, onde, no gráfico (a), as perdas magnéticas, representadas pela área interna (em cinza), são menores.  
Fonte: Soares (2008).

As perdas magnéticas conforme demonstradas pelas figuras 19 e 20, podem ser divididas em três parcelas: perdas por histerese, perdas por correntes de Foucault ou parasitas e perdas excedentes, também chamadas anômalas. A soma das perdas por correntes parasitas e excedentes definem as chamadas perdas dinâmicas, logo as perdas totais são as perdas por histerese mais as perdas dinâmicas. O componente relativo à histerese pode ser também dividido em perdas de baixa e alta indução (LANDGRAF; CAMPOS; LEICHT, 2008), que corresponde à área da curva de histerese quase estática. A parcela das correntes de Foucault ou parasitas está ligada a variação da indução no material. Já as perdas excedentes ou anômalas podem ser consideradas proporcionais às perdas magnéticas.

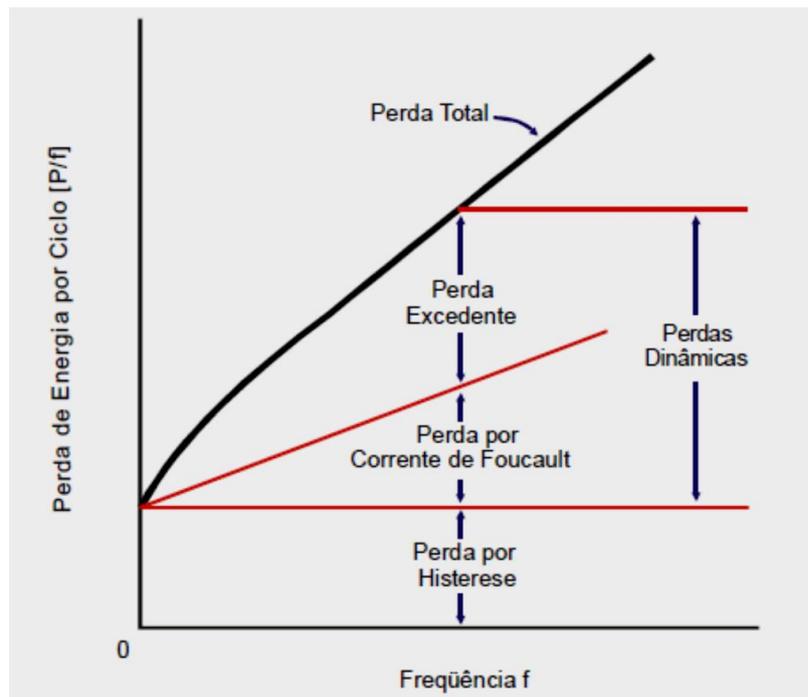


Figura 19 – Representação esquemática das perdas em função da frequência.  
Fonte: Silva Júnior (2007).

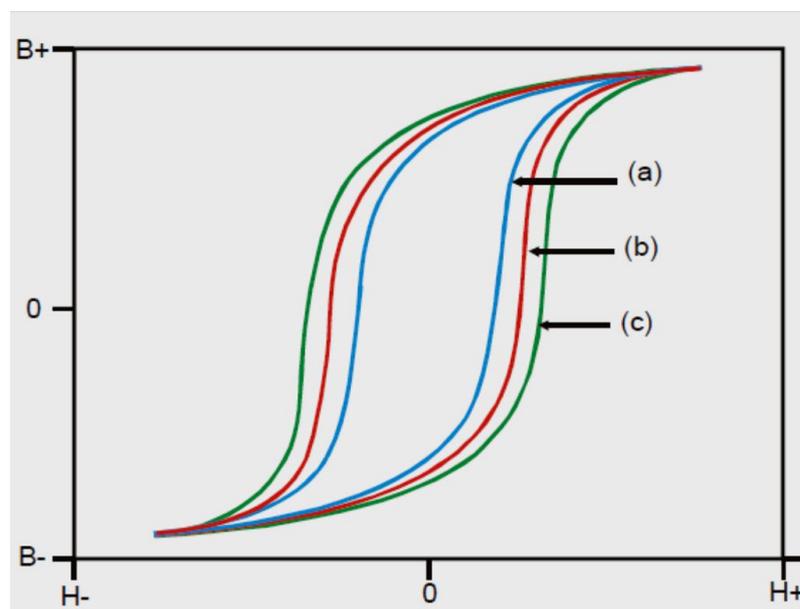


Figura 20 – Fenômeno da histerese magnética típicos com representação de B, H: a) Somente perdas por histerese; b) Perdas por histerese e correntes de Foucault; c) Perdas por histerese, correntes de Foucault e excedentes.

Fonte: Silva Júnior (2007).

Com relação á microestrutura temos cinco parâmetros extremamente importantes relacionados às propriedades magnéticas dos aços elétricos (LANDGRAF, 2001), são:

- a) composição química;
- b) distribuição/tamanho de precipitados;

- c) tamanho de grão;
- d) densidade de discordâncias;
- e) textura;

O que afeta e altera diretamente a resistividade elétrica é a composição química, sendo os elementos mais importantes o silício e o alumínio, pois além de serem estabilizadores da ferrita aumentam a resistividade do aço, diminuindo as perdas por correntes parasitas. O gráfico da figura 21 mostra o aumento da resistividade elétrica do ferro com a adição do silício. O gráfico ao lado, na mesma figura, demonstra que o aumento dos teores de silício dificultam o processo de transformação mecânica. Normalmente os aços com as menores perdas, disponíveis no mercado, são com silício na faixa de 3% e alumínio na faixa de 0,6%. O teor de carbono também não pode exceder a 0,003%, sob risco de precipitação de carbonetos aumentando assim as perdas histeréticas ao longo do tempo.

Conforme Cunha e Paolinelli (2003), foram realizados tratamentos térmicos de recozimento com chapas de GNO 3% de Si e obtiveram resultados que confirmam que a medida que mantemos maior tempo de encharque as perdas diminuem e o tamanho de grão cresce e a recristalização chega a 100% na faixa de 850 °C. Alguns autores mencionam temperaturas de encharque na faixa de 750 °C a 1150 °C para chapas elétricas com 2% de Si.

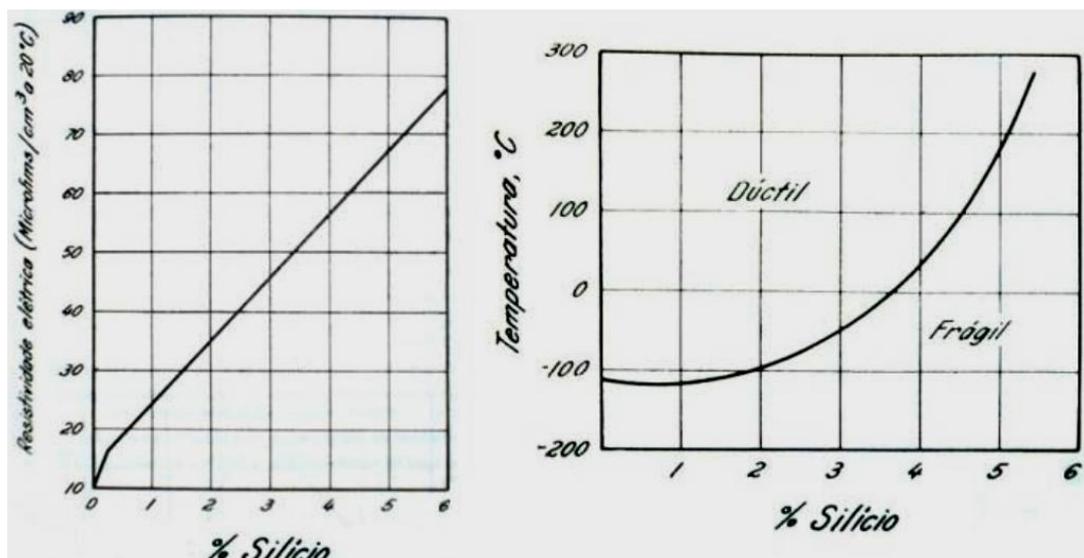


Figura 21 – Influência da adição de silício na resistividade elétrica (à esquerda) e nas propriedades mecânicas dos aços (à direita).

Fonte: Chiaverini (1996)

Outro fator de importância não menor está ligado ao tamanho de grão do grão, ou seja, quanto maior for o tamanho do grão menor serão as perdas. Isso vale dizer que, o campo coercitivo, largura da curva de histerese, é inversamente proporcional ao tamanho do grão. Para fins práticos, quanto mais refinados forem os grãos da microestrutura mais difícil será o movimento dos domínios magnéticos. É importante colocar que o tamanho de grão ideal depende da frequência de trabalho e da resistividade do material, que deve diminuir com o aumento da frequência. O gráfico na figura 22 demonstra a influência da área do contorno de grão nas perdas magnéticas. É fato dizer que as deformações plásticas afetam de forma definitiva as perdas totais, principalmente as ligadas as perdas histeréticas (LANDGRAF; TAKANOHASHI, R.; CAMPO, 2001).

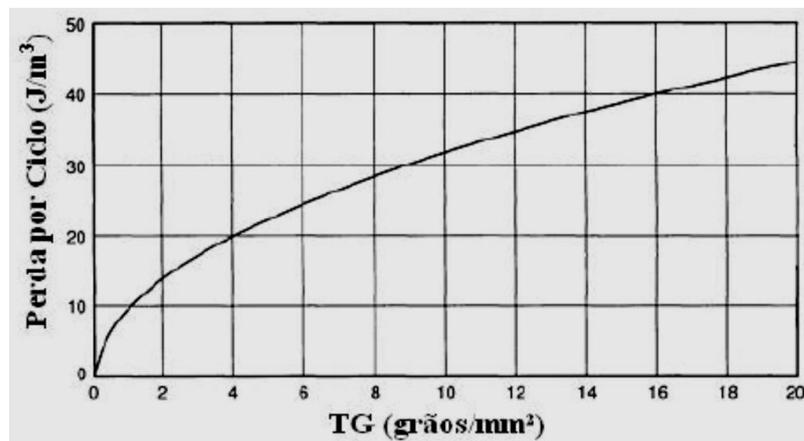


Figura 22 – Influência da área do contorno de grão nas perdas.  
Fonte: Adaptada de Metals Handbook (1990, v. 2).

A figura 23, mostra o efeito do tamanho de grão nas perdas magnéticas e a figura 24 as perdas relativas às componentes totais nas diferentes frequências no qual foi submetido o material.

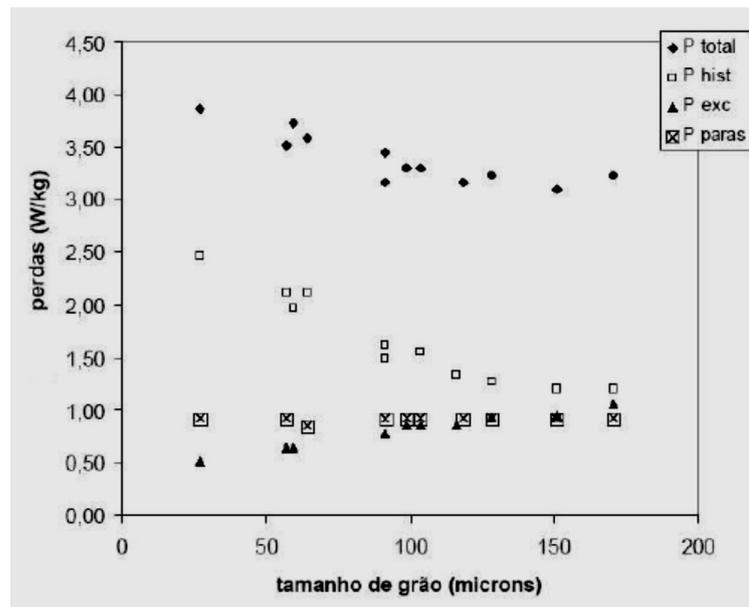


Figura 23 – Comportamento das perdas magnéticas e suas componentes em função do tamanho de grão  
 Fonte: Landgraf (1995, v. 1).

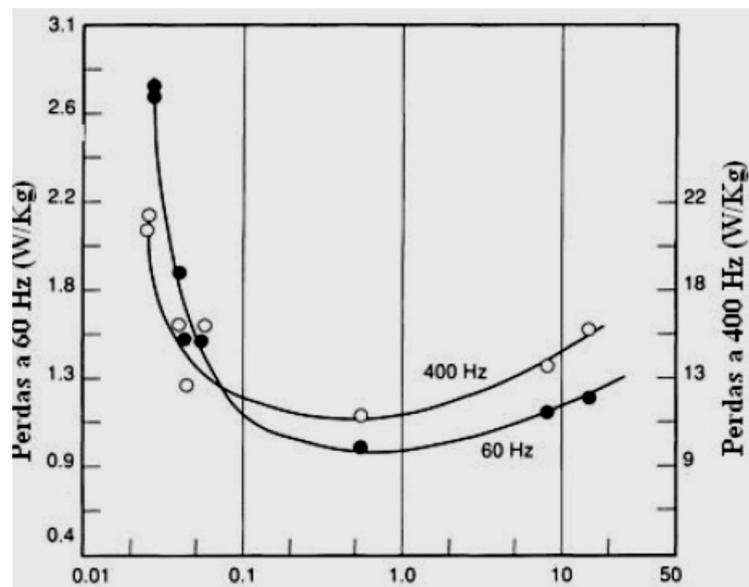


Figura 24 – Influência da área do contorno de grão nas perdas para diferentes frequências  
 Fonte: Adaptada de Metals Handbook (1990, v. 2).

A figura 25 demonstra as perdas histeréticas ( $P_h$ ) e excedentes ( $P_{exc}$ ), devido a deformação plástica a frio nas direções longitudinais (DL) e transversais (DT) das chapas.

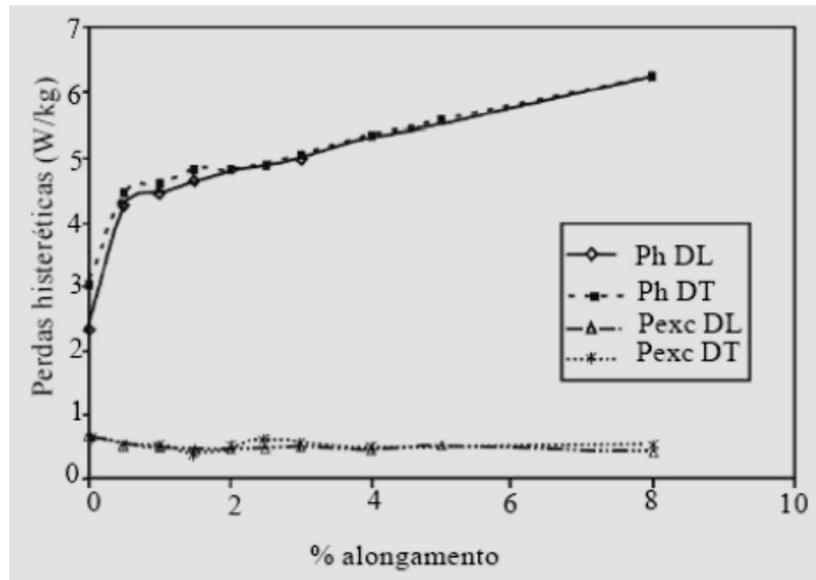


Figura 25 – Crescimento das perdas histeréticas Ph em função da deformação plástica á frio.  
Fonte: Landgraf (2001).

### 2.3.2 As Relações de Fronteira no Campo Magnético.

As condições de fronteira entre dois meios diferentes, observando do ponto de vista da condução de fluxo magnético, apresentam 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 26, e aplicando a lei de Gauss para o magnetismo tem-se:

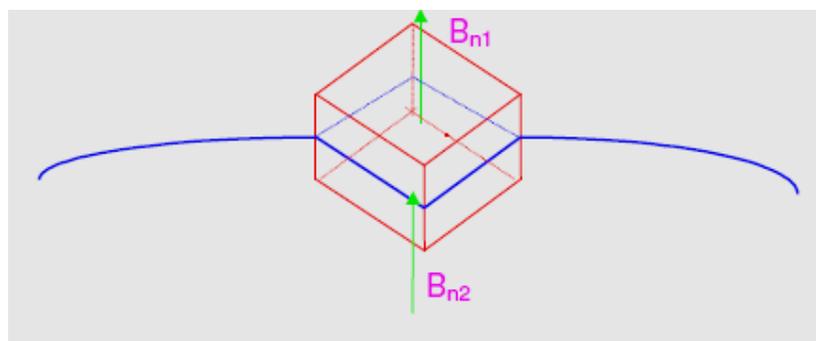


Figura 26 – Elemento Incremental de Volume  
Fonte: Unisanta (c2006-2008).

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 normal 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 27 e aplicando a “Lei de Ampère” tem-se:

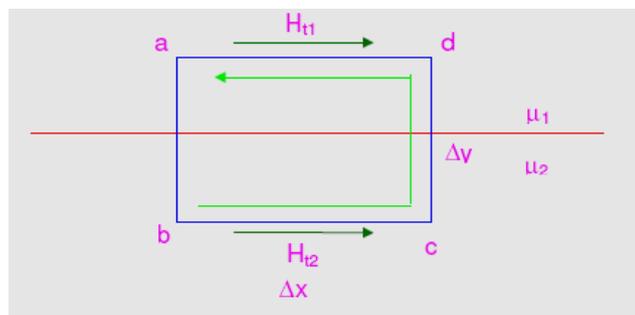


Figura 27 – Caminho “abcd”  
Fonte: Unisanta (c2006-2008).

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

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.

## 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 “encharque” 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). As figuras 28 e 29 mostram as etapas de fabricação de chapas para fins elétricos de GO e GNO, respectivamente, mudando apenas alguns parâmetros como temperatura e espessura das chapas. Para o caso dos aços totalmente processados, estes logo que tratados, são bobinados e disponibilizados para futura estampagem.

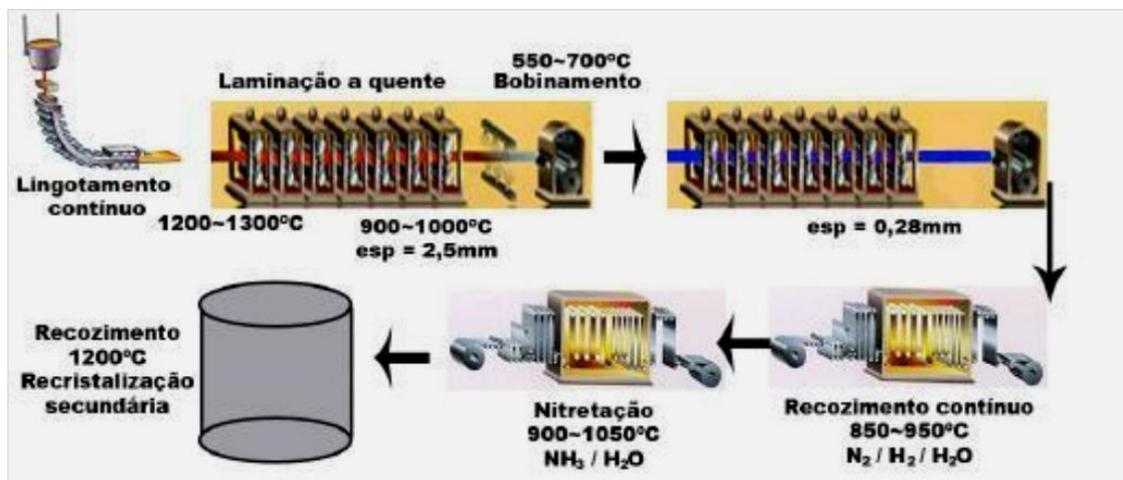


Figura 28 – Processo de fabricação dos aços elétricos GO  
Fonte: Castro (2008).



Figura 29 – Processo de fabricação dos aços elétricos GNO  
Fonte: Castro (2008).

As chapas depois de serem conformadas apresentam-se encruadas, necessitando o recozimento para alívio das tensões internas do material, possibilitando-se com isso as propriedades mecânicas e metalúrgicas desejadas (METALS HANDBOOK, 1990, v. 2). O recozimento contínuo consiste em aquecer o material até uma temperatura acima da zona crítica, encharque e depois o resfriamento rápido.

A figura 30 mostra uma linha de recozimento contínuo que podem ter em torno de 300 metros e também diagramas de temperatura versus tempo mostrando possíveis ciclos de tratamentos térmicos.

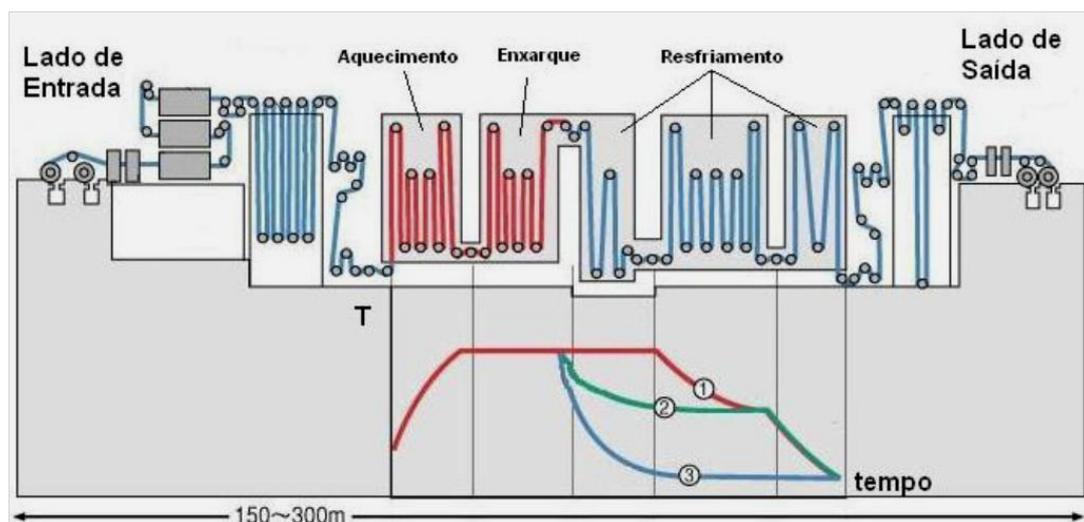


Figura 30 – Processo de recozimento contínuo para aços elétricos.  
Fonte: Castro (2008).

### 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 31 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  $A_{cm}$  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).

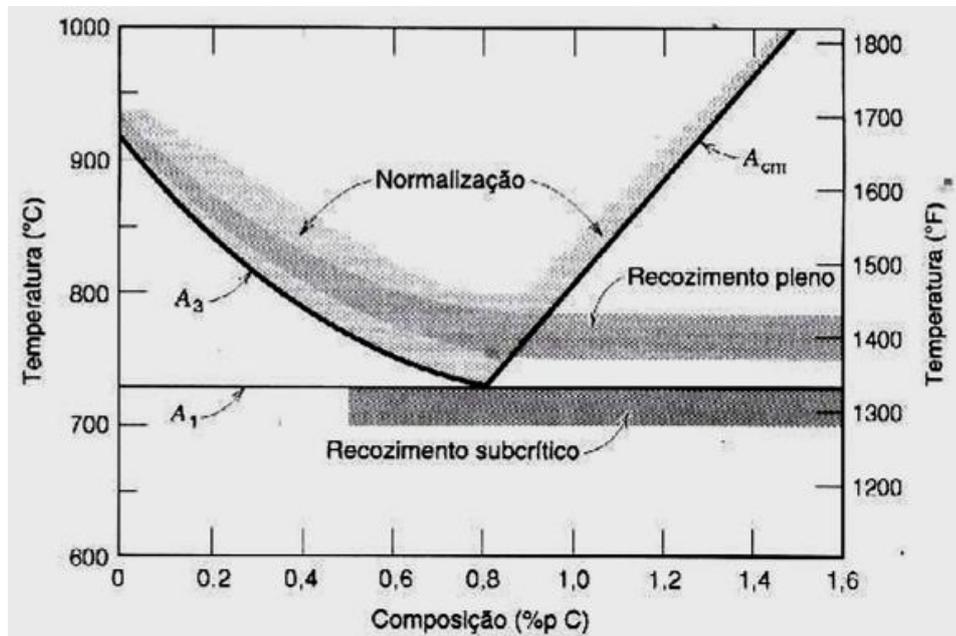


Figura 31 – Diagrama de Fases Ferro-Carbono na Vizinhança do Eutetóide  
Fonte: ASM (1991, v. 4, p. 661).

Também é possível observar que os efeitos na estrutura do carbeto de ferro são relevantes, pois com a elevação da temperatura, conforme mostrado na figura 32 (ASM, 1991), ocorre a decomposição do carbeto de ferro  $Fe_3C$  (Cementita).

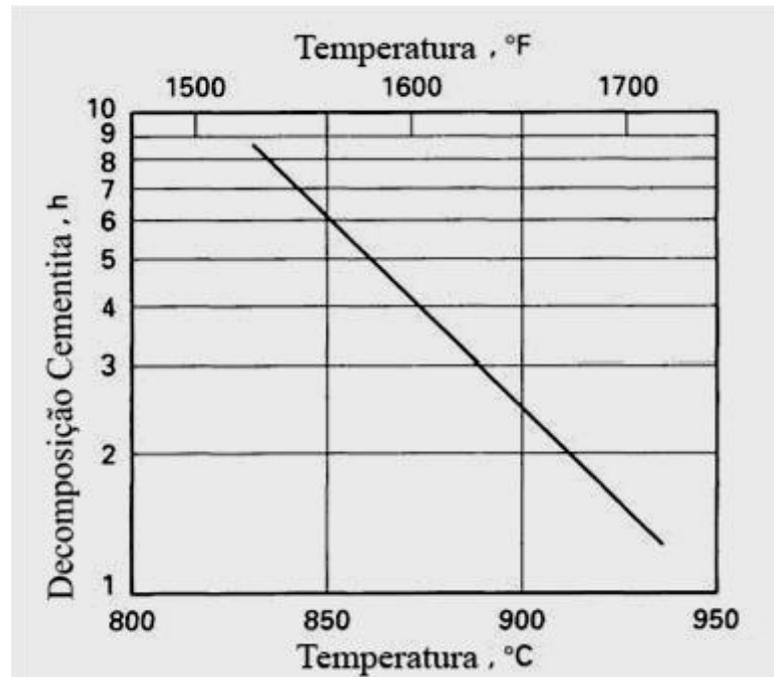


Figura 32 – Efeito do Tempo na Decomposição da  $Fe_3C$  (Cementita)  
 Fonte: ASM (1991, v. 4, p. 1496).

#### 2.4.2 Normalização

Aços que foram deformados plasticamente mediante, por exemplo, uma operação de laminação, é composta 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. 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 Reozimento Pleno

Um tratamento térmico conhecido por “recozimento pleno” é usado com frequência em aços com teores baixos e médios de carbono que serão submetidos à 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  $A_1$ , 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 (CALLISTER, 2000).

#### 2.4.4 Recozimento Subcritico

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  $A_1$ , ou até aproximadamente 700 °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 EQUIPAMENTOS BÁSICOS

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.

Tabela 2 – Linha Típica de Vácuo para Fornos para Alta Temperatura

<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

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 decarbonetação que modifica de maneira importante as suas propriedades.

### 2.6.2 Óxidos

A decomposição de óxidos na superfície dos componentes pode ocorrer devido às 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 utilizados para tratamentos térmicos, como o de recozimento, têm várias configurações, bem como diversos fabricantes. Todos eles desenvolvem o seu projeto obedecendo a 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 33, equações 13 e 14.

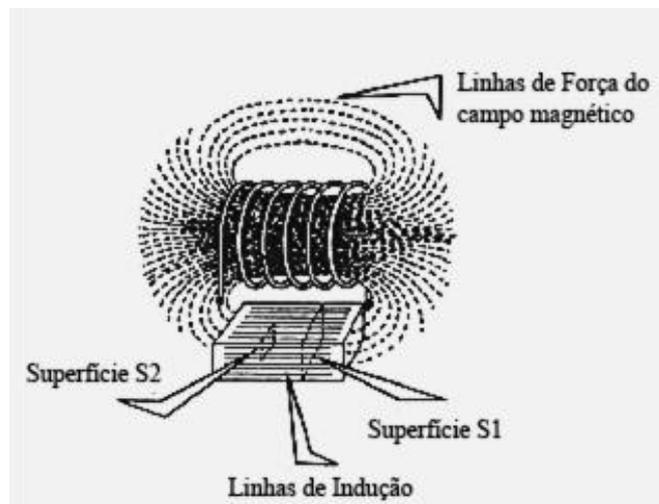


Figura 33 – Fluxo Magnético Através da Superfície de Área “A”  
Fonte: Catarino ([200-]).

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

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.

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

(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 se trata 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 frequente o uso do CGS (BOZORTH, 1951; KNELLER, 1962).

### 2.8.2 Medição de Histerese

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 anéis, barras e chapas. 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, chapas, 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 figura 34 ilustra o circuito do Quadro de Epstein e como é realizado o dimensionamento para sua construção.

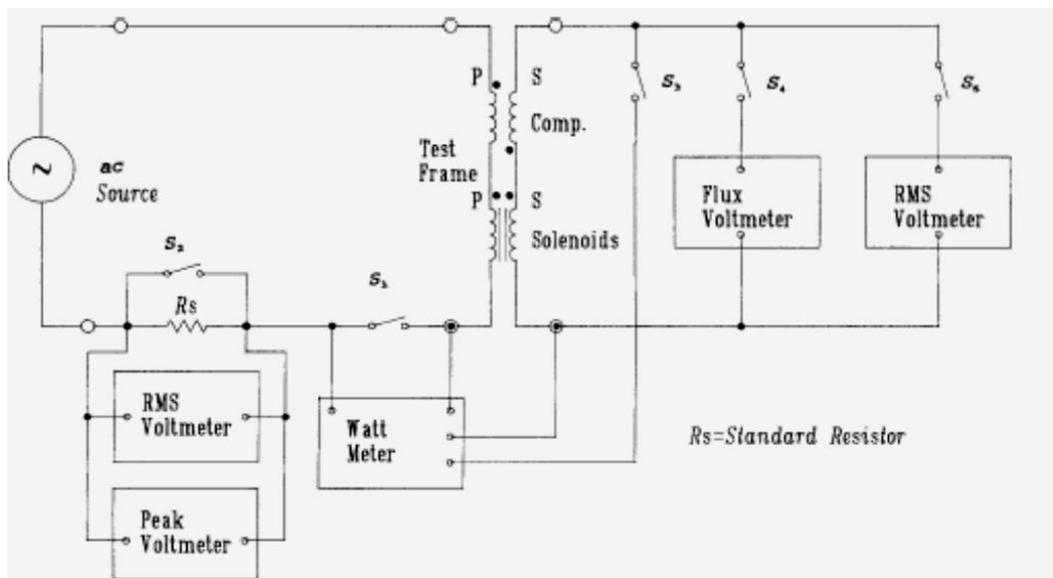


Figura 34 – Quadro de Epstein/circuito  
Fonte: ASTM A343/A343M – 03 (2008a).

### 2.8.3 Dimensionamento do Quadro 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 à 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 mais bem 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  $m$  são 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 TEMPERATURAS 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 é mostrado na figura 35.

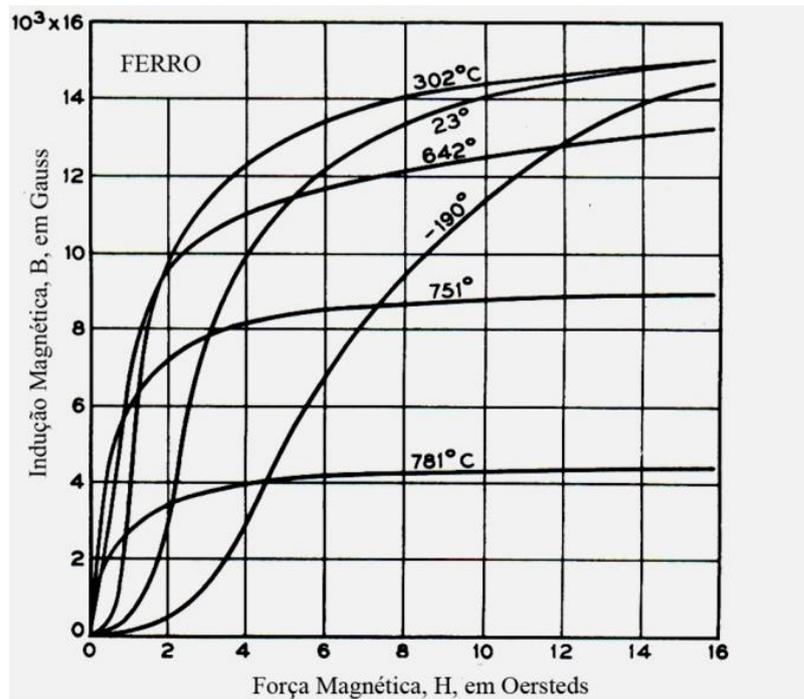


Figura 35 – Curvas de Magnetização do Ferro Medidas com Diferentes Temperaturas, após o Recozimento a 800°C

Fonte: Bozorth (1986, p. 713).

Nas altas temperaturas, as curvas de magnetização sobem rapidamente para valores baixos de  $H$  e se mantém 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 36.

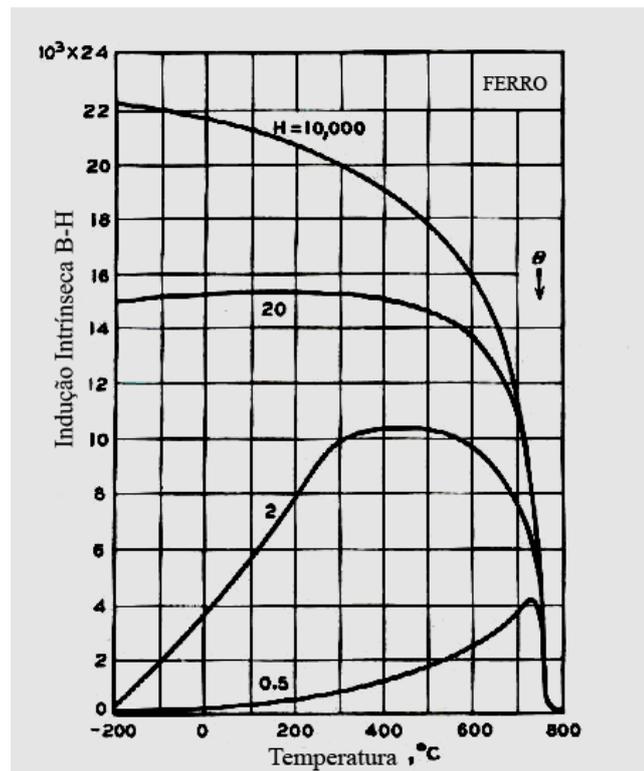


Figura 36 – Campos Magnéticos Altos, a Indução Decresce com Aumento da Temperatura  
 Fonte: Bozorth (1986, p. 714).

Dependendo da permeabilidade apresentada pelo ferro e da temperatura, a força do campo magnético é praticamente constante, conforme mostra a figura 37.

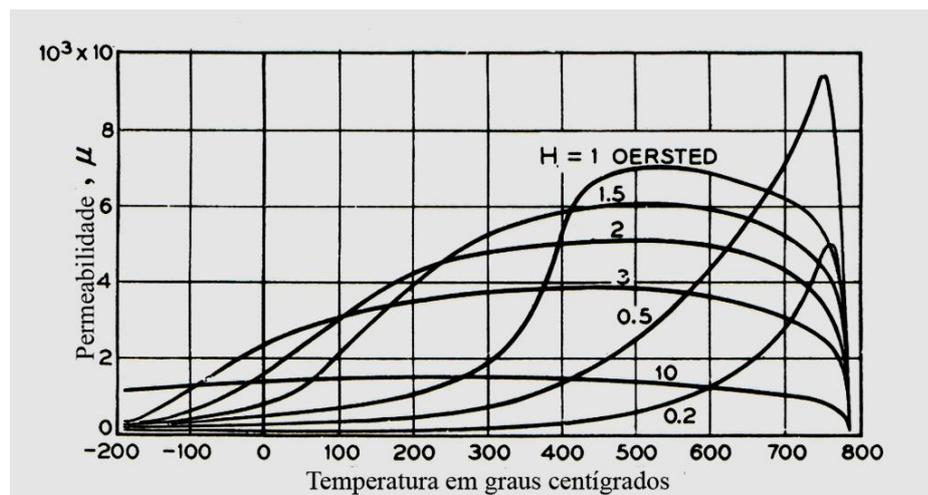


Figura 37 – Permeabilidade do Ferro, em Várias Temperaturas.  
 Fonte: Bozorth (1986, p. 714).

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 38 e também na figura 39.

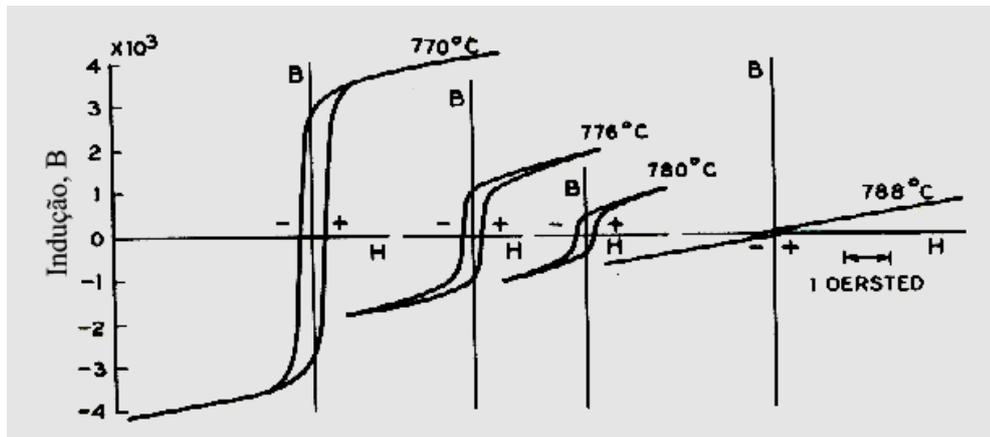


Figura 38 – “Histerese” do Ferro Próximo ao Ponto Curie  
Fonte: Bozorth (1986, p. 715).

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 provou que mesmo repetindo-se vários experimentos não é possível sobrepor perfeitamente às curvas de histerese.

Uma das melhores maneiras de descrever uma curva de histerese é associando-a ao processo de movimentação de paredes de domínios. Vamos supor um material desmagnetizado (soma dos vetores magnetização espontânea do material é zero, ou  $J=0$ , ou seja, o momento angular total é zero). Não há campo  $h$  aplicado ( $H=0$ ), nessa situação  $B$  também é igual a zero. Esse ponto é exatamente a origem do gráfico da figura 37. Aplicando-se um campo  $H(+)$ , ocorrerá movimentação de paredes de domínios, e conseqüentemente aumento da quantidade de momentos magnéticos orientados na direção do campo aplicado. Ao elevar-se ainda mais o campo  $H$ , os grãos (ou pelo menos na sua maioria) acabarão atingindo a condição de monodomínio, o que representa o final das região de movimentação de paredes de domínios. Aplicando-se ainda mais o campo  $H$ , ocorrerá rotação de magnetização de domínios nos grãos cuja orientação cristalográfica não está perfeitamente alinhada com o campo magnético, nesse ponto será atingida a saturação. Neste instante, se  $H$

cessar ( $H=0$ ) o  $B$  será igual a  $B_r$ , sendo esse o ponto conhecido como remanência (apenas rotação ocorre após a remoção do campo  $H$ ) (BOLL, 1992).

Outras questões importantes estão relacionadas às propriedades intrínsecas do ferro, conforme figura 39, que mostra o comportamento do material quando submetido as diversas situações que promovem um desempenho diferente quando da combinação destas.

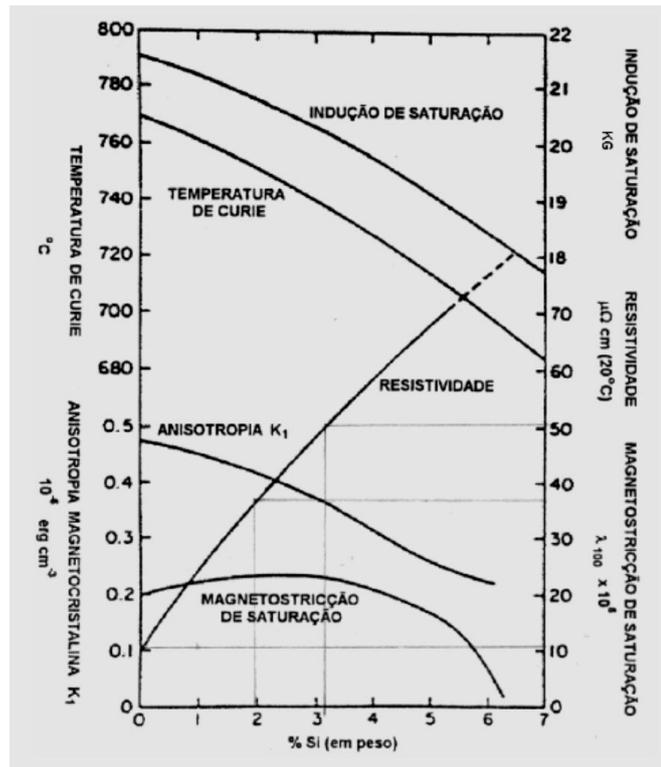


Figura 39 – Variação das propriedades intrínsecas do Fe  
Fonte: Littmann (1971)

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 MATERIAIS

Para realização deste trabalho, foi desenvolvido um processo onde diversas amostras de “chapas finas” para fins elétricos, sofreram um processo para otimização da 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. A principal aplicação visa sua utilização em equipamentos elétricos cuja necessidade de redução das perdas em função das suas dimensões é crucial. O trabalho fundamentou-se na utilização destas chapas onde foram extraídos pequenos núcleos de motores elétricos, no caso específico, para micromotores. A aplicação não se limita somente a micromotores, mas também aos diversos equipamentos onde o fator do corte das chapas altera sua eficiência elétrica.

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

A partir deste desenvolvimento, construiu-se o “Processo de Recozimento Conjugado com Indução Magnética (RCIM), ou seja, procedeu-se o corte das chapas e posteriormente o tratamento térmico conjugado com indução de campo magnético”. As etapas estão descritas abaixo:

**Etapa 1:** Chapa elétrica padrão ABNT 35F 420M, conforme figura 40, recozida totalmente processada, corte eletroerosão a fio, dimensões 30mm x 300mm corte convencional conforme norma ASTM A343/A343M – 03/2008;



Figura 40 – “Chapa Elétrica sem corte” Aço ABNT 35F 420M  
 Fonte: ArcelorMittal Inox Brasil (2000).

**Etapa 2:** Chapa elétrica com corte convencional, conforme figura 41, “antes” do Processo de Recozimento Conjugado com Campo elétrico utilizando o ferramental desenvolvido pelo LdTM/UFRGS;

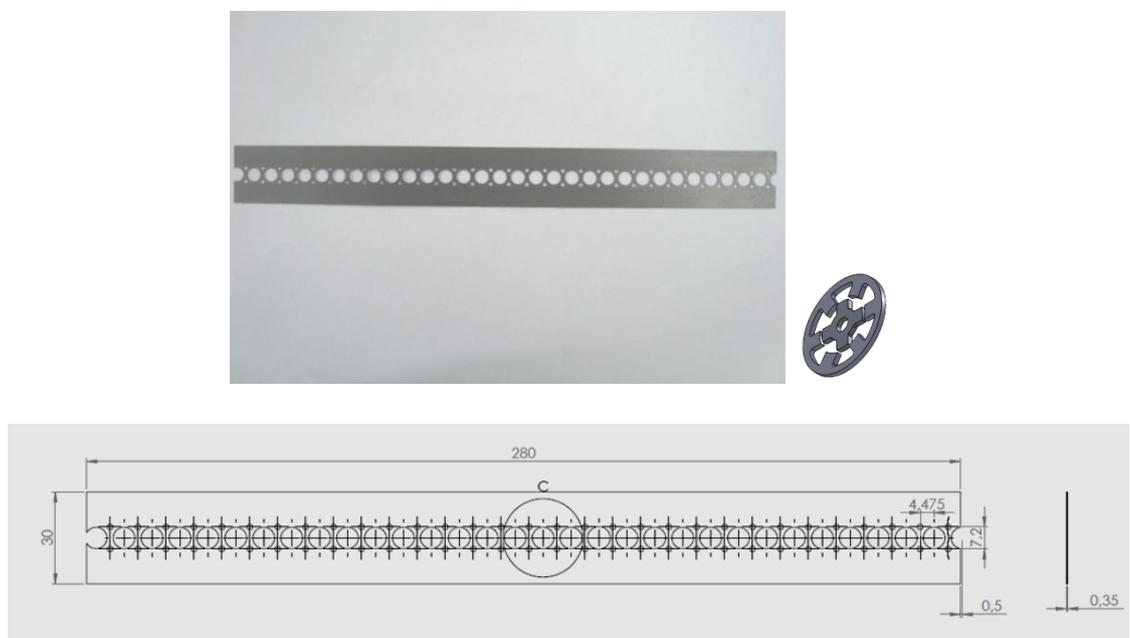


Figura 41 – “Chapa Elétrica com corte” Aço ABNT 35F 420M.  
 Fonte: ArcelorMittal Inox Brasil (2000).

**Etapa 3:** Chapa com corte convencional, conforme figura 42, utilizando o Processo de Recozimento Conjugado com Indução Magnética (RCIM), com tempo de duração de 5 horas, Forno Heraeus K 1250, temperatura máxima de utilização 910°C.



Figura 42 – “Chapa elétrica com corte convencional e RCIM”, Aço ABNT 35F 420M.  
Fonte: ArcelorMittal Inox Brasil (2000).

**Etapa 4:** Chapa elétrica padrão ABNT 35F 420M recozida totalmente processada, conforme figura 43, com corte de micropeças utilizando eletroerosão a fio, Equipamento Fanuc Robocut, fio de latão 0,25mm e refrigeração a água. Estas peças servem como padrão de comparação de processos diferentes de conformação mecânica.

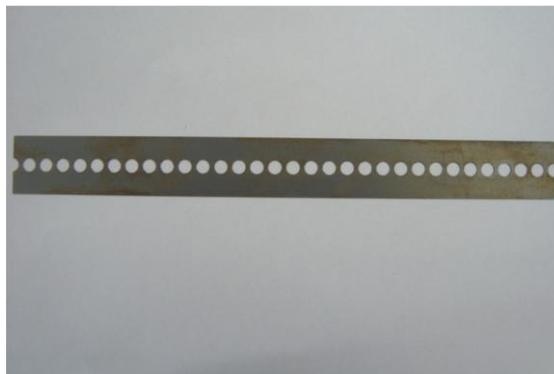


Figura 43 – “Chapa Elétrica com corte à fio”, Aço ABNT 35F 420M.  
Fonte: ArcelorMittal Inox Brasil (2000).

A seguir na figura 44, apresentamos o equipamento onde foi realizado o processo de corte convencional, com a respectiva ferramenta. Trata-se de uma Prensa Excêntrica Frasson 45 toneladas, que realizam o corte convencional das chapas elétricas.



Figura 44 – Prensa Frasson 45 toneladas para corte da “Chapa Elétrica”, ABNT 35F 420M

A figura 45 demonstra o operador da máquina executando o corte de forma manual com um sistema passo-a-passo, definido pelo dispositivo de alimentação.



Figura 45 – Operação de corte da “Chapa Elétrica”, ABNT 35F 420M

Na sequência, a figura 46 mostra o dispositivo visualizado frontalmente com as etapas do corte convencional que garante o movimento contínuo da chapa elétrica.



Figura 46 – Ferramenta de corte da “Chapa Elétrica”, ABNT 35F 420M

Como resultado do processo de corte convencional e a fio, é mostrado a seguir, nas figuras 47, 48, e 49 o corte do rotor /estator, esquerda/direita, respectivamente.



Figura 47 – Detalhe do rotor/estator após o “corte convencional” da “Chapa Elétrica”, Aço ABNT 35F 420M

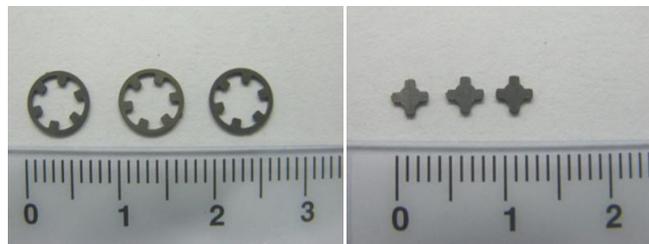


Figura 48 – Detalhe do rotor/estator após o “corte a fio” da “Chapa Elétrica”, Aço ABNT 35F 420M



Figura 49 – Detalhe do conjunto rotor/estator, após o “corte a fio” da “Chapa Elétrica”, ABNT 35F 420M

Com o objetivo de pesquisar as propriedades magnéticas dos materiais, a seguir é apresentado um conjunto de imagens, na figura 50, rotor/estator, comparando os processos de “corte convencional” e “corte a fio”.

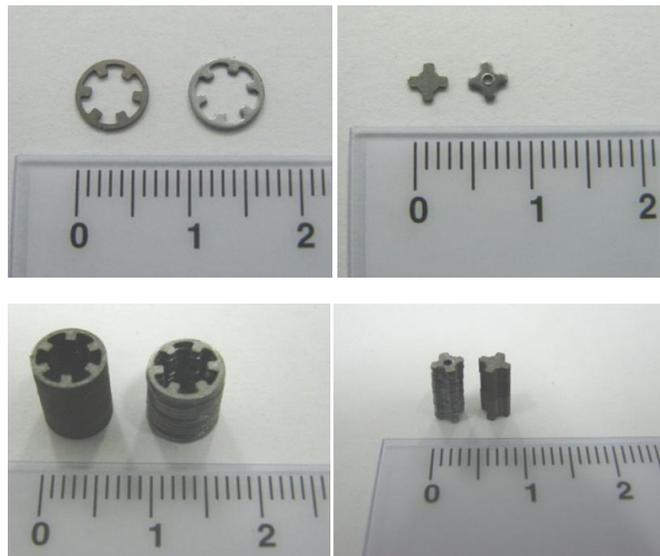


Figura 50 – Detalhe do rotor/estator montado, processo “corte a fio” x “processo corte convencional”.  
Chapa Elétrica”, ABNT 35F 420M

Com objetivo de avaliar o acabamento da superfície/textura, após o corte foram realizadas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme figuras 51 e 52, tanto do rotor/estator, pelo processo convencional, como também pelo corte a fio, respectivamente.

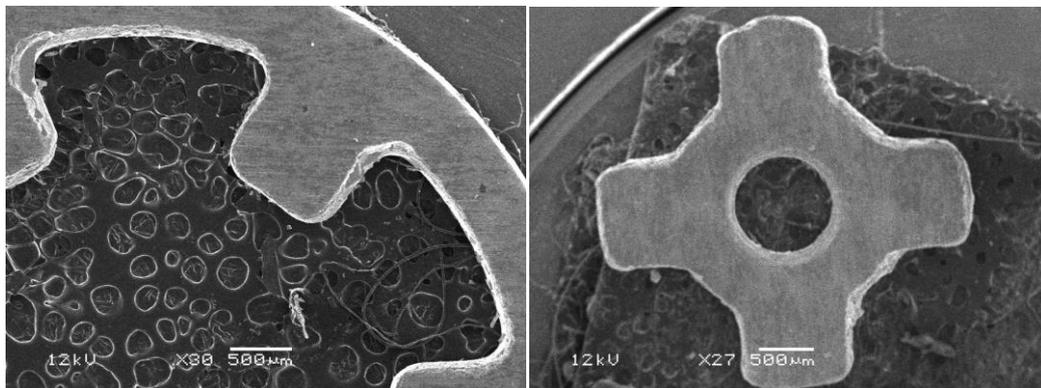


Figura 51 - Detalhe do rotor (direita)/estator(esquerda) montado, processo “corte a fio” x “processo corte convencional “ Chapa Elétrica”, ABNT 35F 420M

A visualização da figura 52 permite observar que as bordas, tanto rotor como estator apresentam uma deformação não homogênea.

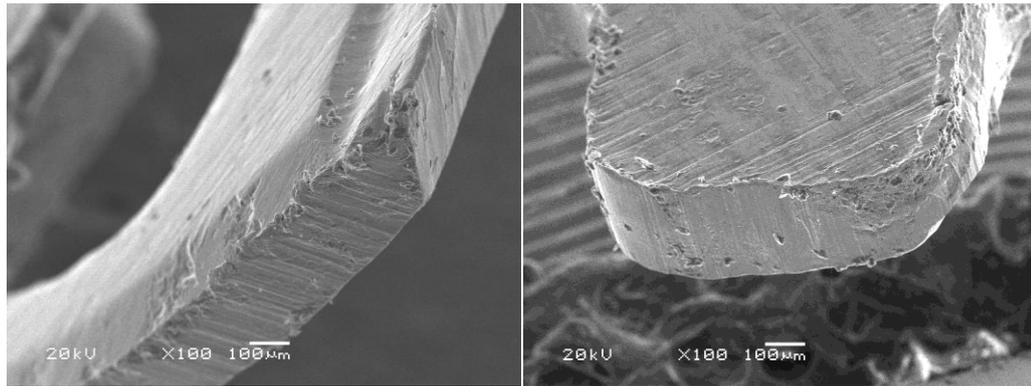


Figura 52 - Detalhe do rotor(direita)/estator(esquerda) montado, processo “corte a fio” x “processo corte convencional “Chapa Elétrica”, ABNT 35F 420M

No conjunto de imagens da figura 53 pode-se observar o esmagamento nas bordas dos componentes do motor, o que resulta em deformações importantes nos resultados dos ensaios magnéticos.

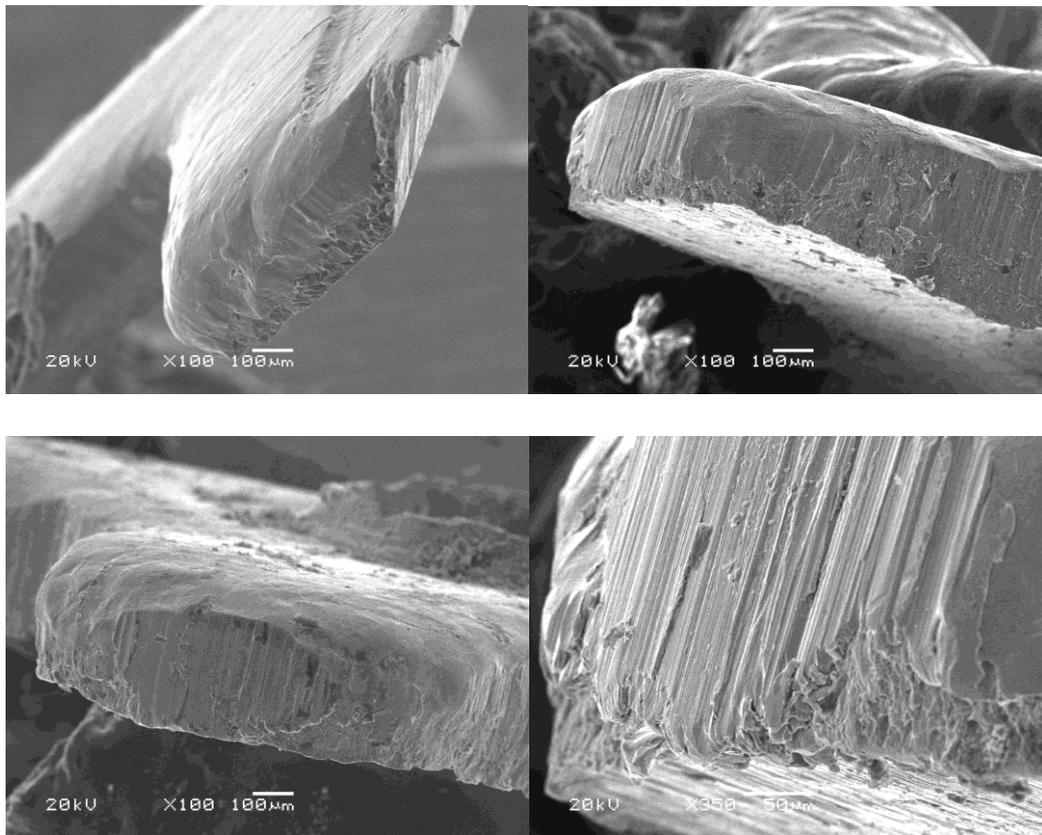


Figura 53 – Detalhe do conjunto rotor(esquerda)/estator(direita) MEV, “processo corte convencional “Chapa Elétrica”, ABNT 35F 420M

Na sequência, a figura 54 mostra o conjunto rotor (direita)/estator (esquerda), MEV pelo processo de corte a fio. Esta visualização pode-se observar, tanto o rotor como estator, uma homogeneidade na superfície de corte, ou seja, uma superfície favorável ao bom desempenho do motor que futuramente possa ser montado, pois as imperfeições apresentadas na região de corte são muito menores que as produzidas no corte convencional.

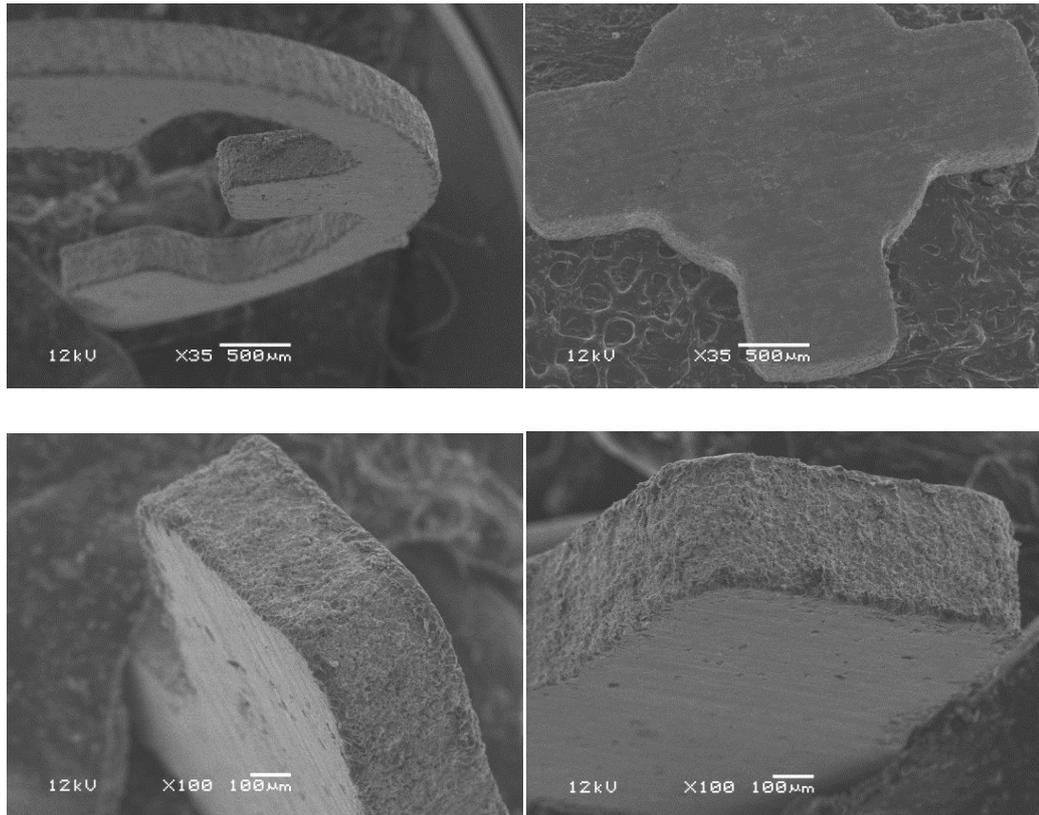


Figura 54 – Detalhe do conjunto esquerda rotor(direita)/estator(esquerda) MEV, “processo corte a fio” “Chapa Elétrica”, ABNT 35F 420M

### 3.2 PROCESSO DE RECOZIMENTO CONJUGADO COM INDUÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO (RCIM)

Com o objetivo de melhorar as propriedades magnéticas procedeu-se o tratamento térmico utilizando-se um “Forno Heraeus K 1250”, figura 55, com potência de 4,5 kW e procedeu-se a indução de campo magnético nas chapas cortadas pelo processo de “corte convencional”, a fim de proporcionar a mudança desejada na estrutura do material, ou seja, criar uma textura favorável ao fluxo de campo magnético com as melhores propriedades elétricas como, resistividade e permeabilidade.



Figura 55 – Chapas de FeSi no Forno Heraeus® K 1250, 4,5 kW, para o RCIM

A seguir mostra-se, na figura 56 as chapas estampadas e na figura 57, o respectivo rotor/estator, esquerda sem aplicação do RCIM e direita com aplicação do RCIM. Pode-se observar a mudança na textura da peça com RCIM.

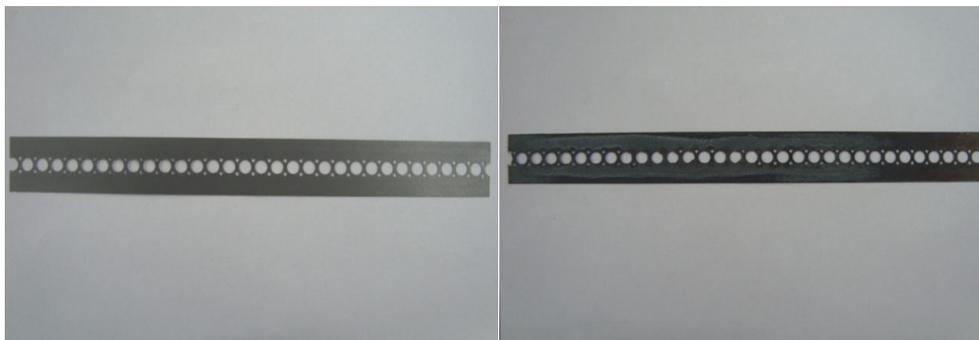


Figura 56 – Conjunto “processo corte convencional“, esquerda chapa elétrica sem tratamento térmico e direita chapa elétrica com tratamento térmico e indução de campo RCIM, Chapa Elétrica ABNT 35F 420M



Figura 57 – Conjunto rotor/estator MEV, “processo de corte convencional com tratamento térmico e indução magnética”, Chapa Elétrica, ABNT 35F 420M

### 3.3 PROCEDIMENTOS PARA O PROCESSO DE RECOZIMENTO CONJUGADO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA (RCIM), UTILIZANDO CHAPAS DE FERRO SILÍCIO, ABNT NM71-2000/ 35F 420M GNO (GRÃO NÃO ORIENTADO) ESPESSURA 0,35MM.

As Chapas de Ferro Silício para o tratamento térmico de recozimento e indução magnética RIM, conforme o gráfico na figura 58 foi submetido ao seguinte processo:

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 16 °C/min até 500 °C), etapa 2 (taxa de 14 °C/min até 910 °C) , etapa 3 (910 °C/1h), etapa 4 (taxa de 3 °C/min de 910 °C até 300 °C) e etapa 5 ( taxa de 5 °C/min de 300 °C até temperatura ambiente, 25 °C), caracterizando o processo de recozimento pleno, ou seja buscando uma matriz totalmente ferrítica conforme ASTM A 395 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1993). Durante o processo de aquecimento, a partir de 500 °C aplicou-se uma corrente elétrica “I” de 20 A (Ampéres) com tensão contínua de 160 V, utilizando-se uma bobina conforme mostrado na figura 58. 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 3 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 CA e saída 160 V CC, 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 CC e com uma potência máxima de operação de 3200 W. Também se utilizou um termopar tipo K (Cromel-Alumel), cuja faixa de operação é de -200 °C até 1250 °C. Através de experimentos realizados repetidamente, onde a taxa de aquecimento e resfriamento foram combinados de forma a reproduzir um resultado similar às chapas sem tratamento conjugado com campo induzido, optou-se pelas taxas citadas anteriormente. Cabe colocar que as taxas de aquecimento e resfriamento foram controladas mantendo-se as resistências elétricas do forno desligadas, ou seja, a partir dos 500 °C somente a bobina indutora de campo magnético foi utilizada. Foram realizados 48 experimentos, sendo 24 peças com o corte convencional “CC” e 24 peças com o conte a fio “CF”, até a escolha das taxas acima mencionadas. Todos os testes obtiveram resultados semelhantes, confirmados nos gráficos de histerese onde o campo aplicado obteve-se uma indução magnética de aproximadamente 1,5 T.

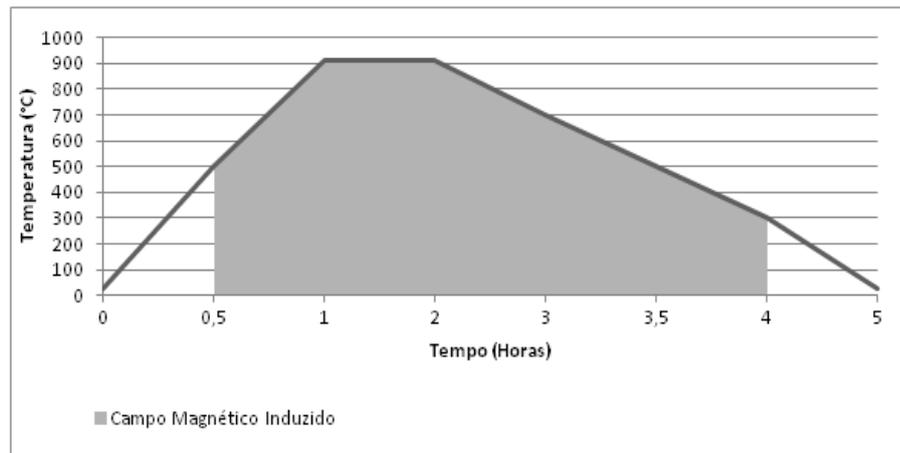


Figura 58 – Curva do tratamento térmico com indução magnética aplicada

### 3.4 CARACTERÍSTICAS DO ENROLAMENTO DE INDUÇÃO MAGNÉTICA

- a) O enrolamento, conforme figura 59, desenvolvido para induzir o campo magnético, propiciou sua utilização durante todos os ensaios, apresentando algumas rachaduras na sua superfície devido às altas tensões mecânicas envolvidas e também pelo tempo de processo. Ficou claro que, para processos contínuos de produção em série será necessário uma bobina mais robusta e também com um revestimento cerâmico com maior espessura de parede. O enrolamento possui 110 espiras, com fio 2,5 mm de aço inoxidável SAE 304, sendo utilizado um tubo cerâmico com 300 mm de comprimento e espessura de parede de 4 mm. O diâmetro total do enrolamento possui 100 mm. O RCIM é um processo extremamente eficiente, podendo ser observado durante as análises das ligas um ganho significativo no que diz respeito as perdas por histerese dos materiais pesquisados. Foram colocadas no forno 24 peças de cada amostra, em lotes de (04) quatro peças por fornada.

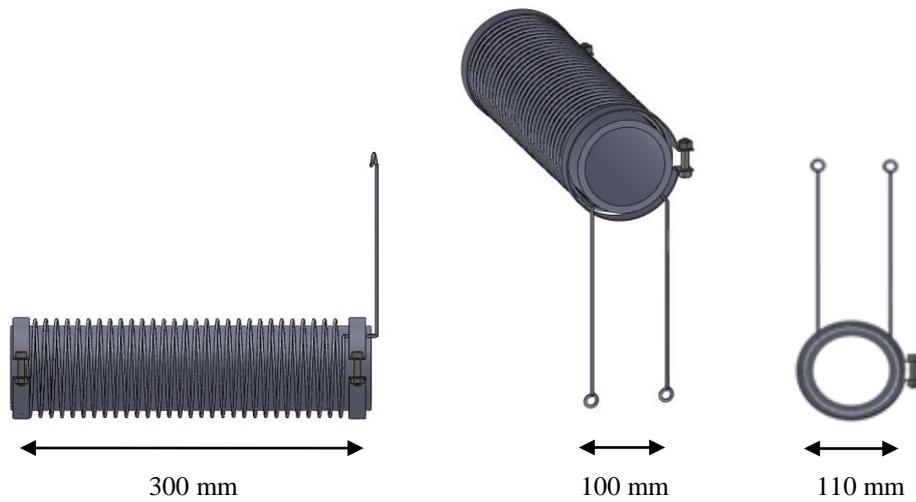


Figura 59 – Enrolamento de indução magnética

A figura 60 apresenta o conjunto da fonte de alimentação responsável pela indução de campo magnético.



Figura 60 – Bobina de indução magnética e fonte de alimentação

- b) foram colocadas no forno 24 peças de cada amostra, em lotes de (04) quatro peças por fornada, conforme sequência da figura 61.



Figura 61 – Forno de recozimento com indução magnética (Forno 4,5 kW/1250°C)

### 3.5 CARACTERÍSTICAS DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO STT01/ENROLAMENTO DE INDUÇÃO

O gráfico a seguir, conforme figura 62, apresenta o comportamento padrão do enrolamento para uma condição específica de trabalho. Estas informações servem como indicação para os melhores parâmetros para o regime de trabalho utilizado durante o processo de indução magnética. O enrolamento atinge uma condição de trabalho, onde a corrente “I” máxima aplicada é de 20 A (Ampéres) de pico e o campo “H” gerado de 80 Oe (Oersteds) no centro do enrolamento, podendo ser escolhida uma faixa ainda maior de operação, conforme a espessura das chapas a serem sobrepostas dentro do enrolamento.

As curvas do campo magnético em função da corrente aplicada, no enrolamento, e da variação percentual do campo magnético são em relação à posição central (0,0,0) do eixo da peça em operação e mostra com clareza como se comporta o Campo magnético (H) versus Corrente (I).

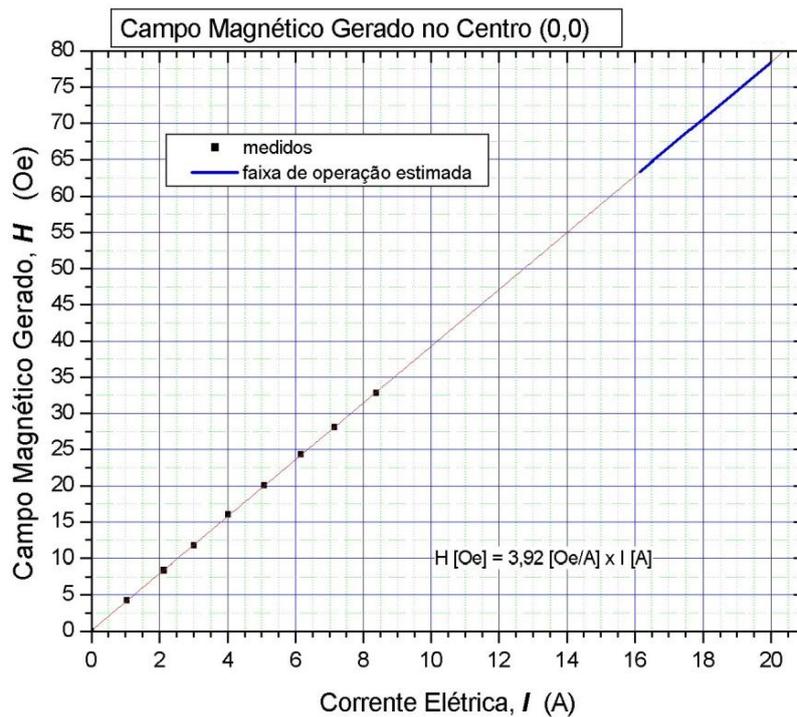


Figura 62 – Campo Magnético x Corrente Elétrica  
 Fonte: LAM – LAB. MAGNETISMO FÍSICA/UFRGS.

### 3.6 COMPOSIÇÕES QUÍMICAS, PROPRIEDADES MECÂNICA E ELÉTRICA.

Dados da composição fornecida pela ACESITA/Grupo Arcelormittal.

Chapa Aço Elétrica E170 – 35F 420M – ABNT NM71-2000

Lote: 0M0048990/DKQUD31

#### 3.6.1 A composição química do aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M

Tabela 3 – Composição Química Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M

Elemento	Si	Mn	C	Al	P	S
Teor (%)	1,7 < Si < 2,30	< 0,060	< 0,030	< 0,400	0,0040	< 0,0080

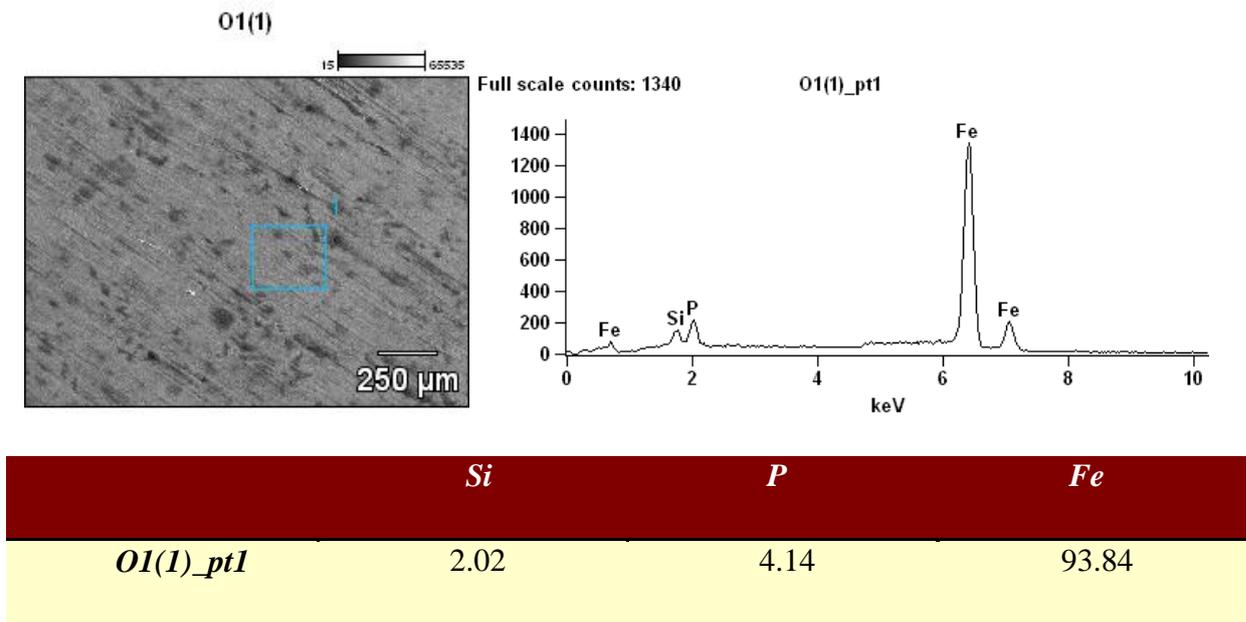


Figura 63 – Difração Rx FeSi - Posição O1 - s/ RCIM  
Fonte: Lab. Difração/Física/UFRGS.

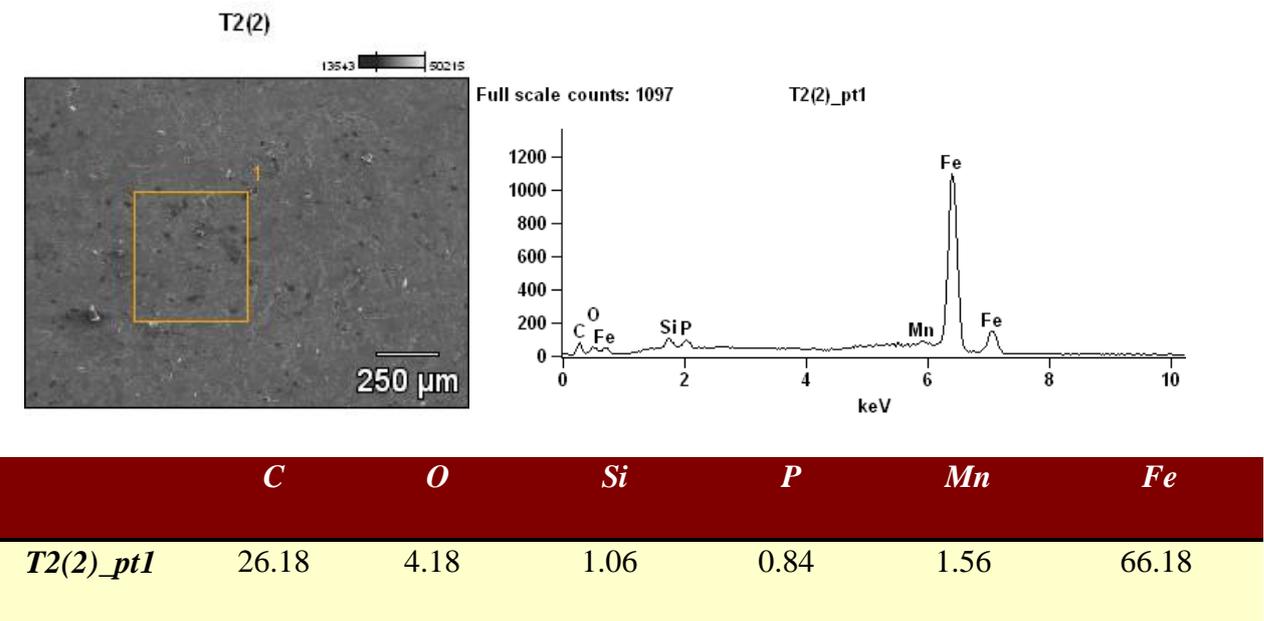


Figura 64 – Difração Rx FeSi – Posição T2 - s/ RCIM  
Fonte: Lab. Difração/Física/UFRGS.

### 3.6.2 As propriedades mecânicas do aço ABNT NM71-2000/ 35F 420MN

Segue abaixo:

- limite de escoamento (direção longitudinal): 300 MPa;
- limite de escoamento (direção transversal): 304 MPa;
- limite de resistência (direção longitudinal): 420 MPa;
- limite de resistência (direção transversal): 425 MPa;

- e) alongamento (direção longitudinal): 30%;
- f) alongamento (direção transversal): 30%;
- g) dureza (HV) : 147HV.

### 3.6.3 As propriedades magnéticas do aço ABNT NM71-2000/ 35F 420MN

Segue abaixo:

- a) perdas 1,0 T / 50 Hz = 1,27 W/kg;
- b) perdas 1,0 T / 60 Hz = 1,58 W/kg;
- c) perdas 1,5 T / 50 Hz = 2,83 W/kg;
- d) perdas 1,5T / 60 Hz = 3,53 W/kg;
- e) indução Magnética Mínima B(T): B =1,52 T.

### 3.7 METALOGRAFIA

A fim de se obter correspondência entre o comportamento magnético e a microestrutura, foram realizados preparos metalográficos, figuras 65 e 66, no LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS) e também no LdTM (Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS). 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 foi feita no centro da secção das amostras, com aumento de 200 vezes, onde se observa que o TG (Tamanho de Grão) antes do processo RCIM de  $50\mu\text{m}$  e após na ordem de  $150\mu\text{m}$ , conforme figura 66.

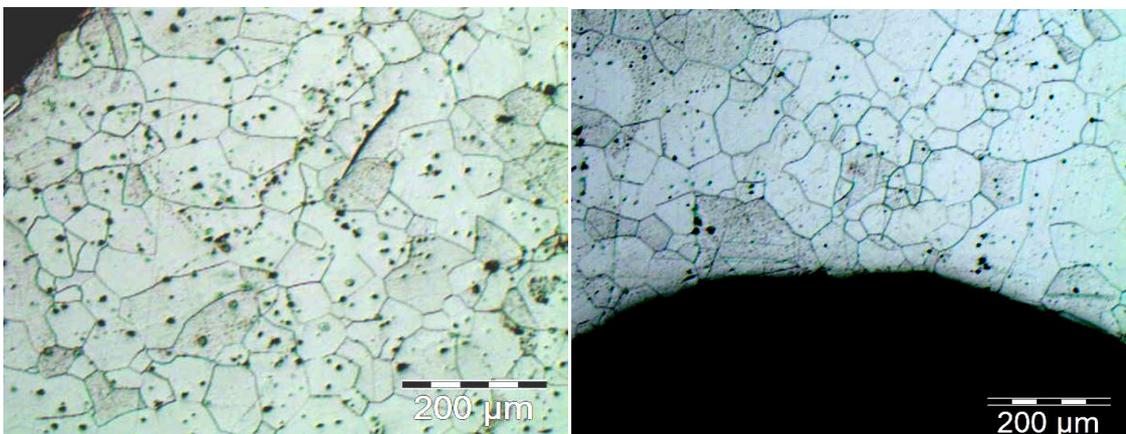


Figura 65 – Metalografias FeSi Aço ABNT 35F 420M sem RCIM, feitas por microscopia ótica.

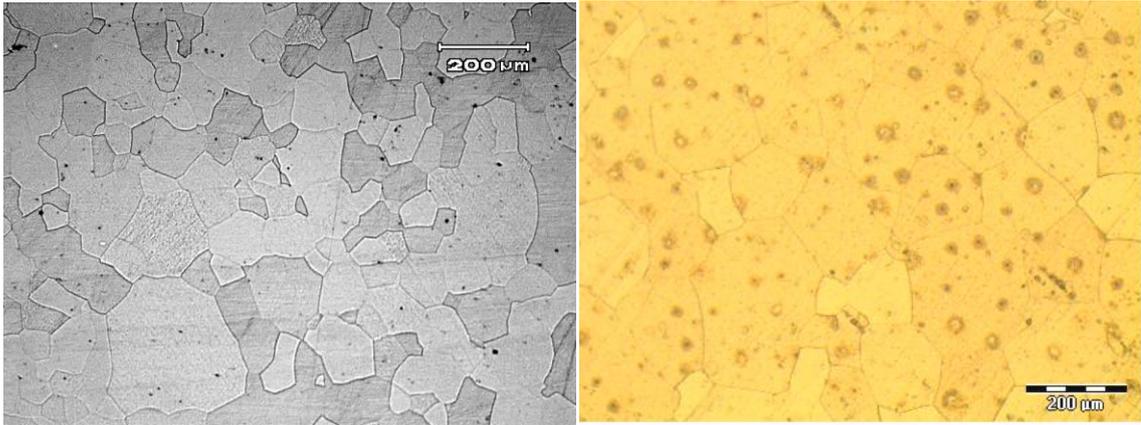


Figura 66 – Metalografias FeSi Aço ABNT 35F 420M com RCIM, feitas por microscopia ótica.

### 3.8 RESISTIVIDADE

A fim de se obter correspondência entre o comportamento magnético e a resistividade, mostrado na figura 67, foram realizadas medições das chapas tratadas e não tratadas termicamente no sentido longitudinal e transversal das Chapas sem o RCIM Padrão e Processadas (PLP e PTP) e com RCIM Convencional não Processadas no sentido longitudinal e transversal (LC e TC).

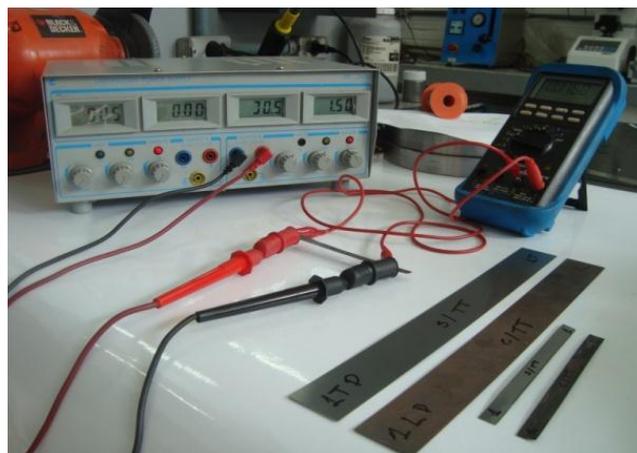


Figura 67 – Resistividade das Chapas FeSi Aço ABNT 35F 420M

Na tabela 4, seguem os resultados de resistividade obtidos durante as medições das chapas tratadas do aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M. Utilizou-se, para comprovação, as peças padrão, ou seja, aquela onde o processo já fora realizado pelo fabricante e as peças

convencionais sem qualquer tipo de processamento. Com isto, obteve-se resultados de resistividades para comparação, demonstradas a seguir:

Onde:

**E.R.s/RCIM PLP** - Ensaio de Resistividade sem RCIM (Padrão Longitudinal Processadas);

**E.R.s/RCIM PTP** - Ensaio de Resistividade sem RCIM (Padrão Transversal Processadas);

**E.R.c/RCIM LC** - Ensaio de Resistividade com RCIM (Convencional Longitudinal);

**E.R.c/RCIM TC** - Ensaio de Resistividade com RCIM (Convencional Transversal).

Tabela 4 – Ensaio de Resistividade

<b>Ensaio de Resistividade</b>			
<b>Medidas Geométricas das Amostras</b>			
Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Área (m <sup>2</sup> )
30,0	0,35	280,00	1,0500E-05
Chapas	R(Ω)	ρ (Ω*m) *10 <sup>-7</sup>	
<b>E.R.s/RCIM PLP</b>	0,0097	3,65	
<b>E.R.c/RCIM LC 01</b>	0,0096	3,59	
<b>E.R.c/RCIM LC 02</b>	0,0091	3,43	
<b>E.R.c/RCIM LC 03</b>	0,0092	3,44	
<b>E.R.s/RCIM PTP</b>	0,0093	3,50	
<b>E.R.c/RCIM TC 01</b>	0,0094	3,57	
<b>E.R.c/RCIM TC 02</b>	0,0095	3,57	
<b>E.R.c/RCIM TC 03</b>	0,0092	3,43	

### 3.9 DIFRAÇÃO

A seguir, figura 68 a padrão do espectro do FeSi em todos os picos e a figura 69 também sem aplicação do RCIM, mas já com formações de óxidos na sua superfície, mostram o espectro de difração das chapas antes do recozimento conjugado com campo magnético mantida a formação de óxidos na superfície das chapas. A presença dos óxidos se deve ao fato

do processo ser realizado sem atmosfera controlada. Também se deve dizer, que este procedimento foi definido previamente, pois esta condição também foi colocada como premissa inicial do processo RCIM.

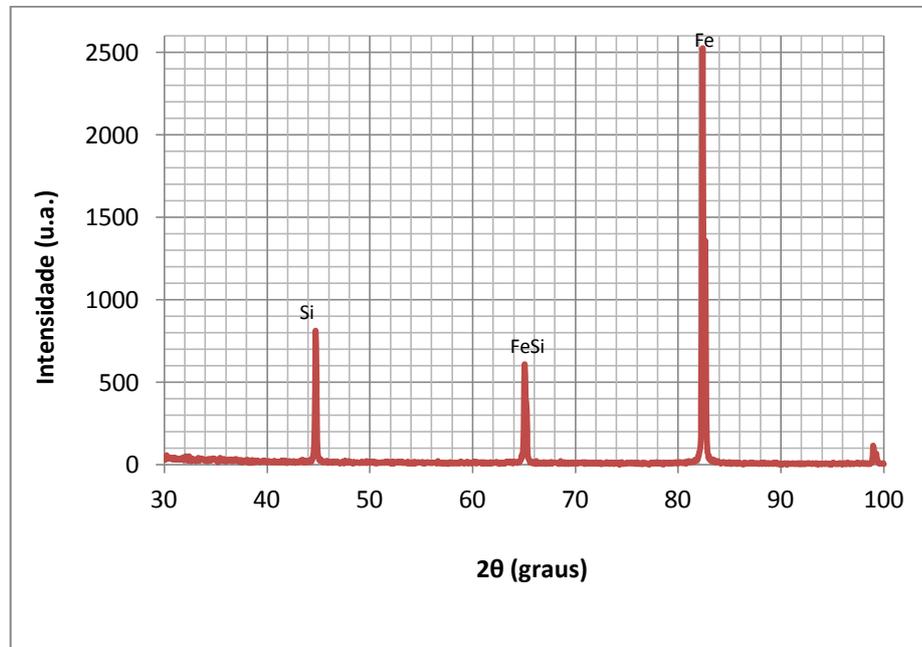


Figura 68 – Chapa FeSi Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M - s/ RCIM Recozimento e Indução de Campo Elétrico. Difração – Lab. Difração/Física-UFRGS

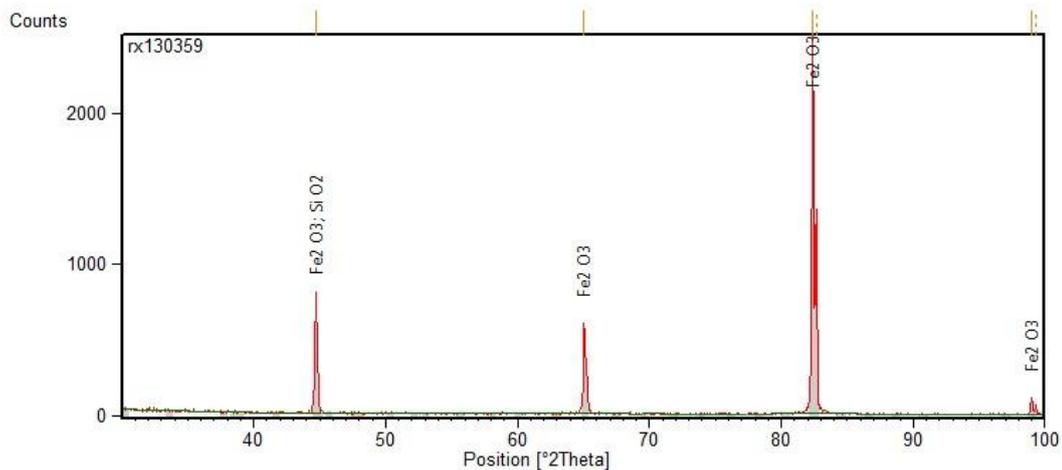


Figura 69 – Chapa FeSi Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M – Composição das Fases s/ RCIM - Recozimento e Indução de Campo Elétrico. Difração – Lab. Difração/Física-UFRGS

A seguir, figura 70 e 71, configuram as chapas após o RCIM (Recozimento Conjugado com Campo Magnético), mantidas o padrão do espectro antes obtido do procedimento térmico com indução de campo magnético simultâneo.

Observa-se uma grande formação de óxidos nas chapas, mas esperada, visto que o processo ocorre sem controle de atmosfera.

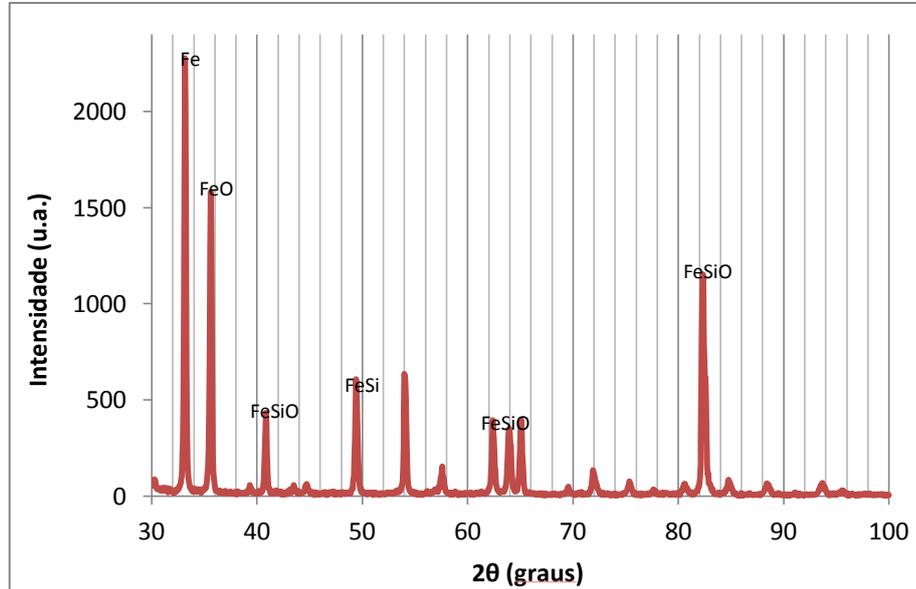


Figura 70 – Chapa FeSi Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M c/ RCIM – Recozimento e Indução de campo Elétrico. Difração – Lab. Difração/Física-UFRGS.

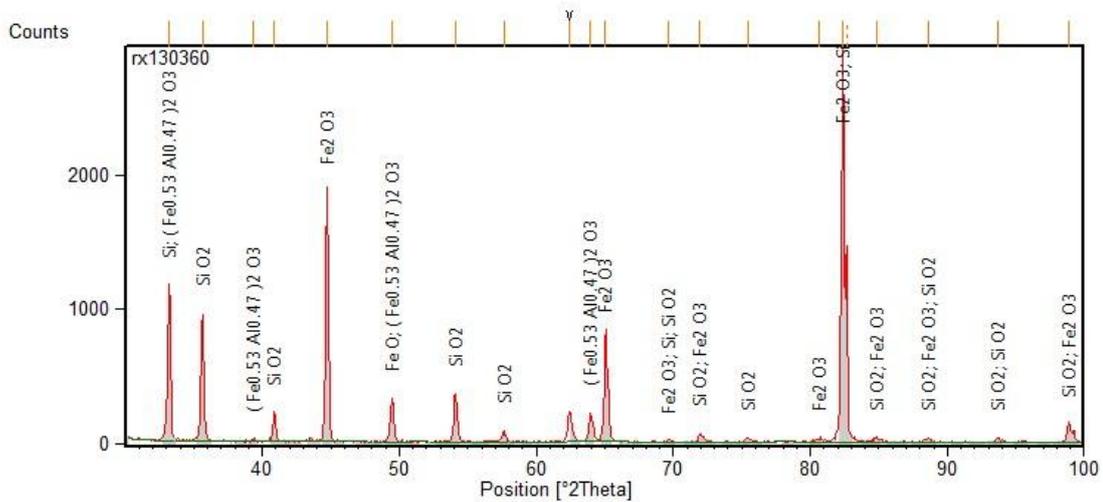


Figura 71 – Chapa FeSi Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M c/ RCIM - Recozimento e Indução de campo Elétrico. Difração – Lab. Difração/Física-UFRGS.

Na sequência do processo de tratamento do material as figuras 72 e 73, apresentam um estado de reorientação magnética na sua estrutura, isto ocorrendo conforme curva do recozimento conjugado com o campo magnético aplicado.



### 3.10 BANCADA DE ENSAIO “QUADRO DE TESTE EPSTEIN”.

O equipamento utilizado para levantamento dos resultados finais, figura 74, mostra algumas peças montadas a partir de quatro enrolamentos dispostos de forma de um quadro, sendo cada uma dos quatro enrolamentos contendo 700 espiras conforme a norma ASTM A343/A343M - 03, Reapproved 2008, Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic Properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter-Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2008a).

Este método de ensaio abrange os testes básicos para as propriedades magnéticas de matérias laminados planos em frequências de energia de (25 Hz a 400 Hz) utilizando um suporte formado por enrolamentos primários e secundários, formando um quadro com dimensões de (25 x 25) mm, denominado de “Ensaio Epstein”. O método de ensaio deve ser usado em conjunto com norma A34/A34M: Practice for Sampling and Procurement testing of Magnetic Materials (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2008ab), que fornece as perdas no núcleo através de uma corrente de excitação com alta densidade de fluxo magnético, na faixa de 1,5 T a 1,8 T. A gama de frequência deste método é normalmente 50 a 60 Hz, mas trabalha-se com faixas entre 25-400 Hz, com objetivos de identificar propriedades magnéticas específicas para diversas composições de chapas elétricas.

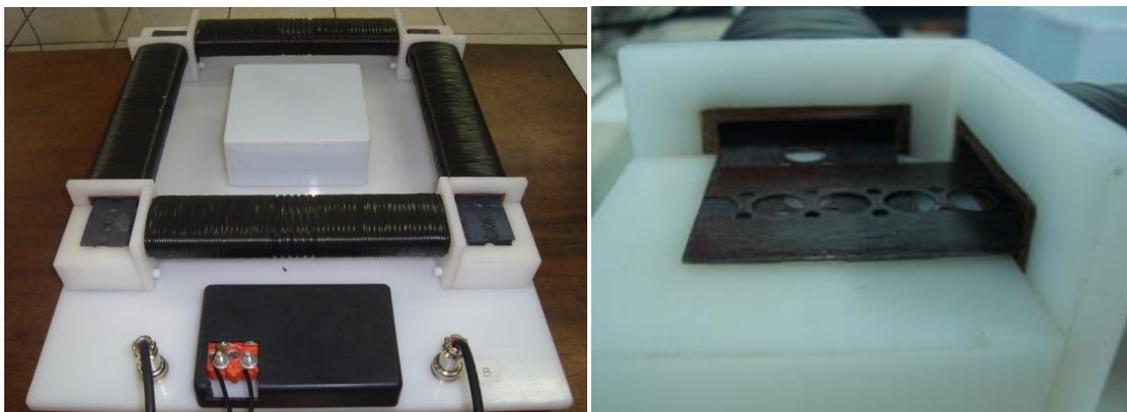


Figura 74 – Chapas de FeSi Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas a Saturação Magnética

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISES E ENSAIOS COMPARATIVOS

As chapas foram cortadas de acordo com a norma ASTM A343/A343M - 03 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2008a), Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic Properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter-Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame 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 através do programa da “Hewlett-Packard Visual Engineering Environment”, (HP VEE) versão 9.32 - 2013. Este software acoplado aos equipamentos de obtenção de dados permitiu construir as curvas de saturação magnética onde se podem concluir os resultados do processo de RCIM. A tensão utilizada foi de 9,8V e a frequência de operação ficou na faixa de 236 até 260 Hz, indicando que até próximo a 400 Hz obtive valores ainda reduções das perdas das chapas com RCIM.

As curvas de histerese, ou seja, os valores máximos que os materiais podem obter em se tratando de fluxo magnético, pois são valores de “pico”, com frequências muito baixas e medidas em pequenos intervalos de tempo, onde as correntes parasitas são desprezíveis e não interferem no desempenho do material magnetizado, apresentam resultados relevantes, uma vez que o RCIM já mostra mudanças na textura do material, ou seja, um aumento do tamanho de grão na faixa de 150 $\mu$ m. Valores próximos a 1,8 T são extremamente relevantes, visto que o material, mesmo com bordas deformadas mecanicamente, pelo corte convencional, atingiu tais valores de densidade de fluxo magnético. O efeito das modificações causadas pela deformação plástica na borda do material esta amenizada em função do alívio de tensões causado pelo RCIM e pelo rearranjo da estrutura do material observado no MEV/EBSD. Também cabe colocar que a resistividade elétrica “ $\rho$ ”, manteve-se inalterada, em ambos os testes para as chapas padrão, figura 75, e para as peças com RCIM, tabela 2 – “Ensaio de Resistividade Elétrica”.

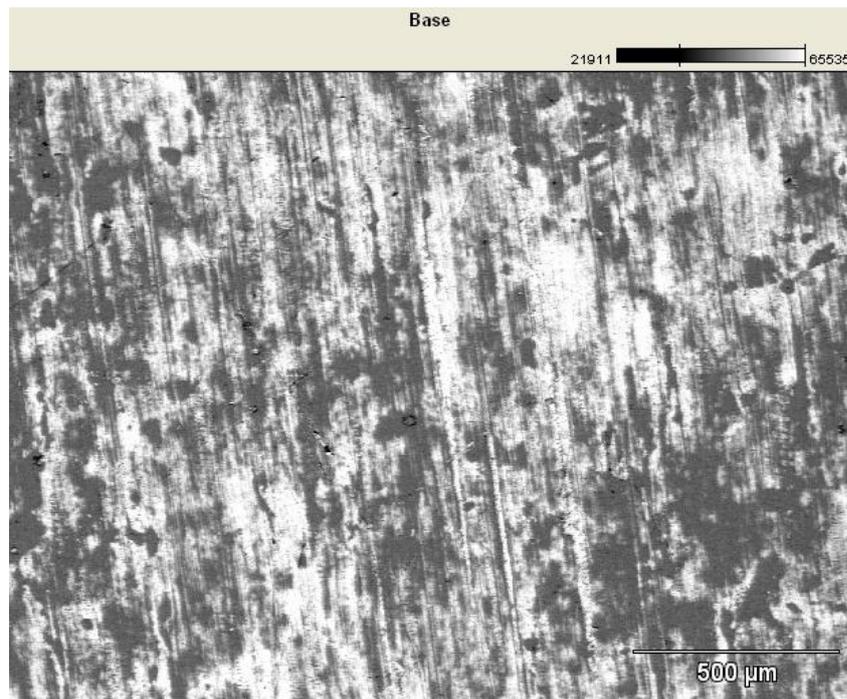


Figura 75 – Chapas Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética (MEV/EBSD)

A figura revela uma textura com grãos de silício distribuídos longitudinalmente a matriz do ferro, oportunizando uma boa permeabilidade da matriz FeSi. O resultado, no gráfico  $\text{dB/dt} \times H$  (intensidade fluxo magnético  $\times$  campo aplicado), figura 76, determina uma saturação magnética próxima a 1,5 T. Os gráficos de histerese ( $B \times H$ ), figura 77, peças-padrão, Teste Padrão P1 até Padrão P6, figura 87, apontam para resultados entorno de 1,5 T até 2,0 T o que configura um processo extremamente eficiente para esta aplicação. As respostas para chapas totalmente processadas, estão de acordo com as altas induções magnéticas necessárias para utilização em equipamentos que requerem alto rendimento, ou seja, geradores, motores e transformadores de pequeno e grande porte. Todos os ensaios realizados, com vinte e quatro amostras de cada espécie apontaram resultados iguais ou muito semelhantes, garantindo que sua aplicação foi padronizada conforme norma ASTM A343/A343M-03.

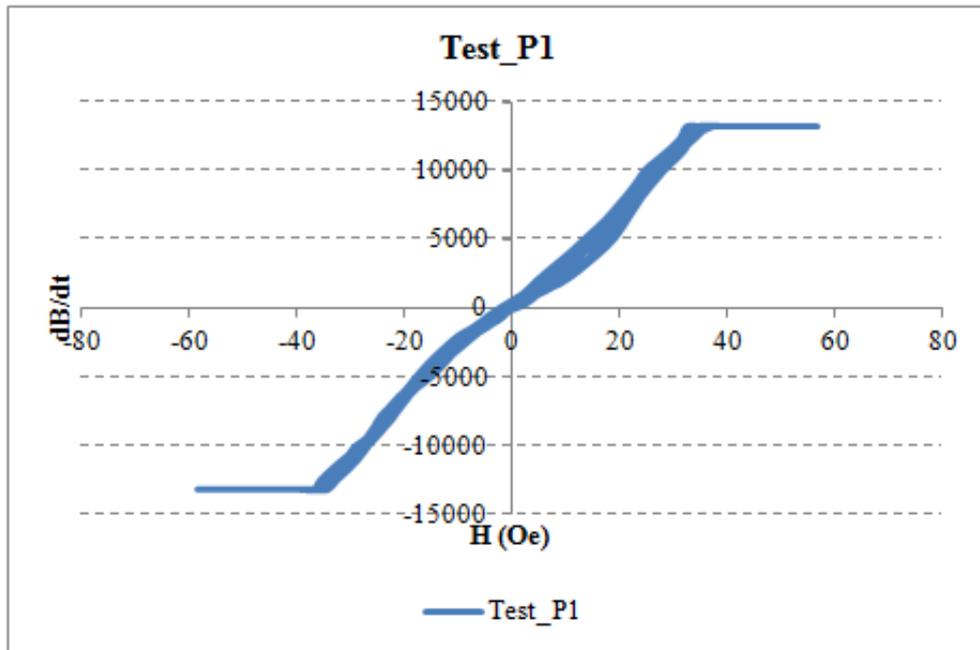


Figura 76 – Chapas Padrão P1 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

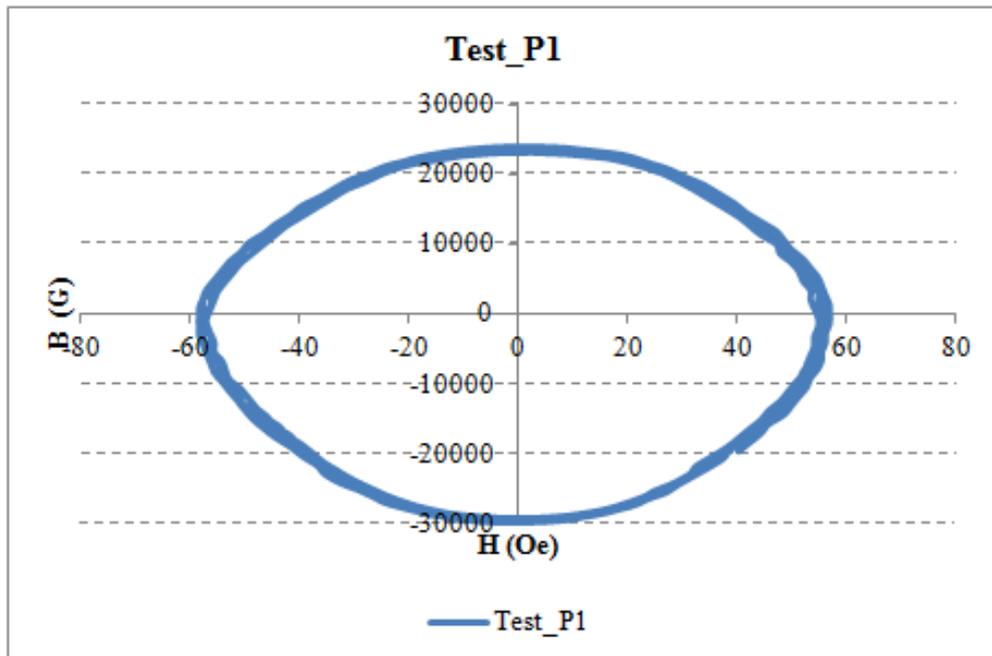


Figura 77 – Histerese das Chapas Padrão P1 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

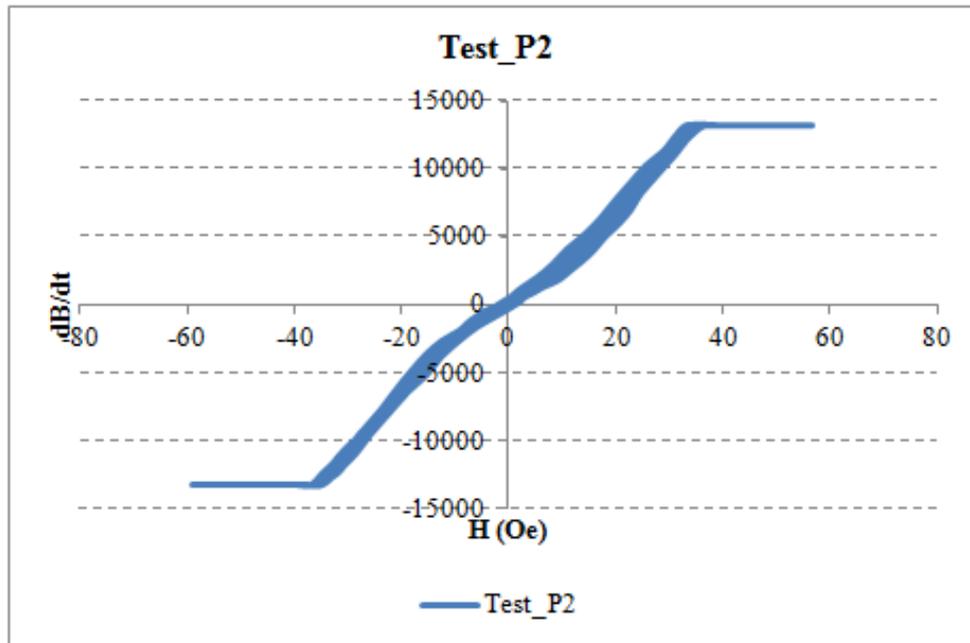


Figura 78 – Chapas Padrão P2 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

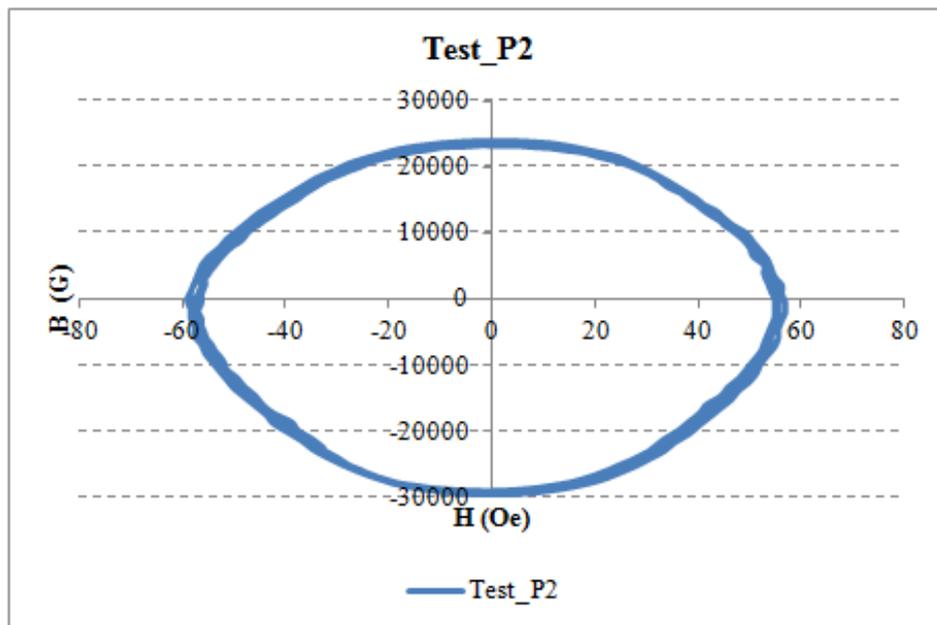


Figura 79 – Histerese das Chapas Padrão P2 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

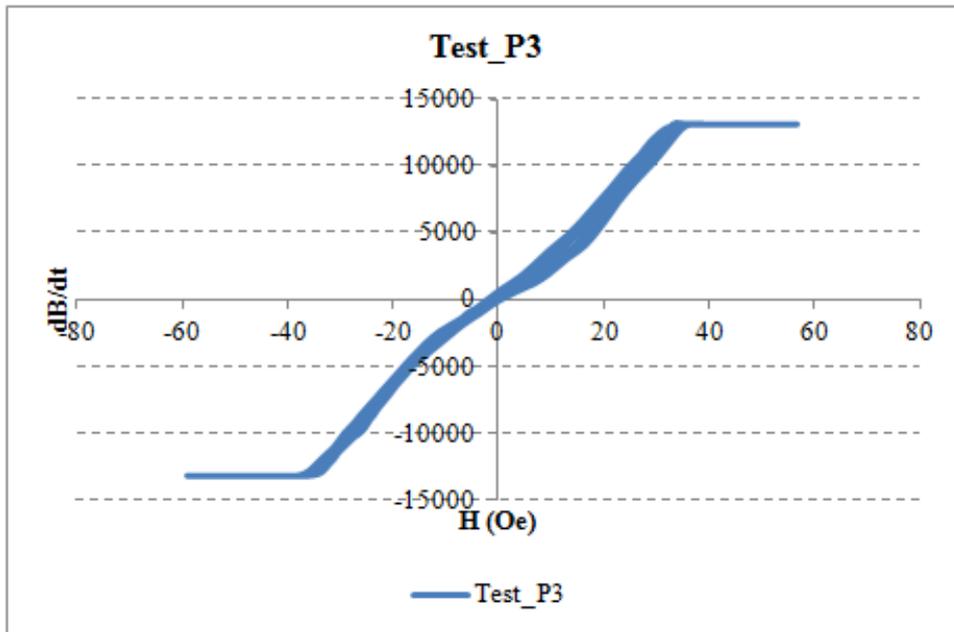


Figura 80 – Chapas Padrão P3 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

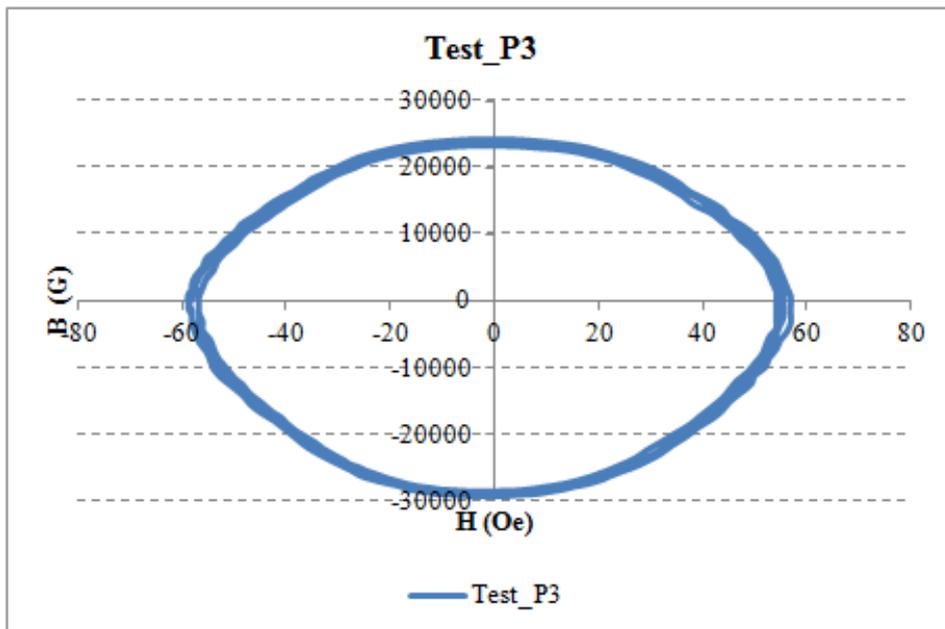


Figura 81 – Histerese das Chapas Padrão P3 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

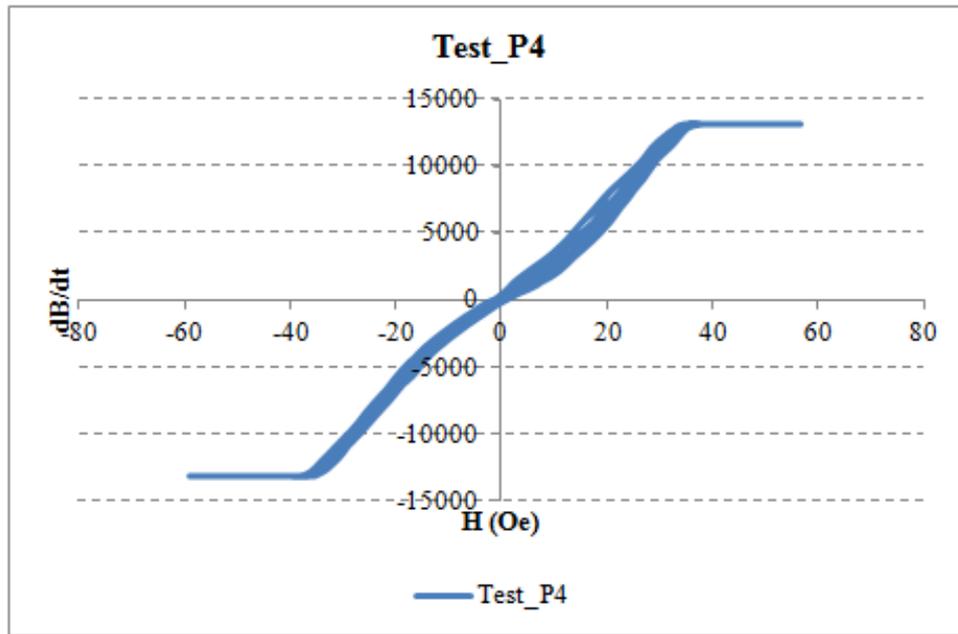


Figura 82 – Chapas padrão P4 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

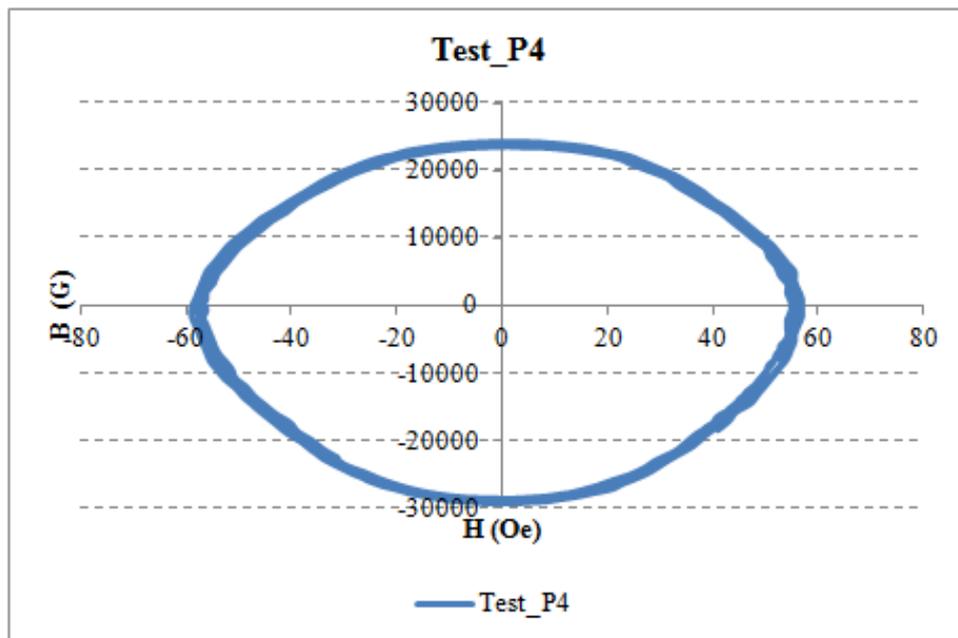


Figura 83 – Histerese das Chapas Padrão P4 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

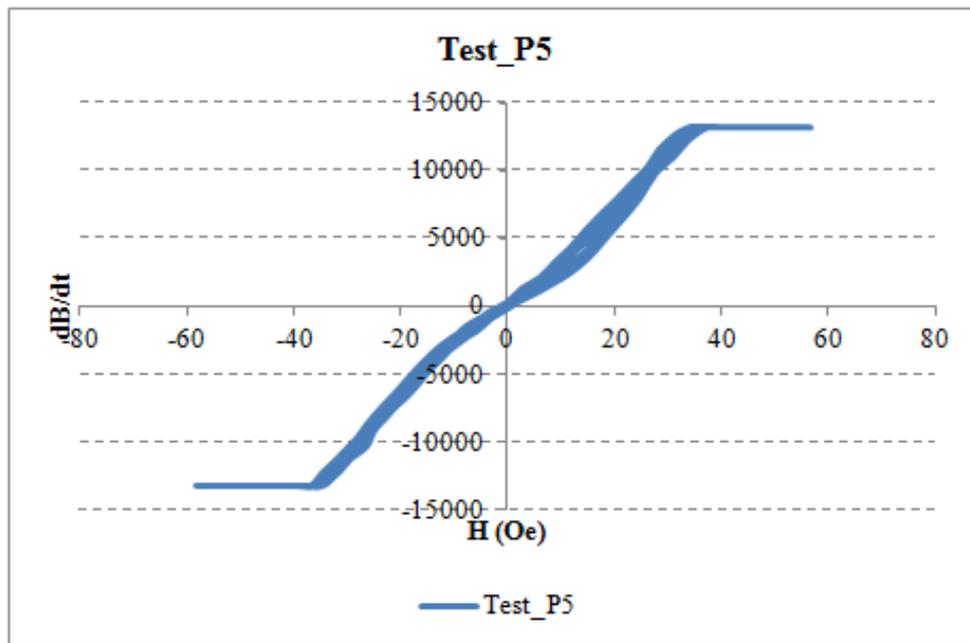


Figura 84 – Chapas Padrão P5 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

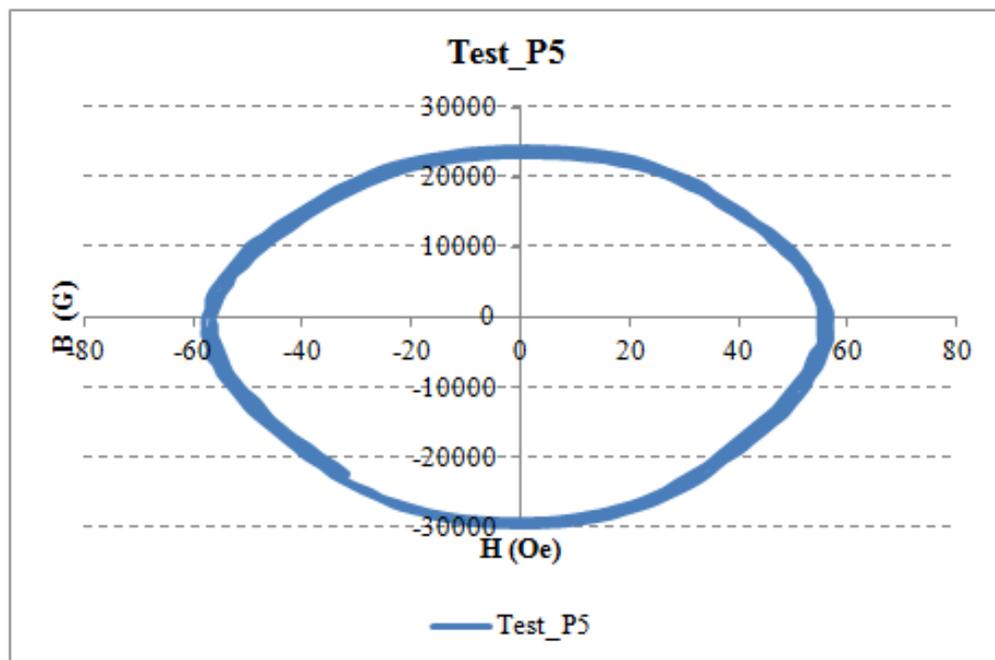


Figura 85 – Histerese das Chapas padrão P5 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

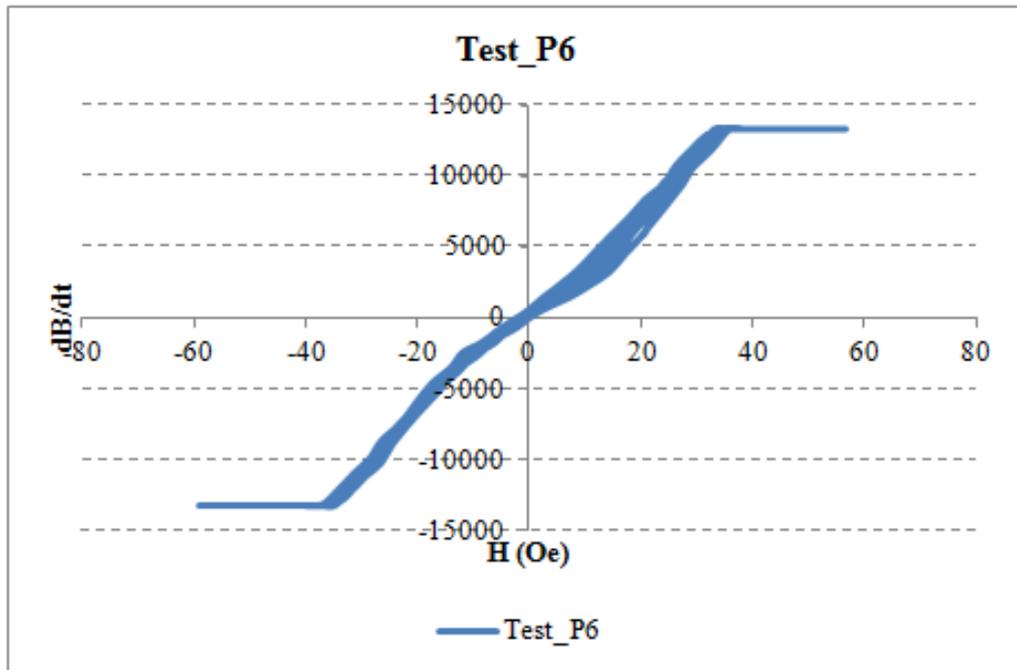


Figura 86 – Chapas Padrão P6 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

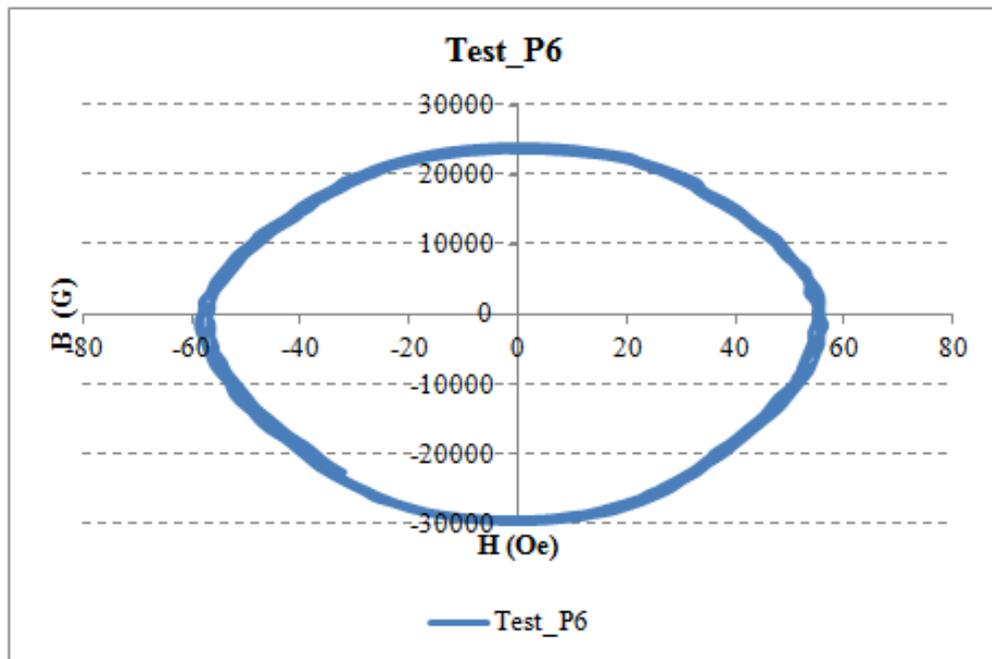


Figura 87 – Histerese das Chapas Padrão P6 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

O resultado, no gráfico  $dB/dt \times H$ , figura 88, campo magnético aplicado  $\times$  fluxo magnético, para peças padrão CF determina uma saturação magnética próxima a 1,5 T. O

gráfico de histerese, figura 78, peças-padrão Teste CF1 até CF6, figura 99, apontam para resultados próximos a 2,0 T, o que configura um processo também muito eficiente, pois as deformações apresentadas na borda da chapa são insuficientes para diminuir a resposta às perdas magnéticas, comprovadas pelas respostas na “Bancada de Epstein”. Logo, as chapas padrão P1 até P6 e CF1 até CF6, configuram resultados semelhantes para as mesmas aplicações.

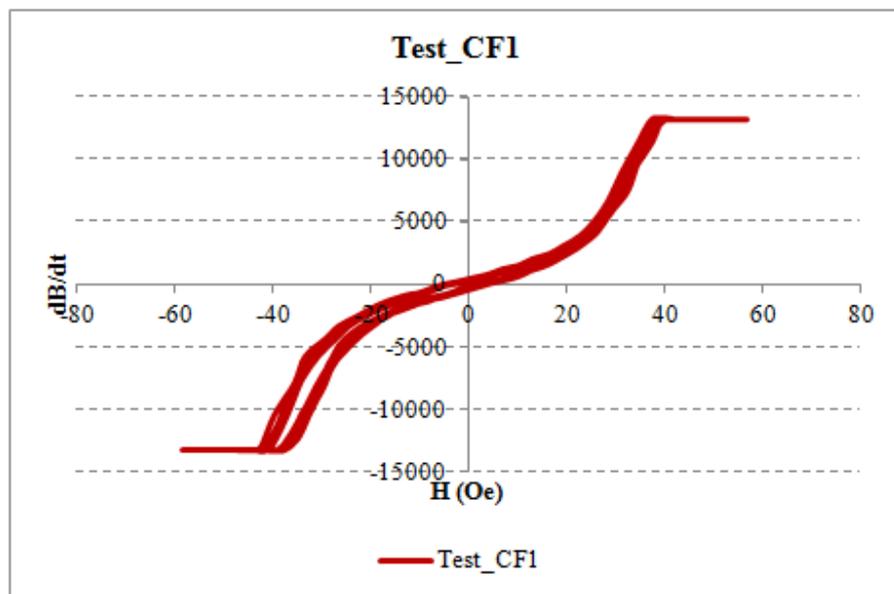


Figura 88 – Chapas Corte a Fio 1 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

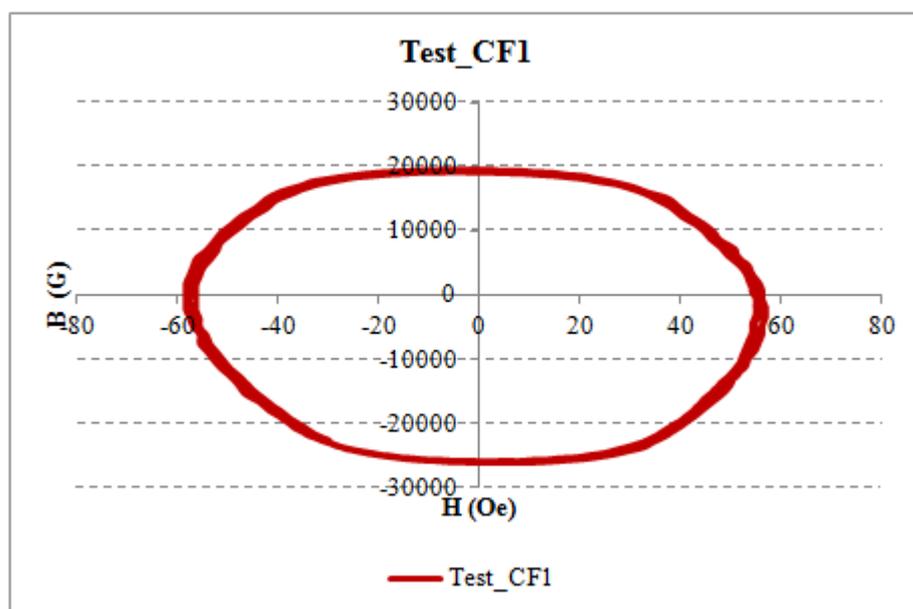


Figura 89 – Histerese das Chapas Corte a Fio 1 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

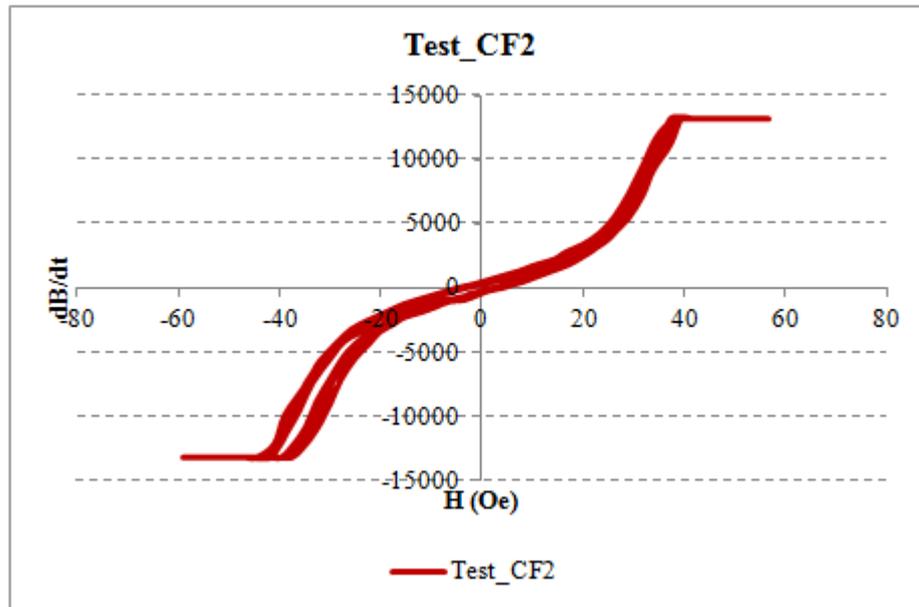


Figura 90 – Chapas Corte a Fio 2 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas a Saturação Magnética

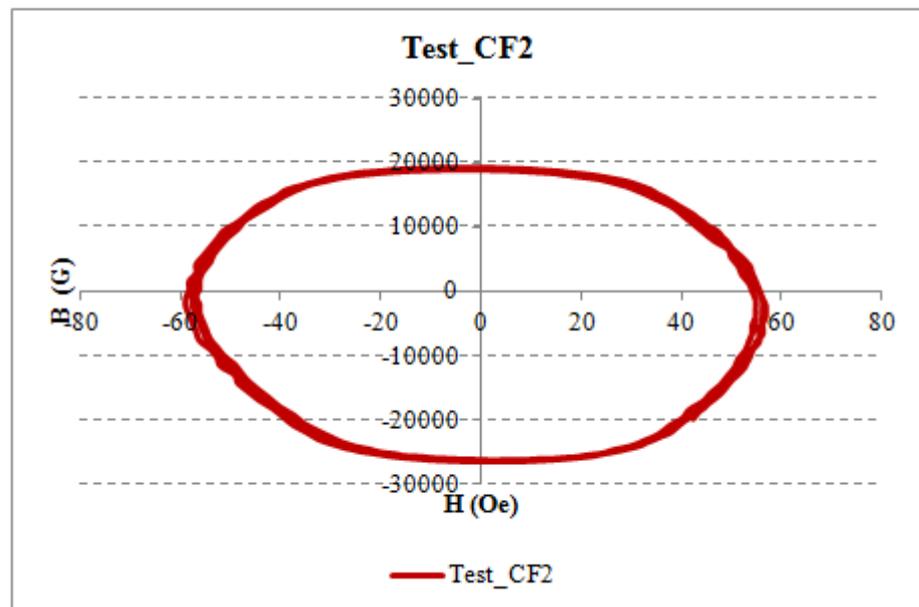


Figura 91 – Histerese das Chapas Corte a Fio 2 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

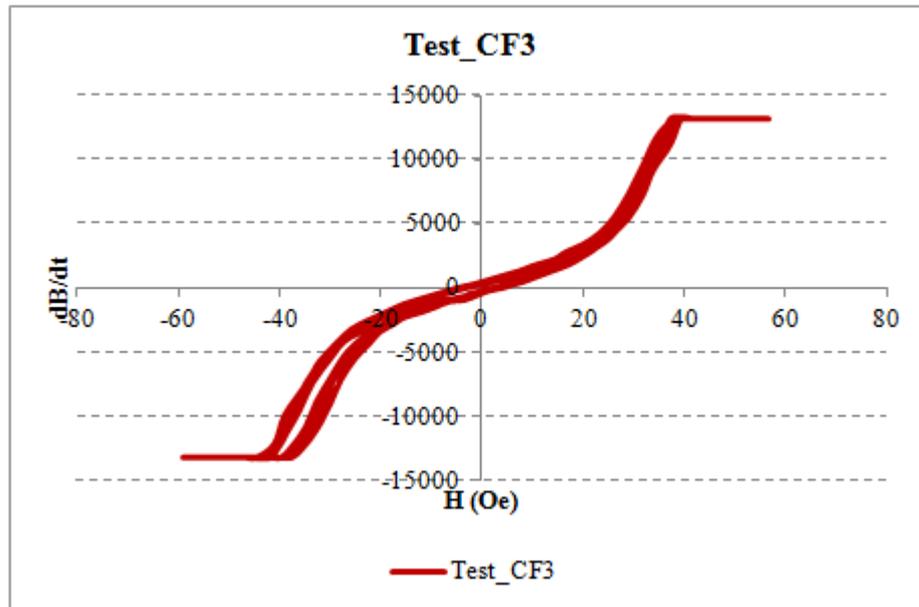


Figura 92 – Chapas Corte a Fio 3 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas a Saturação Magnética

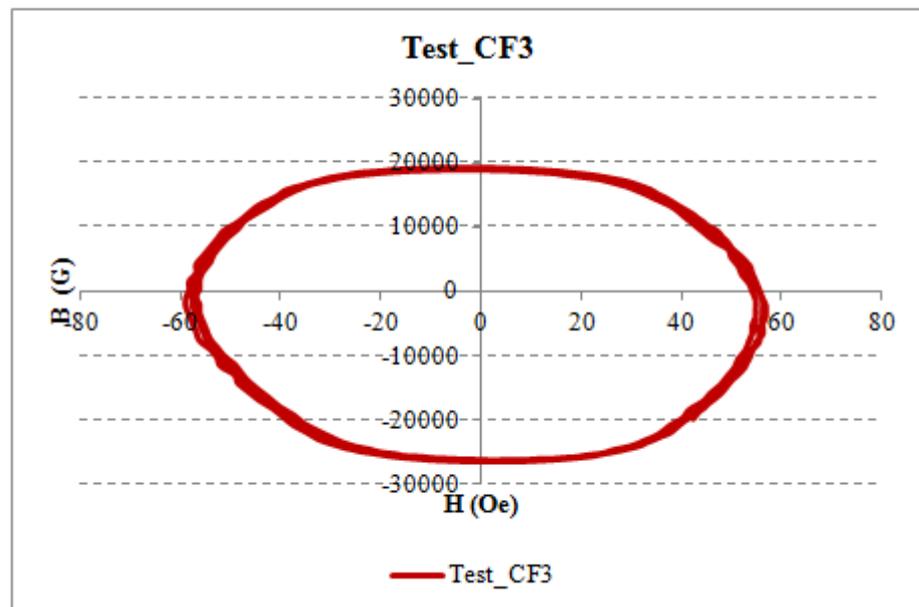


Figura 93 – Histerese das Chapas Corte a Fio 3 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

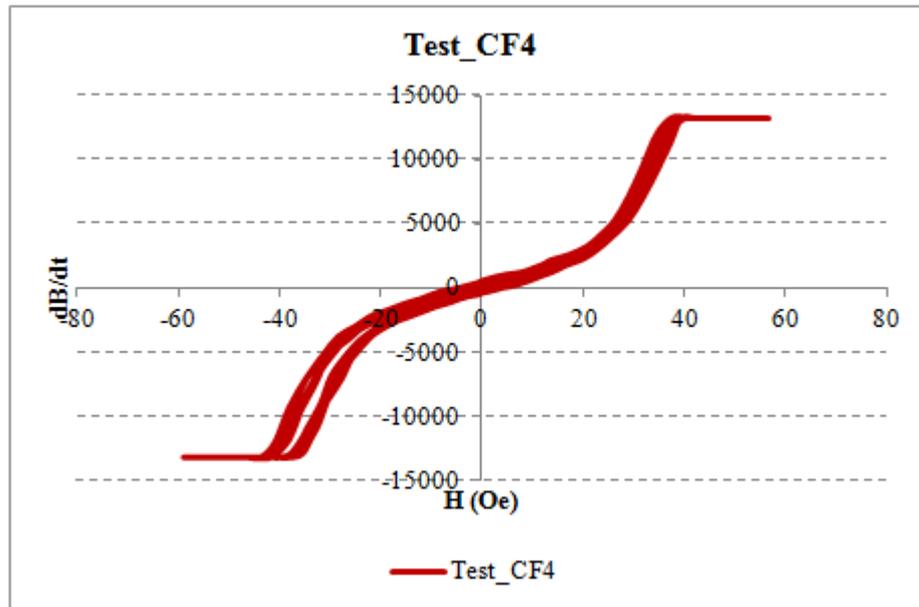


Figura 94 – Chapas Corte a Fio 4 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas a Saturação Magnética

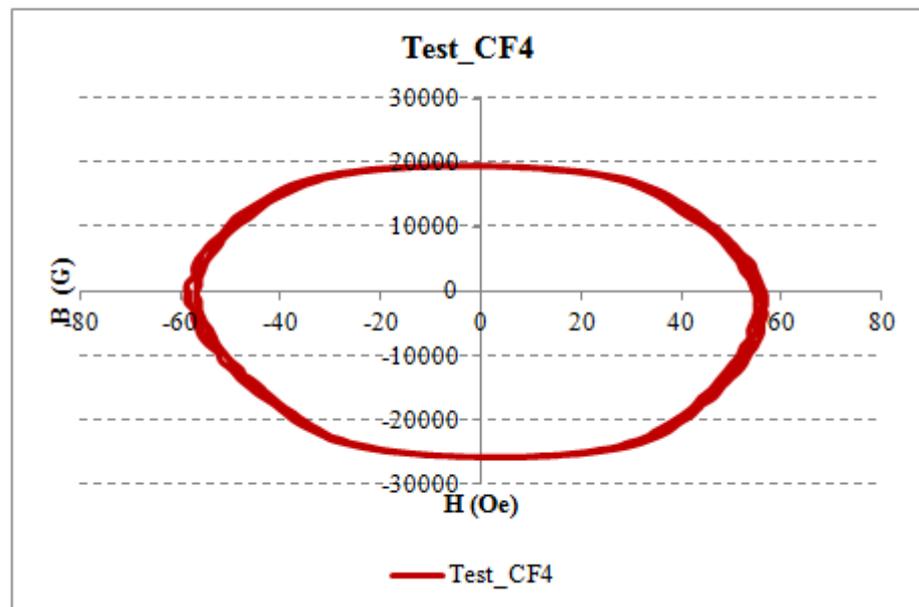


Figura 95 – Histerese das Chapas Corte a Fio 4 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

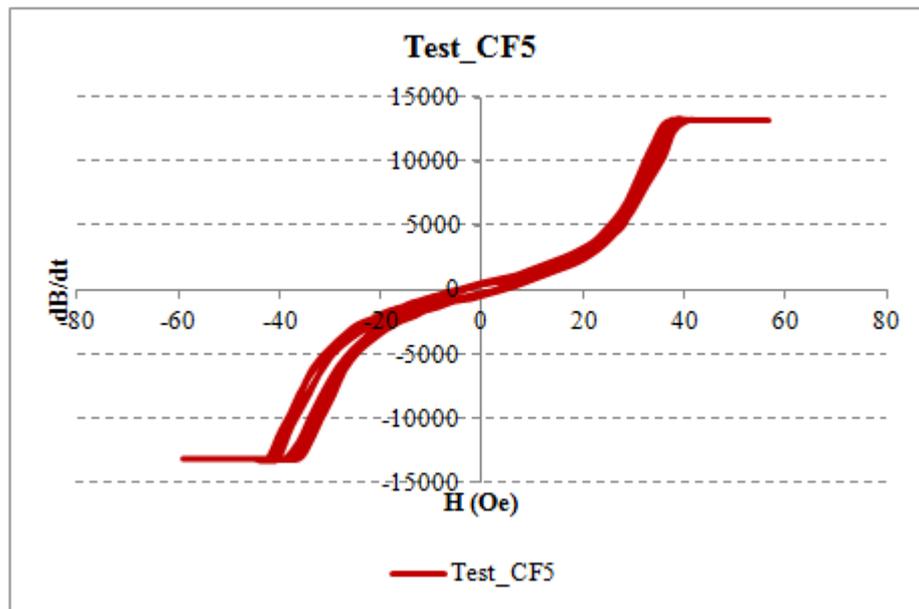


Figura 96 – Chapas Corte a Fio 5 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas a Saturação Magnética

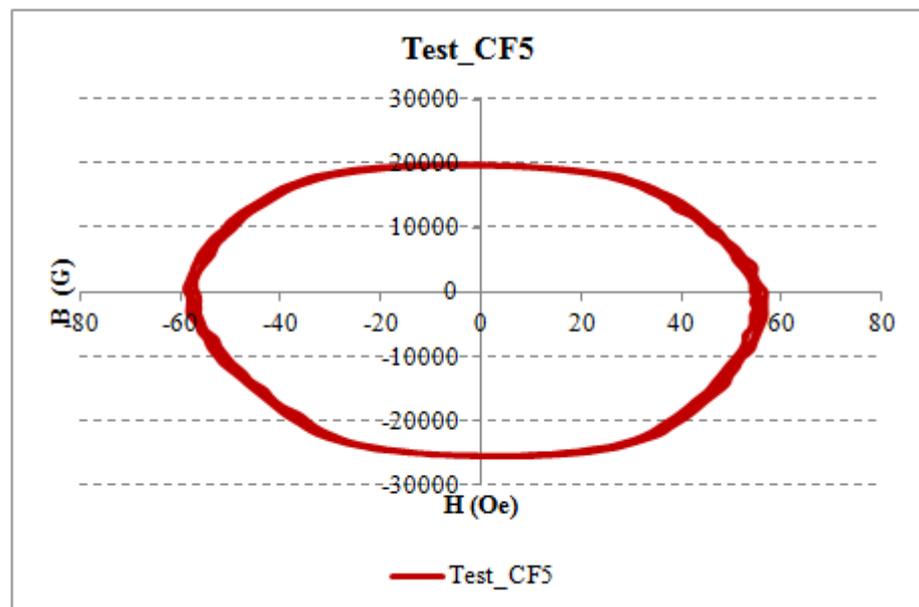


Figura 97 – Histerese das Chapas Corte a Fio 5 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

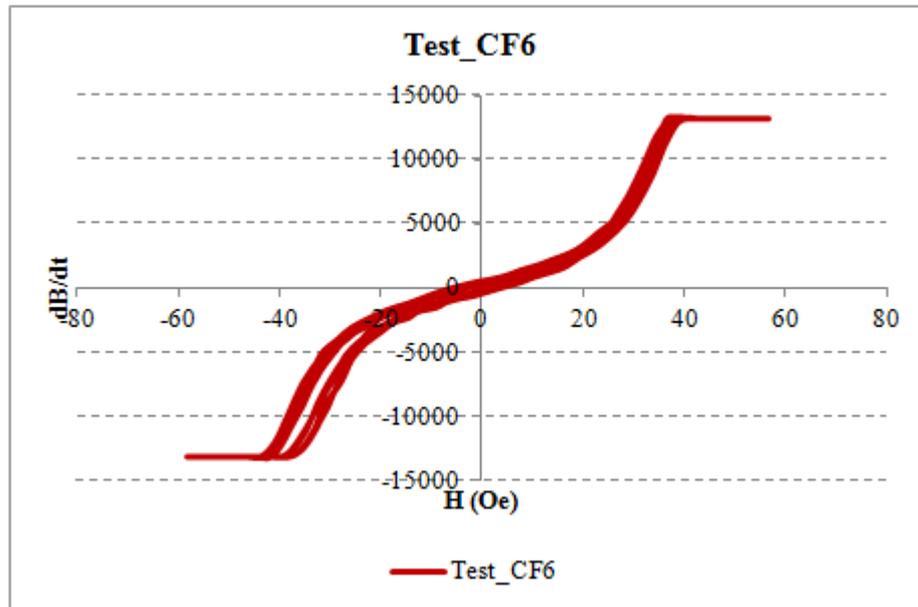


Figura 98 – Chapas Corte a Fio 6 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas a Saturação Magnética

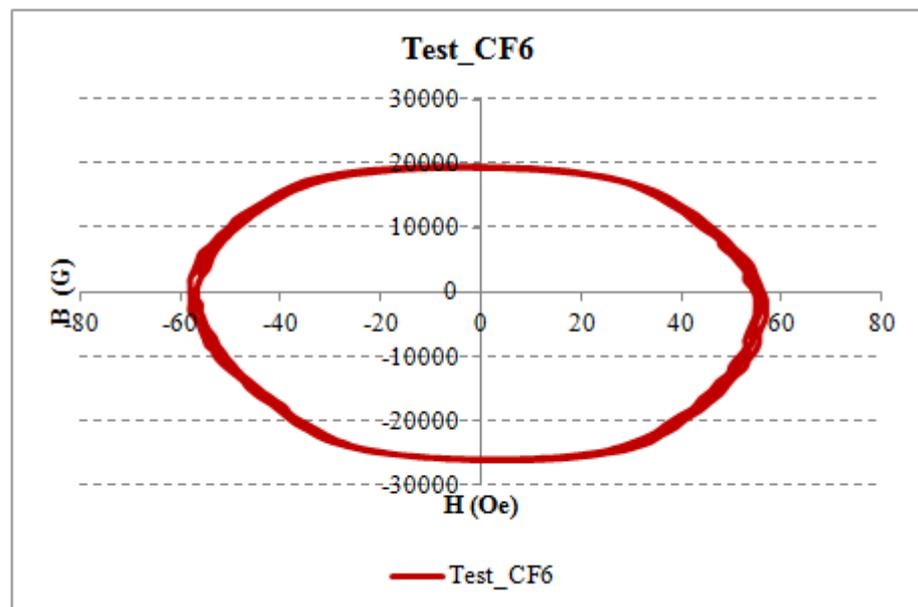


Figura 99 – Histerese das Chapas Corte a Fio 6 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

A imagem, figura 100, mostra uma textura muito homogênea quando comparada com a peça padrão “P” ou corte a fio “CF”, com grãos de FeSi distribuídos tanto longitudinal como transversalmente em toda a textura da chapa, oportunizando uma boa permeabilidade e diminuição das perdas em ambas as direções, mesmo considerando as deformações

proporcionadas pelo corte convencional, ou seja, as amostras, CC1, figura 101 até CC6, figura 112, o resultado no gráfico  $dB/dt \times H$ , para todas as chapas, determina uma saturação magnética também muito próximas de 1,5 T, ou seja, semelhantes as chapas “P” e “CF”. Os gráficos de histerese, das peças Teste CC1 até CC6, apontam para resultados próximos a 2,0 T, o que avaliza um processo interessante e eficiente para esta aplicação, considerando que o processo convencional de corte elimina etapas de processamentos mais dispendiosos. As respostas para chapas não processadas e com utilização do corte convencional apresentam perdas por histerese muito semelhantes as demais e estão de acordo com as altas induções magnéticas necessárias para utilização em equipamentos que requerem alto rendimento.



Figura 100 – Chapas aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

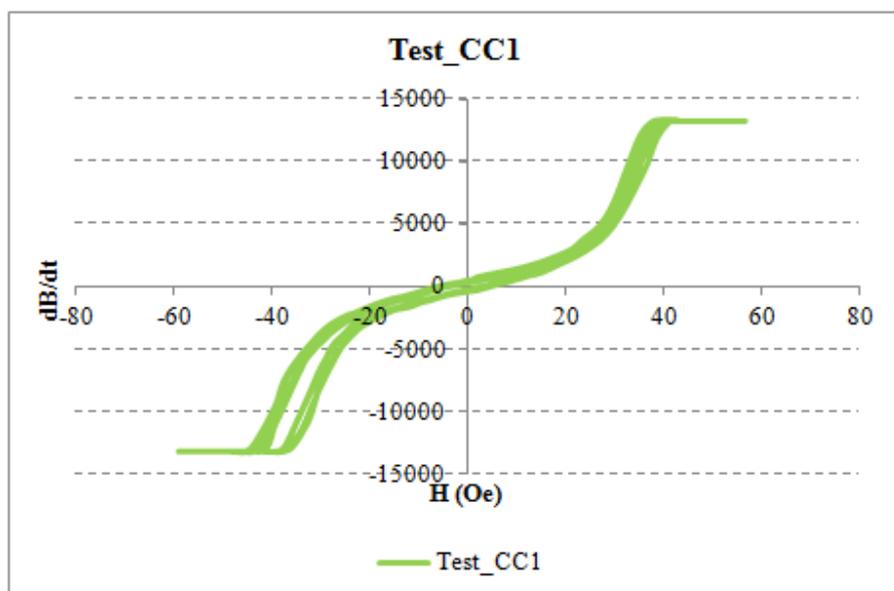


Figura 101 – Chapas Corte Convencional 1 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

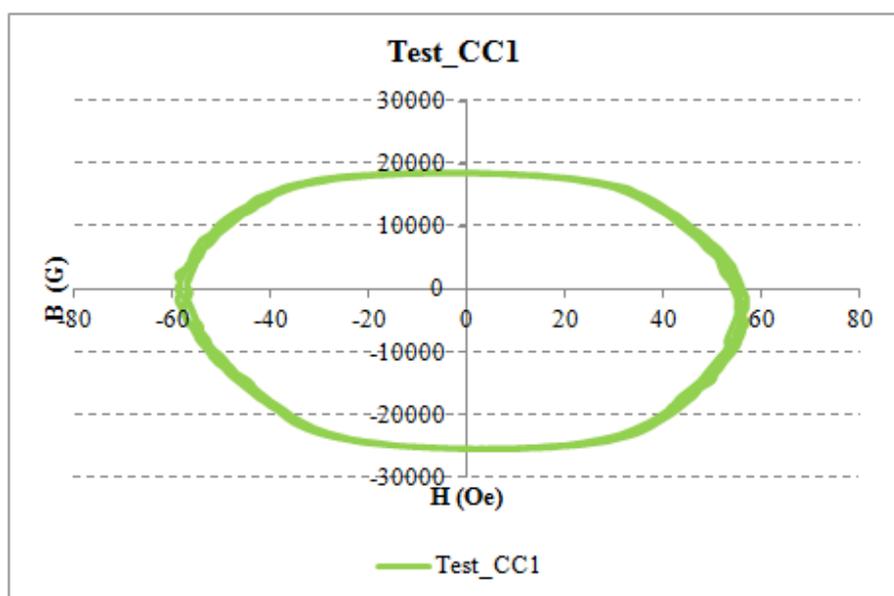


Figura 102 – Histerese das Chapas Corte Convencional 1 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

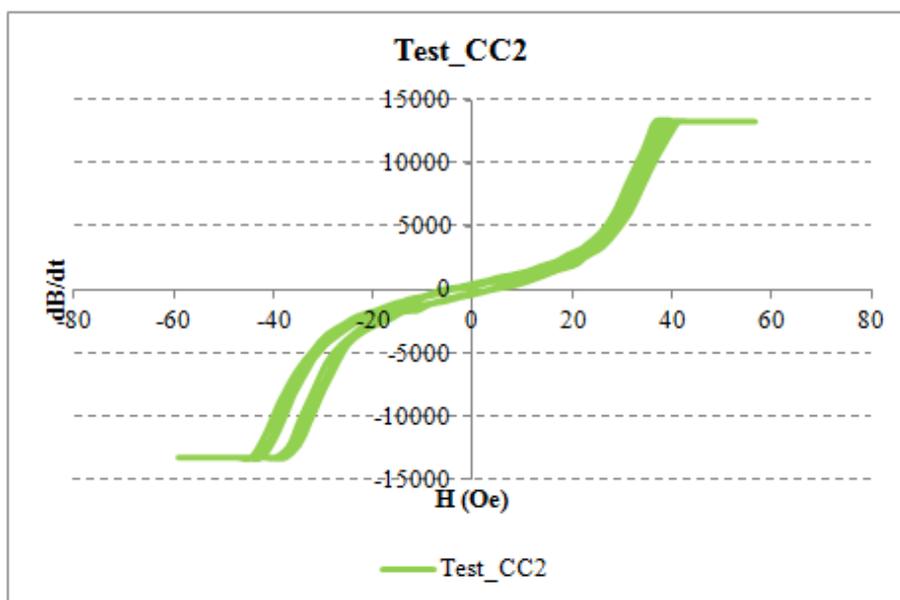


Figura 103 – Chapas Corte Convencional 2 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

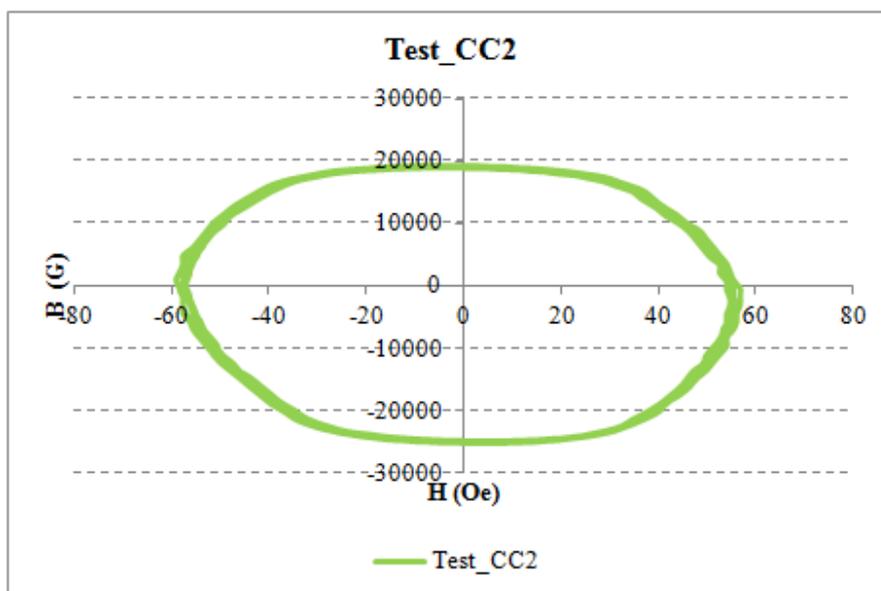


Figura 104 – Histerese das Chapas Corte Convencional 2 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

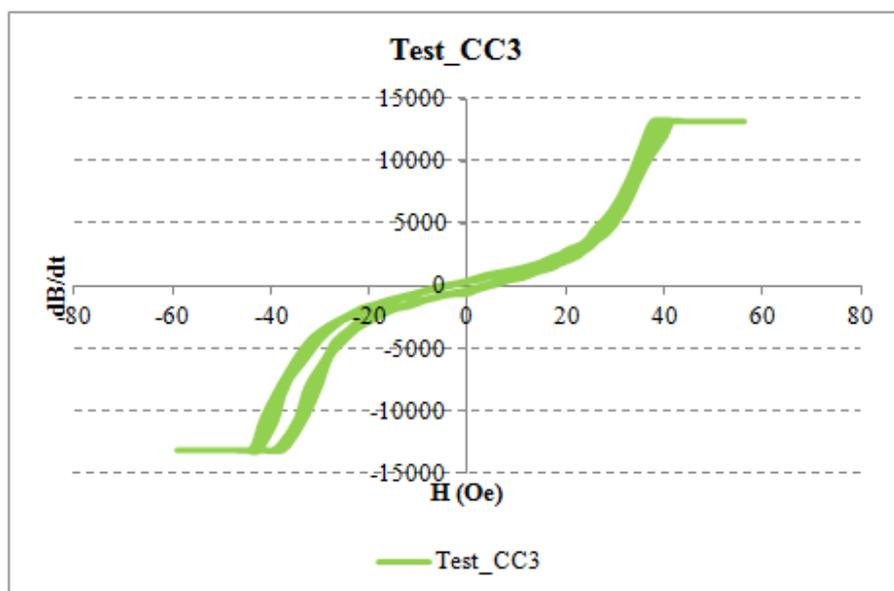


Figura 105 – Chapas Corte Convencional 3 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

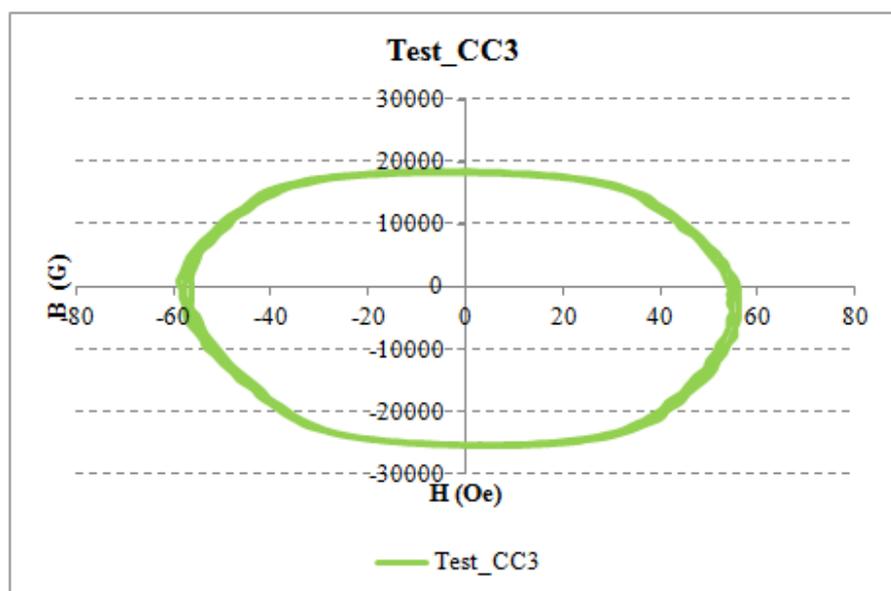


Figura 106 – Histerese das Chapas Corte Convencional 3 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

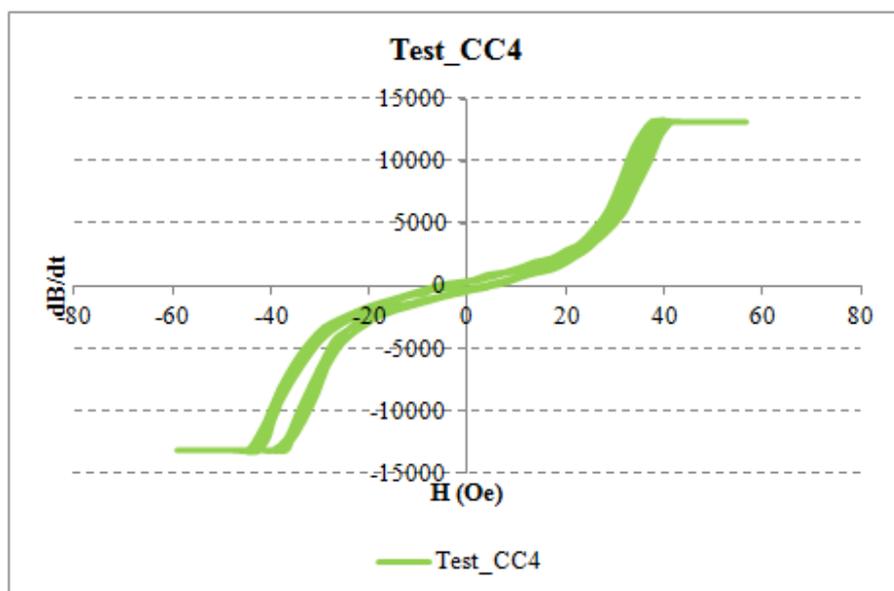


Figura 107 – Chapas Corte Convencional 4 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

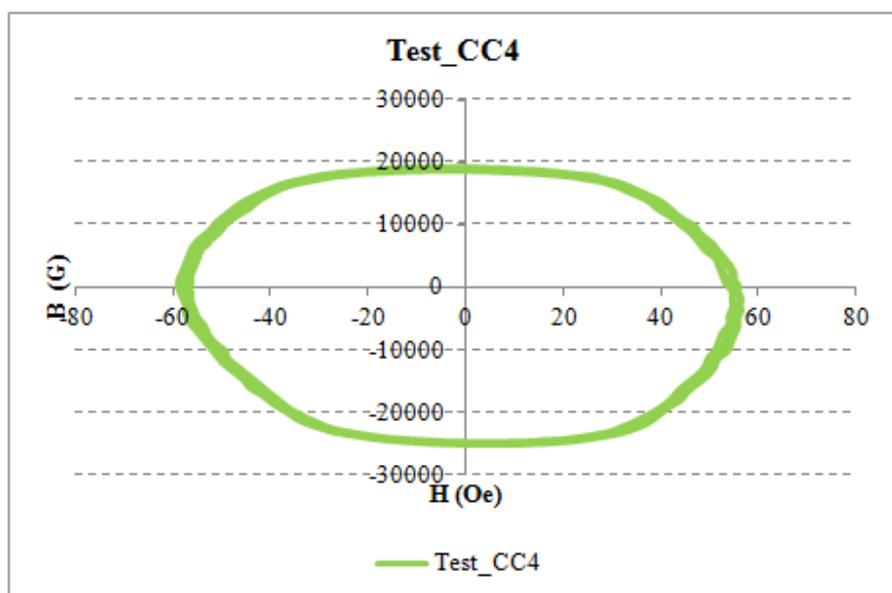


Figura 108 – Histerese das Chapas Corte Convencional 4 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

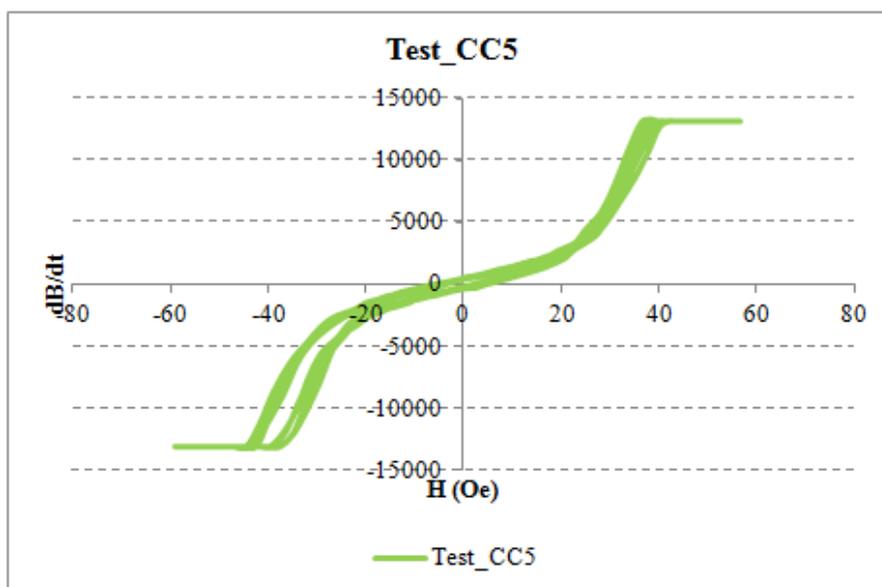


Figura 109 – Chapas Corte Convencional 5 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

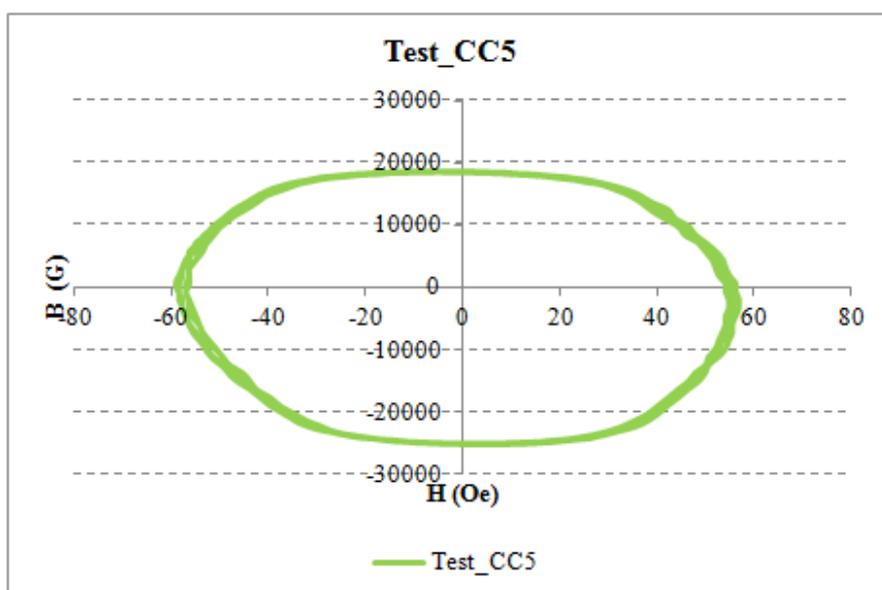


Figura 110 – Histerese das Chapas Corte Convencional 5 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

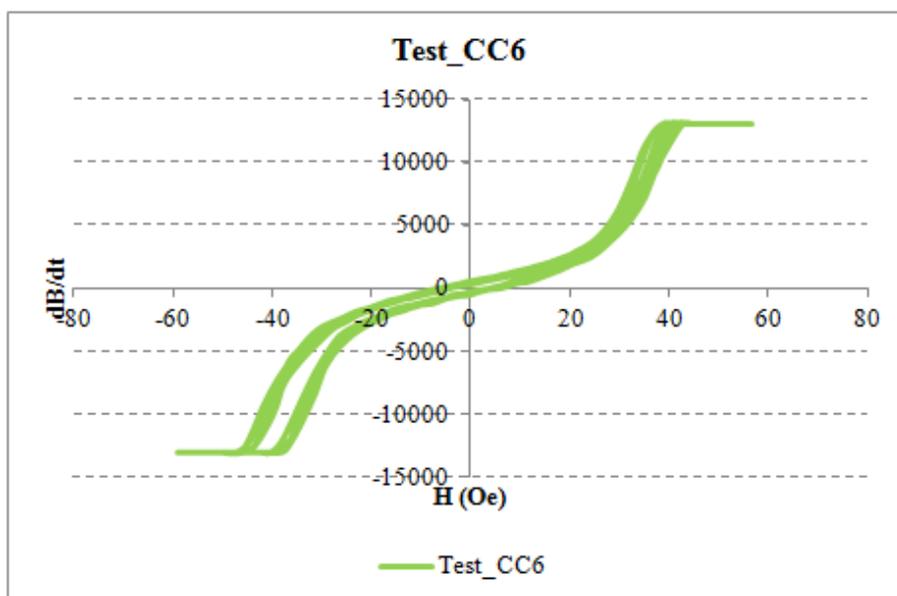


Figura 111 – Chapas Corte Convencional 6 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

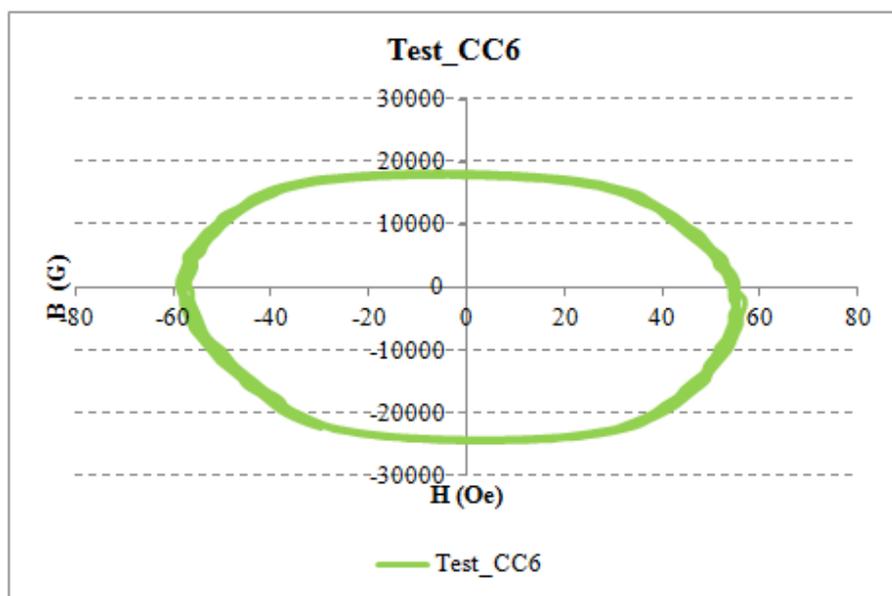


Figura 112 – Histerese das Chapas Corte Convencional 6 Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

Conforme os resultados obtidos, a figura 113, demonstrada pela curva  $dB/dt \times H$ , tanto o material padrão P, CF e CC, apresentaram curvas de magnetização entre 1,0 T e 1,5 T, justificando o tratamento térmico utilizado. As peças que foram fornecidas pelo processo de corte convencional, proporcionaram resultados significativos em razão de não terem sofrido um processo de corte com acabamento que eliminasse os amassamentos de borda.

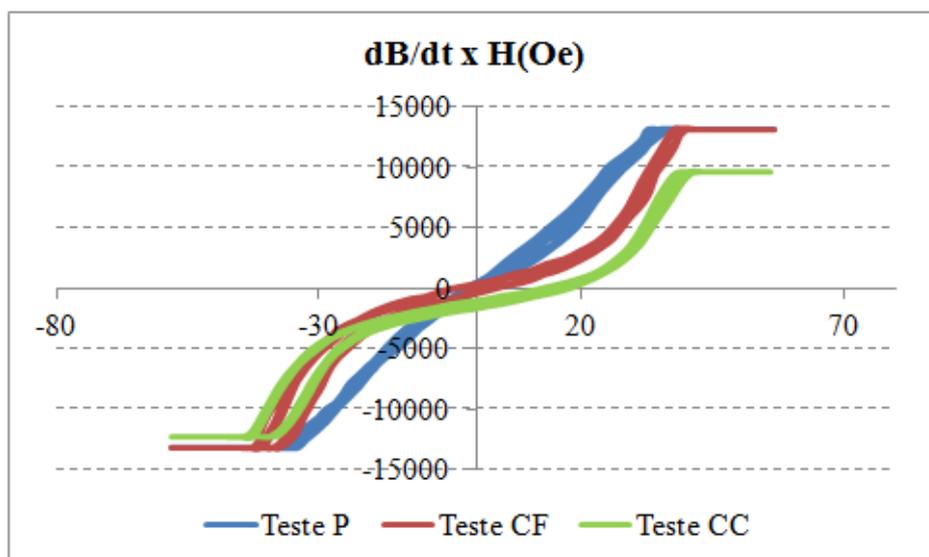


Figura 113 – Chapas Padrão “P”- Corte a Fio “CF” - Corte Convencional “CC” Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na Bancada Submetidas à Saturação Magnética

Através do gráfico de histerese, figura 114, o resultado proporcionado pelo tratamento térmico conjugado com a indução magnética (RCIM), confirma a boa prática, ou seja, diminui ou elimina a necessidade de um processo de corte a fio “CF”. O processo de corte convencional “CC” atingiu as mesmas propriedades em comparação com os processos não convencionais.

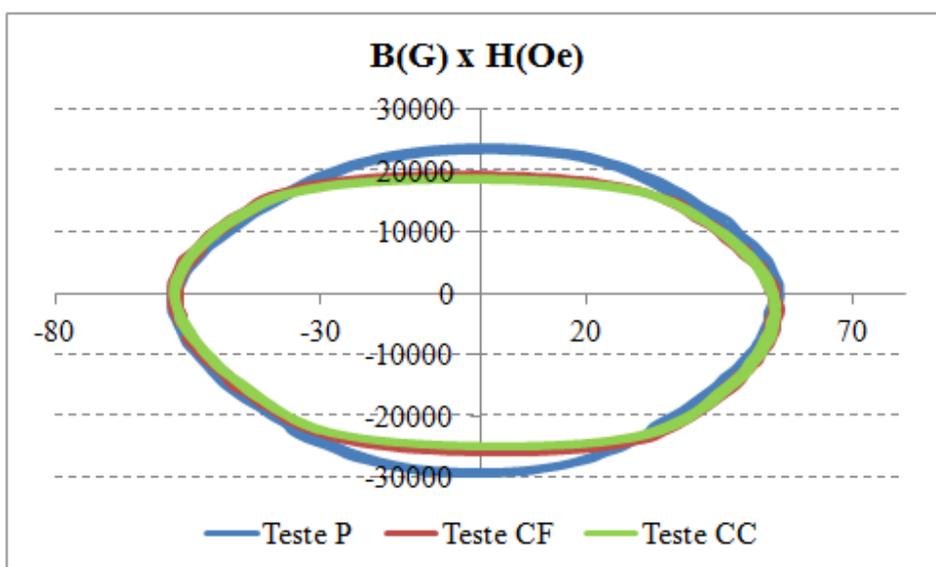


Figura 114 – Histerese das Chapas Padrão “P”- Corte a Fio “CF” - Corte Convencional “CC” Aço ABNT NM71-2000/ 35F 420M na “Bancada de Epstein” - Submetida à Saturação Magnética

## 4.2 CARACTERIZAÇÕES DAS PEÇAS QUE SOFRERAM O PROCESSO DE RECOZIMENTO CONJUGADO COM INDUÇÃO MAGNÉTICA (RCIM).

Os resultados obtidos a partir do RCIM levam a concluir que as perdas magnéticas por histerese foram praticamente as mesmas, considerando-se a eficiência do processo e também os fatores que modificaram para melhor o seu desempenho.

O fato das amostras nas quais foi aplicado o processo de recozimento conjugado com indução magnética, RCIM, 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).

Em chapas finas para uso em transformadores, isto quase sempre ocorre com sucesso, pois o processo de recozimento alivia as tensões do material estabilizando a rede cristalina.. Estes resultados se devem à obtenção da estrutura formada por grãos aciculares de ferrita bem distribuídos ao longo da toda a chapa. O recozimento conjugado com indução favorece ainda mais este objetivo, já que os domínios magnéticos passam a serem orientados mais facilmente em função do campo gerado ser muito intenso na região superficial da chapa e também afetando a borda de transferência do fluxo magnético. O caminho de orientação dos domínios magnéticos fica comprovado em função do ganho de permeabilidade e pelo resultado da diminuição das perdas por histerese, já que o material sem ser processado adquire propriedades semelhantes ao totalmente processado.

O tratamento de recozimento conjugado com indução, RCIM, induz modificações nas propriedades magnéticas do material, o que deve facilitar a análise dos resultados dos ensaios de permeabilidade magnética no futuro.

## 4.3 CORRELAÇÕES ENTRE PERMEABILIDADE E CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICO-METALÚRGICAS

O experimento mostra que durante o processo de RCIM ocorre uma reorganização que é observada na medida em que a temperatura de recozimento avança e se aproximando de

900°C por 1 hora. A estrutura apresenta um tamanho de grão médio de 150  $\mu$  m, diminuindo as perdas magnéticas, como era esperado. As perdas nesta etapa, já são conhecidas e podem ser por histerese, correntes parasitas e anômalas. As perdas por histerese são as que dificultam em muito o movimento dos domínios magnéticos e por esta razão a indução magnética reorienta os domínios e também registra um caminho a ser percorrido quando este é aplicado por mais vezes.

O recozimento feito em etapas, mostra que a reorganização da textura das chapas elétricas de FeSi é determinante, visto que o controle do aquecimento e resfriamento tem importância maior e influência determinante neste fator e permite, de uma forma mais segura, fazer com que os seus domínios magnéticos permaneçam orientados e controlados durante todo o processo de RCIM.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho possibilita o uso do recozimento conjugado com a indução magnética (RCIM), do FeSi, a fim de obter um aumento na sua permeabilidade magnética viabilizando seu uso dentro dos núcleos magnéticos destes equipamentos, bem como buscar uma redução das perdas totais, desconsiderando as propriedades químicas que venham a compor cada tipo de chapa elétrica, dentre outros elementos relevantes ao material.

O recozimento ofereceu um ganho considerável no rearranjo da estrutura do material, podendo-se inferir ganhos na Permeabilidade Magnética. Quando foi observada a mudança da estrutura para uma totalmente modificada, isto devido ao aquecimento entre as faixas de temperatura até aproximadamente 770°C, ou seja, próximo ao “Ponto Curie”. Nesta faixa de temperatura observa-se um aumento da indução magnética “B” para os materiais magnéticos e uma diminuição da força magnética “H. Após a temperatura de 770°C até 910°C, deve-se observar no decorrer deste trabalho uma queda na indução magnética “B”, completando-se, então, a etapa final do processo com um resfriamento lento.

Também se obteve como resultado importantes valores de resistividade “ $\rho$ ” na ordem de  $3,6 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$  para as chapas padrão “PLP e PTP” e  $3,5 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$  para as chapas com RCIM “LC e TC”, o que caracteriza a chapa com excelentes valores de resistividade para o mesmo material utilizado, ou seja, não houve alteração nestes valores que diminuíssem sua eficiência.

Considerando que a Norma ASTM A343/A343M - 03 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2008a), Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic Properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter-Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame, 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. O melhor indicador do desempenho 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 mais bem avaliada quando se realiza 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 à 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.

## **6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

- a) Utilização do equipamento de RCIM para desenvolvimento e seleção de materiais ferromagnéticos de alto desempenho;
- b) Pesquisa sobre as relações da forma do núcleo magnético com o alinhamento dos domínios através do RCIM;
- c) 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;
- d) Pesquisa sobre o rendimento elétrico de motores de grande porte, quando seus núcleos magnéticos são submetidos ao processo de RCIM.

## REFERÊNCIAS

ARCELORMITTAL INOX BRASIL. **Electrical steels grain oriented silicone steels non-oriented silicon steels**. Minas Gerais, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5161 - 1981** “Produtos laminados planos de aço para fins elétricos” - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9025 - 1985** “Produtos planos de aço para fins elétricos, de grão orientado, totalmente processados” – Especificação. Rio de Janeiro, 1985.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A395**: Standard Specification for Ferritic Ductile Iron Pressure-Retaining Casting for Use at Elevated Temperatures. Philadelphia, 1993.

\_\_\_\_\_. **ASTM A343/A343M – 03**. Reapproved 2008. Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic Properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter-Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame. Pennsylvania, 2008.

\_\_\_\_\_. **ASTM A34/34M**: Practice for Sampling and Procurement testing of Magnetic Materials. Pennsylvania, 2008.

\_\_\_\_\_. **ASTM A340**: Terminology of Symbols and Definitions Relating to Magnetic Test. Pennsylvania, 2008.

\_\_\_\_\_. **ASTM A667**: Specification for Nonoriented Electrical Steel Fully Processed Types. Pennsylvania, 2008.

\_\_\_\_\_. **ASTM A683**: Specification for Nonoriented Electrical Steel Semi-Processed Types. Pennsylvania, 2008.

\_\_\_\_\_. **ASTM A876**: Specification for Flat-Rolled, Grain-Oriented, Silicon-Iron, Electrical Steel, Fully Processed Types. Pennsylvania, 2008.

\_\_\_\_\_. **ASTM A889/A889M**: Test Method for Alternating-Current Magnetic Properties of Materials at Low Magnetic Flux Density Using the Voltmeter-Ammeter-Wattmeter-Varmeter Method and 25-cm Epstein Frame. Pennsylvania, 2008.

\_\_\_\_\_. **ASTM E177**: Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods. Pennsylvania, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E691**: Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the precision of Test Method. Pennsylvania, 2008.

\_\_\_\_\_. **ASTM E1338**: Guide for Identification of Metals and Alloy in Computerized Materials Properties Database. Pennsylvania, 2008.

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

\_\_\_\_\_. **ASTM A 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.

BACALTCHUK, C. M. B.; **Effect of magnetic annealing on texture and microstructure development in silicon steel**. Tallahassee: Florida State University, 2004.

BACALTCHUK, C. M. B.; BRANCO, G. A. C.; GARMESTANI, H. High magnetic field effect on texture and grain growth of GNO silicon steel. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, Alemanha, v. 36, n. 10, p. 561-565, 2005.

BACALTCHUK, C. M. B.; BRANCO, G. A. C.; GARMESTANI, H. Grain Boundary Misorientation and CSL in Magnetically Annealed Fe-0.75%Si. In: ICOTOM 15, 2008, Pittsburg. **Materials Processing and Texture- Ceramic Transactions**, v. 200, p. 405-412, 2008a.

BACALTCHUK, C. M. B. et al. Efeito do recozimento magnético acima da  $T_c$  em aço elétrico. In: CBECIMAT, 18., 2008, Porto de Galinhas. **Anais**. 2008b.

BACALTCHUK, C. M. B. et al. **Microstructure evaluation after magnetic annealing of electrical steel**. In: CBECIMAT, 20., 2010. **Anais**. 2010

BATISTELA, N. J. et al. Caracterização magnética de lâminas de silício e avaliação das perdas no ferro sob vários regimes de indução. **SBA Controle & Automação**, Campinas, v. 13, n.2, p. 156-164, 2002.

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.

BECKLEY, P. **Electrical steels for rotating machines**. London: Institution of Engineering and

Technology, 2002.

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.

BOHN, F. et al. Propriedades magnéticas de aços elétricos de grão não-orientado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 16., 2004, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre, 2004.

BOHN, F. **Magnetostricção e ruído barkhausen em aços elétricos de grão não-orientado**. 2005. Dissertação (Mestrado em Física) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

BOLL, R. Soft magnetic metals and alloy. In: CAHN, R. W.; HAASEN P.; KRAMER, E.J. **Materials science and technology: a comprehensive treatment**. Weinheim: VCH, 1992. v. 3B, p. 339-450.

BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism**. Nova York: IEEE Magnetic Society, 1986.

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

BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism**. New York: IEEE Press, 1993.

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.

BUYS, Bruno. Desenvolvimento de aços elétricos para abrir novos mercados. **Inovação Unicamp**, v. 2, n. 5, p. 18-19, nov./dez. 2006.

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

CASTRO, N. A. **Controle da textura e microestrutura durante o processamento de aços elétricos semiprocessados**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

CATARINO, J. **Electrotecnia-magnetismo**. Setúbal: Escola Superior de Tecnologia, 2008.

CHAUDHURY, A. et al. Low silicon non-grain-oriented electrical steel: Linking magnetic properties with metallurgical factors. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 313, p. 21-28, 2007.

CHEN, C. W. **Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials**. New York: Dover, 1986.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 4. ed. São Paulo: ABM, 1977. p. 361-380.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 1996.

CHIKAZUMI, S.; GRAHAM, C. D. Jr. **Magnetism and metallurgy**. New York: Academic Press, 1969. v. 2.

CUNHA, Marco A. da; PAOLINELLI, Sebastião C. Effect of the annealing temperature on the structure and magnetic properties of 3% si non-oriented steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 254-255, p. 379-381, 2003.

CULLITY, B.D. **Elements of X-ray diffraction**. Reading: Addison-Wesley, 1972.

DORNER, D. et al. Nichtkornorientiertes (NO-) Elektrobund zur Herstellung von elektrischen Antrieben für Kraftfahrzeuge. **Thyssen Krupp techforum**, v. 1, p. 29-33, 2009.

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.

FALLEIROS, I. G. S; CAMPOS, M. F. Nucleação da recristalização. In: TSCHIPTSCHIN A (Ed.). P. et al. **Textura e relações de orientação: deformação, recristalização, crescimento de grão**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2001. p. 39-48.

FILARDO, J. V. **Perdas magnéticas**. Curitiba: UFPR, 2008.

FIORILLO, F. **Measurement and characterization of materials**. New York: 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.

HP VEE REALISE 9.32. **Hewlett-Packard Visual Engineering Environment (HP VEE)**. Versão/9.32. 2013.

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.

IPT. Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos. **Aços carbonos e aços silícios para fins elétricos.** São Paulo, 2001.

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.

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

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

LANDGRAF, F. J. G.; CAMPOS, M. F. de; LEICHT, J. Hysteresis Loss Subdivision. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 320, n. 20, p. 2494-2498, 2008.

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, p. 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.

LANDGRAF, F. J. G; TAKANOHASHI, R.; CAMPO, M. F. de. Tamanho de grão e textura dos aços elétricos de grão não-orientado. In: Workshop sobre textura e relações de orientação; São Paulo, 2001. v. 1, p. 161-188.

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.

LITTMANN, M. F. Iron and silicon-iron alloys. **IEEE Trans. Magn.**, v. MAG-7, n. 1, p. 48-60, 1971.

MARRA, K. M.; BUONO, V. T. Variação das Perdas Magnéticas Durante Envelhecimento de um Aço Elétrico. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 3, n. 1, p. 36-39, jul.-set. 2006.

MARTIKAINEN, H. O.; LINDROOS, V.K. Observations on the effect of magnetic field on the recrystallization in ferrit. **Scand. J. Metallurgy**, v. 10, p. 3-8, 1981.

MASAHASHI, N.; MATSUO, M.; WATANABE, K. Development of preferred orientation in annealing of Fe-3,25%Si in a high magnetic field. **J. Mater. Res.**, v. 13, n. 2, 1998.

MCCURRIE, R. A. **Ferromagnetic materials structure and properties**. London: Academic Press, 1994.

MELQUÍADES, S. R. **O Efeito do Carbono no Aumento do Tamanho de Grão e nas Propriedades Magnéticas de Aços Elétricos Semiprocessados após o Recozimento Final**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

METALS handbook: properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials, **ASM International**, v. 2, p. 2304-2327, 1990.

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.

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.

ROLLETT, A.D. et al. Approach to saturation in textured soft magnetic materials. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 32, n. 10, p. 2595-2603, 2001.

SANTOS, J.P. **Influência do ângulo de corte e da anisotropia nas propriedades magnéticas dos aços elétricos: efeito da textura**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

SHIMANAKA, H.; ITO, Y.; MATSUMURA, K.; FUKUDA, B. Recent development on nonoriented electrical steel sheets. **Journal of Magnetic Materials**, v. 26, p. 57-64, 1982.

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.

SILVA JÚNIOR, Pedro Armando da. **Bancada para ensaios de materiais -ferromagnéticos em chapa única sob campos rotacionais**. Florianópolis: UFSC, 2007.

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

SKORSKI, R. J. **Alabama Acad. Sci.**, v. 38, p. 13, 1967.

SOARES, M. **Eletromagnetismo II-60: magnetismo de materiais**. 2008.

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

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

TSCIPTSCHIN, A. P. et al. Influência da taxa de deformação na textura de um aço silício de grão não orientado. In: CONGRESSO DA ABM, 55., Rio de Janeiro. **Anais**, Rio de Janeiro: ABM, 2000. CD-ROM, p. 1461- 1470.

TUMANSKI, Slawomir. Modern magnetic material: the review. **Electrical Review**, v. 86, n. 4, p. 3-15, 2010.

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.

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.

WU, B. et al. The influence of texture and GBCD on stress corrosion and intergranular corrosion in 2024 aluminium alloy. **Solid State Phenomena**, v. 105, p. 181-186, 2005.

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

XU, Y. et al. Effects of high magnetic field on recrystallization and coarsening behavior in Fe-Si steels. **The Japan Institute of Metals**, p. 571-576, 1999.

YASHIKI, H.; KANEKO, T. Effect of hot-band annealing on anisotropy of magnetic properties in low-Si semi-processed electrical steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 112, p. 200-202, 1992.