

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.

**DESENVOLVIMENTO DE NÚCLEOS PARA TRANSFORMADORES
MONOFÁSICOS DE BAIXA POTÊNCIA PELA METALURGIA DO PÓ.**

CARLOS ANTÔNIO FERREIRA

**DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA**

Porto Alegre

2011

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

**DESENVOLVIMENTO DE NÚCLEOS PARA TRANSFORMADORES
MONOFÁSICOS DE BAIXA POTÊNCIA PELA METALURGIA DO PÓ.**

CARLOS ANTÔNIO FERREIRA

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre

2011

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr.-Ing Lírío Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr.-Ing Paulo Antonio Pereira Wendhausen - UFSC

Prof. Dr. Eng^o. Moises de Mattos Dias - FEESC

Prof. Dr. Eng^o. José Lesina César - ULBRA

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGEM

Dedico este trabalho

À minha esposa, Luciana Virginia
Peruch Ferreira.

AGRADECIMENTOS

Ao Grande Arquiteto do Universo, criador de todas as coisas que existiram, existem e existirão.

Ao Professor Dr. -Ing. LÍRIO Schaeffer, por ter acreditado no projeto, pela sua dedicação, paciência e amizade. Muito Obrigado, por todos os ensinamentos inerentes ao trabalho ou não.

A minha família, por apoiar todos os meus sonhos.

Ao Professor Moises de Mattos Dias, pelas contribuições e discussões a cerca do tema.

Ao Engenheiro Luciano Lohmann Cerva e ao Acadêmico Fábio Davi Lorenzoni, pela contribuição nos experimentos e trocas de experiências, sem as quais este trabalho não seria possível.

A todos os colegas da Faculdade SATC que trilharam este caminho antes de mim, sem dúvida foram grandes incentivadores, especialmente pelo exemplo e dedicação aos estudos.

A minha esposa Luciana Virginia Peruch pela insistente pergunta dominical “ E a tua Dissertação, como esta?”

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	2
2.1.1. INTRODUÇÃO.....	2
2.1.2. PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE MATERIAIS METÁLICOS	2
2.1.3. CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO	3
2.1.4. CURVAS DE HISTERESE	6
2.1.5. ANÁLISE DAS CURVAS B x H.....	7
2.1.6. CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS QUANTO A PERMEABILIDADE	9
2.2. PERDAS EM NÚCLEOS MAGNÉTICOS	10
2.2.1. INTRODUÇÃO.....	10
2.2.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	10
2.2.3. PERDAS POR HISTERESE E CORRENTES DE FOUCAULT	11
2.3. METALURGIA DO PÓ.....	14
2.3.1. INTRODUÇÃO.....	14
2.3.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS	14
2.3.3. OBTENÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	15
2.3.4. COMPACTAÇÃO	16
2.3.5. SINTERIZAÇÃO	16
2.3.6. CURA	17
2.4. MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS.....	18
2.4.1. INTRODUÇÃO.....	18
2.4.2. LIGAS MAGNÉTICAS CONVENCIONAIS	18
2.4.3. LIGAS MAGNÉTICAS SINTERIZADAS	21
2.5. TRANSFORMADORES	25
2.5.1. INTRODUÇÃO.....	25
2.5.2. MODELO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR	27

2.5.3. TRANSFORMADORES COM NÚCLEOS DE CHAPAS	29
2.5.4. TRANSFORMADORES COM NÚCLEOS MACIÇOS	30
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	32
3.1. OBTENÇÃO DOS NÚCLEOS DOS TRANSFORMADORES	32
3.1.1. INTRODUÇÃO.....	32
3.1.2. GEOMETRIA E MATRIZES DOS NÚCLEOS E E T	32
3.1.4. PREPARAÇÃO DOS PÓS	34
3.1.5. COMPACTAÇÃO	36
3.1.6. SINTERIZAÇÃO	37
3.1.7. CURA	38
3.1.7. TRANSFORMADORES OBTIDOS.....	38
3.2. ENSAIOS	42
3.2.1. INTRODUÇÃO.....	42
3.2.2. CURVAS DE HISTERESE	44
3.2.3. CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO	45
3.2.4. ENSAIOS DE DESEMPENHO NOS TRANSFORMADORES	45
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 PROPRIEDADES ELÉTRICAS.....	46
4.1.1. TENSÃO DE ENTRADA X TENSÃO DE SAÍDA.....	46
4.1.2 RELAÇÃO ENTRE AS PERDAS ELÉTRICAS E A CORRENTE NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR	48
4.1.3 RELAÇÃO ENTRE AS PERDAS MAGNÉTICAS E A CORRENTE NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR.	48
4.1.4 AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DOS TRANSFORMADORES.....	49
4.1.5 PERDAS ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS COM CARGA.....	50
4.1.6 – RESULTADOS EM FREQUÊNCIA.....	52
4.1.7 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	53
4.2 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	53
4.2.1 CURVA DE HISTERESE PARA AMOSTRAS COM NÚCLEO SINTERIZADO COM FERRO PURO.....	54
4.2.2 CURVA DE HISTERESE PARA NÚCLEO DO TRANSFORMADOR SINTERIZADO COM A LIGA 50%Fe+50%Ni; ..	54
4.2.3 CURVA DE HISTERESE PARA NÚCLEO DE TRANSFORMADOR COM LIGA CURADA DE Fe+1% RESINA HRJ. .	55
4.2.4 CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO.....	55
5. CONCLUSÕES	58
6. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	59
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Esquema de orientação dos spins nos domínios.	3
Figura 2– Direções de magnetização fácil, média e difícil para os cristais de ferro, níquel e cobalto.	3
Figura 3– Curva de Magnetização.	5
Figura 4– Laços de histerese em função de $H_{máx}$	5
Figura 5– Ciclo de histerese para um material magnético duro.	6
Figura 6– Ciclo de histerese comparando um material magnético duro com um material magnético macio.	6
Figura 7–Variação de μ com B e H.	8
Figura 8- Curva de saturação para o ferro puro e o Fe_3O_4 em função da temperatura.	8
Figura 9– Representação esquemática da densidade do fluxo magnético B versus a força de campo magnético H, para materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.	10
Figura 10- Esquema para medição da resistividade elétrica do material.	11
Figura 11– Proposta de modelo para o material magnético.	12
Figura 12– Inversão do sentido do fluxo no modelo de material magnético.	12
Figura 13– Representação das correntes parasitas de Foucault em um material magnético.	13
Figura 14 - Processo de obtenção de pós por atomização.	15
Figura 15 - Processo de compactação a frio	16
Figura 16- Propriedades magnéticas da liga Fe-Si em função do conteúdo de Si.	21
Figura 17– Variação da resistividade em função da densidade.	22
Figura 18– Variação da indução magnética em função da densidade para o ferro sinterizado.	23
Figura 19– Esquema de um transformador ideal	27
Figura 20– Representação dos fluxos dispersos em um transformador real carregado	28
Figura 21- Transformador Monofásico com chapas de Fe-Si.	30
Figura 22-Comparação, em 60 Hz, da perda em núcleos de materiais sinterizados e de chapas laminadas de aço com fósforo, orientadas, de 0,64 mm e o aço M-19 de 0,61 mm.	31
Figura 24– Desenho dimensional da matriz para compactação de núcleo “E”.	33
Figura 25- Desenho dimensional da matriz para compactação de núcleo “T”.	33
Figura 26– Matriz do núcleo tipo “E”.	34
Figura 27– Matriz do núcleo tipo “T”.	34
Figura 28– Balança para pesagem dos componentes.	35
Figura 29– Misturador tipo cone.	35
Figura 30– Matriz para compactação.	37
Figura 31 - Curva de Sinterização	37
Figura 32 - Curva de Cura.	38
Figura 33- Transformadores 6V/500mA e 12V/600mA.	39
Figura 34 – Chapas metálicas de um transformador convencional (a) e o núcleo compactado por metalurgia do pó (b).	39
Figura 35– Amostras dos núcleos compactados obtidos através da metalurgia do pó.	40
Figura 36– Calços para a matriz.	41

Figura 37– Peça para extração.	41
Figura 38– Transformadores convencionais à esquerda e os núcleos compactados à direita.	42
Figura 39– Transformadores: Convencional (esquerda) e compactado (direita).	42
Figura 40 - Formas de onda de tensão e corrente e sua defasagem.	43
Figura 41 Etapas da preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (D) enrolamento primário.	45
Figura 42 – Bancada de testes.	45
Figura 43– VS [V] / VP [V] (a vazio) para todos os compostos.	47
Figura 44– VS [V] / VP [V] (com carga RL = 18 O) para todos os compostos.	47
Figura 45– Pele [W] / IS [A] (a vazio) para todos os compostos.	48
Figura 46– Pmag [W] / IS [A] (a vazio) para todos os compostos.	49
Figura 47 - Rendimento η [%] / IS [A] (a vazio) para todos os compostos.	50
Figura 48 – η [%] / VP [V] (com carga RL = 18 O) para todos os compostos.	50
Figura 49 – Pele [W] / VP [V] (com carga RL = 18 O) para todos os compostos.	51
Figura 50 – Pmag [W] / VP [V] (com carga RL = 18 O) para todos os compostos.	52
Figura 51- Perdas Magnéticas em Transformadores com Núcleo de Chapas e Fe com 1%, 3% e 5% de HRJ-10236 [41]	53
Figura 52- Curva de Histerese Fe puro.	54
Figura 53- Curva de Histerese 50%Fe+50%Ni.	55
Figura 54 - Curva de Histerese Fe + 1% Resina HRJ.	55
Figura 55- Curva de Magnetização Fe 100%.	56
Figura 56- Curva de Magnetização FE + 50Ni.	57
Figura 57- Curva de Magnetização Fe + 1%HRJ.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas de algumas ligas fundidas a partir do ferro.	20
Tabela 2 - Propriedades físicas de algumas ligas fundidas a partir do ferro-níquel e ferro-cobalto. [35]	21
Tabela 3 - Propriedades físicas do ferro puro sinterizado	24
Tabela 4 - Propriedades físicas da liga sinterizada Fe-50%Ni.....	25
Tabela 5- Ligas utilizadas	35
Tabela 6- Pressão de compactação.	36
Tabela 7 - Resistividade Elétrica	53

LISTA DE SÍMBOLOS

P_h	Perdas por histerese	[W/kg]
F	Frequência de campo aplicado	[Hz]
W_{cmp}	Densidade de energia armazenada do campo	[J/m ³]
ρ_m	Densidade do material	[kg/m ³]
P_p	Perdas por calor	[W/kg]
k	Constante de proporcionalidade	
B	Indução magnética	[T]
x	Espessura da peça	[m]
ρ_e	Resistividade elétrica	[O.m]
μ_r	Permeabilidade magnética relativa	
B_m	Indução de saturação	[T]
B_r	Indução magnética remanente	[T]
H_c	Coercitividade magnética	[A/m]
B_r	Indução residual	[T]
I	Corrente elétrica	[A]
H	Campo magnético	[A/m]
$H_{\text{máx}}$	Força magnetizante máxima	[A/m]
N_s	Número de espiras no enrolamento secundário	
N_p	Número de espiras no enrolamento primário	
L	Comprimento do circuito magnético	[mm]
R	Resistência elétrica	[O]
V	Tensão	[V]
FeO	Óxido de ferro II ou Óxido ferroso	
θ	Ângulo de defasagem Tensão (V)x Corrente(I)	[°]
P_{ele}	Perdas Elétricas	[W]
P_{mag}	Perdas Magnéticas	[W]
Fe_3O_4	Óxido férrico	
Ni	Níquel	
$Fe-Si$	Ferro Silício	

LISTA DE ABREVIATURAS

M/P	Metalurgia do Pó
SMC	Soft Magnetic Composites (Compósitos Magnéticos Macios)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica – UFRGS
LAFUN	Laboratório de Fundição - UFRGS
HRJ	Nome comercial da Resina Fenólica
VARIAC	Variador de Tensão em Corrente Alternada
GDER	Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis

RESUMO

O objetivo principal do projeto foi desenvolver, através da metalurgia do pó (M/P), núcleos para transformadores monofásicos de baixa potência. O processo compreende o desenvolvimento de ligas metálicas utilizando pós de ferro, níquel e resina fenólica HRJ. Essas ligas foram misturadas, compactadas e sinterizadas ou curadas, conforme o tipo de liga. Após a confecção dos protótipos, foram feitos testes relacionados às características eletromagnéticas. A partir dos resultados obtidos puderam-se fazer comparações entre um transformador convencional, construído com um núcleo de chapas laminadas de Fe-Si com os núcleos maciços confeccionados utilizando-se a metalurgia do pó. Entre os transformadores construídos a partir da metalurgia do pó, também puderam ser observados os comportamentos com núcleos formados a partir de pó de ferro, liga de ferro e níquel, que foram sinterizados e ainda uma liga de ferro com 1% de resina fenólica HRJ que foi curada para obtenção do núcleo magnético.

Palavras-chave: Ligas sinterizadas, Máquinas elétricas, Matérias Magnéticas, Metalurgia do Pó.

ABSTRACT

The main goal this design was to develop, through process of powder Metallurgy, single-phase transformer cores for low Power. The process include the development alloys using powders of iron, nickel and phenolic resin HRJ. These alloys were mixed, compacted and sintered or cured, according to the type of alloy. After the prototype creation, tests were made related to the electromagnetic characteristics. When the results were ready comparisons were made between a conventional transformer, built with a Fe-Si rolled sheet core and bulky cores made using the powder metallurgy. Between transformers built from the powder metallurgy, could also be observed behaviors with cores formed from iron powder, iron and nickel alloy that was sintered and observed too an iron alloy with 1% phenolic resin HRJ was cured to obtain the magnetic core.

Keywords: sintered alloys, electrical machines, magnetic materials, powder metallurgy.

1. INTRODUÇÃO

Os núcleos magnéticos de dispositivos eletromagnéticos como motores elétricos, transformadores e reatores para luminárias, com raras exceções, são construídos atualmente, a partir de finas lâminas metálicas (chapas) com espessura menor que 1 mm, agrupadas em pacotes de chapas, sendo submetidos posteriormente, a algum tratamento térmico. Nestes pacotes, as chapas adjacentes são isoladas eletricamente a partir de substâncias como óxidos. Núcleos magnéticos envolvidos por bobinas (enrolamentos), onde circulam correntes alternadas, geram um fluxo magnético também alternado. Por este motivo, esses núcleos ficam sujeitos a ação de correntes parasitas, também conhecidos por correntes de Foucault, que são responsáveis por apreciável perda de potência nestes núcleos. A construção destes núcleos magnéticos a partir de chapas de aço isoladas eletricamente, reduz parcialmente as correntes de Foucault, reduzindo assim as perdas. Contudo, utilizando-se os processos da metalurgia do pó (M/P) é possível construir estes núcleos em blocos maciços únicos, buscando elevada permeabilidade magnética (característica dos aços magnéticos) e alta resistividade elétrica, o que reduziria as correntes parasitas. Esta característica resultaria em dispositivos com maior rendimento, resultando assim em economia de energia elétrica.

A metalurgia do pó é um processo de transformação mecânica onde se obtém peças (como metálicos e cerâmicos) a partir da compactação ou injeção de pós constituintes e posterior aquecimento em fornos (processo de sinterização) onde adquirem consistência e resistência mecânica. Assim, este processo poderá ser utilizado para obtenção de núcleos magnéticos de dispositivos eletromagnéticos, como motores, reatores, relés, e também, neste caso específico, transformadores de baixa potência.

Os núcleos magnéticos desenvolvidos a partir destes materiais, deverão apresentar algumas das seguintes vantagens, comparados aos pacotes de chapas convencionais:

- Menos etapas no processo de confecção dos núcleos, menor gasto de energia no processo de fabricação dos dispositivos e matéria prima de menor custo;
- Núcleos com maior resistividade elétrica e sujeitos a menores correntes parasitas, com menores perdas;
- Dispositivos mais leves, menor consumo de energia e com maior rendimento;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

2.1.1. Introdução

Os materiais podem ser caracterizados magneticamente de três formas: paramagnéticos, diamagnéticos e ferromagnéticos. Os paramagnéticos possuem susceptibilidade magnética pequena e positiva, ou seja, os seus dipolos magnéticos atômicos são orientados no mesmo sentido do campo magnético externo, porém com baixíssima intensidade, como exemplo destes materiais temos o Alumínio, Platina, Urânio e Magnésio.

Os materiais diamagnéticos possuem a sua orientação contrária ao fluxo magnético externo, o momento magnético é também de baixa intensidade e possui a tendência de repelência ao campo magnético externo, podemos citar como exemplo o bismuto e o antimônio. Os materiais ferromagnéticos possuem a propriedade de sofrerem uma forte indução magnética, ou seja, todos os momentos magnéticos são orientados na mesma direção e sentido magnético, este tipo de material quando submetido a um campo elétrico gera um dipolo magnético. Estes materiais são utilizados, entre outras coisas, na construção de núcleos magnéticos de máquinas elétricas, neste caso especificamente em transformadores de energia, objeto deste trabalho.

2.1.2. Propriedades Magnéticas de Materiais Metálicos

A habilidade de certos materiais, notadamente o ferro, o níquel, o cobalto e algumas de suas ligas e compostos, de adquirir um alto e permanente momento magnético, são de grande importância para a engenharia. As aplicações de materiais magnéticos são muitas e fazem uso de quase todos os aspectos do comportamento magnético.[24]

Existe uma variedade extremamente grande de diferentes tipos de materiais magnéticos e é importante saber primeiro porque estes e somente estes materiais possuem propriedades magnéticas e em seguida saber o que leva comportamentos diferentes nestes materiais, por exemplo, porque um material carrega um momento permanente enquanto outros não.[24]

As pesquisas por materiais magnéticos com melhores características são motivadas pela possibilidade de redução nas dimensões dos equipamentos e diminuição de limitações no desempenho devido à saturação e perdas [24].

Atualmente, os transformadores são compostos por chapas de aço laminadas, o que os impedem de atuar com mais eficiência, devido algumas perdas que acontecem entre os micro-espacos existentes entre elas. Para o desenvolvimento de um novo núcleo, algumas propriedades magnéticas devem ser respeitadas para que o sistema funcione corretamente. As propriedades magnéticas dão o passo inicial para o início da confecção do sistema e serão abordadas durante o presente capítulo.

2.1.3. Curvas de Magnetização

O processo de magnetização de um material ferromagnético sob a influência de um campo externo se reduz ao crescimento daqueles domínios cujos momentos magnéticos formam o menor ângulo com a direção do campo e com a rotação dos momentos magnéticos na direção do campo externo [24].

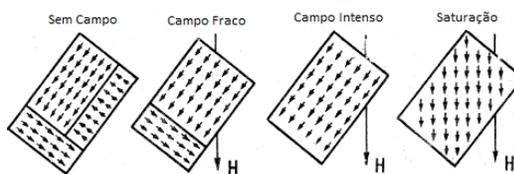


Figura 1– Esquema de orientação dos spins nos domínios. [24]

A saturação magnética se alcança quando acaba o processo de crescimento dos domínios e os momentos magnéticos de todas as regiões imantadas espontaneamente estão na mesma direção do campo.

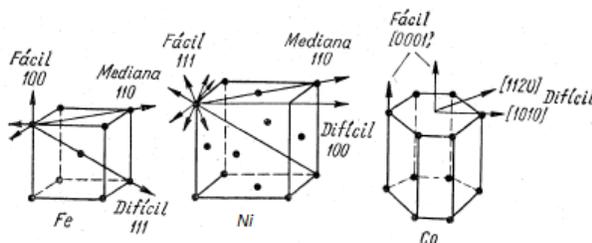


Figura 2– Direções de magnetização fácil, média e difícil para os cristais de ferro, níquel e cobalto. [24]

Os monocristais das substâncias ferromagnéticas se caracterizam pela sua anisotropia magnética, ou seja, a facilidade de magnetização dos cristais variam de acordo com a direção do campo aplicado, como se pode ver na figura 2 para os cristais de ferro, níquel e cobalto. Podemos observar que existe uma facilidade de magnetização em determinada direção do monocristal. O processo de magnetização de um material ferromagnético é caracterizado por suas curvas de magnetização $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$ [24].

Lembrando que a densidade de fluxo magnético em um ponto de um campo devido à circulação de corrente em um condutor, depende da intensidade de corrente, do comprimento do condutor, da posição deste em relação ao ponto e de um fator de proporcionalidade μ , que é a permeabilidade do meio considerado, como mostra a equação 1:

$$\mathbf{B} = \mu \times \mathbf{H} \text{ (equação 1)}$$

Essa equação fornece a relação entre a densidade de fluxo magnético \mathbf{B} e campo \mathbf{H} . Para o vácuo, a permeabilidade magnética $\mu = \mu_0$ é uma constante com o valor $4\pi \times 10^{-7}$ no sistema internacional. Para o ar, μ é um pouco maior que μ_0 podendo ser admitida igual a μ_0 nas aplicações práticas [24].

No entanto, a permeabilidade magnética μ não é em geral uma constante, ou seja, \mathbf{B} não é uma função linear de \mathbf{H} para algumas substâncias. Portanto, mais importante que o valor da permeabilidade é a representação usual da relação dada pela equação 1, através de curvas $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$. Estas curvas variam consideravelmente de um material para outro e para a mesma substância são fortemente influenciadas pelos tratamentos térmicos e mecânicos [24].

Sua obtenção é feita da seguinte forma: Para um material inicialmente não magnetizado, ao aumentar progressivamente a força magnetizante de 0 até $H_{máx}$ na figura 3, obtém-se o ramo $0a'$. Reduzindo-se em seguida \mathbf{H} de $H_{máx}$ até zero, tem-se o ramo $a'b'$. Quando $\mathbf{H} = 0$, $\mathbf{B} = 0b'$. Para reduzir \mathbf{B} a zero, é necessário aumentar \mathbf{H} em sentido contrário até $0c'$, obtendo-se o ramo $b'c'$ da curva [24].

Continuando-se a fazer variar \mathbf{H} até $-H_{máx}$ tem-se o ramo $c'd'$. Fazendo-se variar \mathbf{H} de $-H_{máx}$ até zero, em seguida até $H_{máx}$ e continuando deste modo, obtém-se

sucessivamente os pontos $e' - f' - a'' - b'' - c'' - d'' - e'' - f'' - \dots$ $0a'$ é a curva de magnetização crescente.

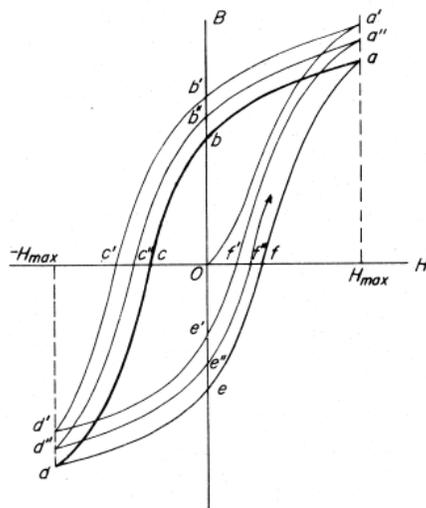


Figura 3– Curva de Magnetização. [24]

A densidade de fluxo $B = Ob'$ que permanece quando se anula a força magnetizante H é o magnetismo remanescente. Repetindo-se a operação acima descrita (variação de H entre $H_{máx}$ e $-H_{máx}$) um número suficiente de vezes, obtém-se uma curva fechada que se repete; o material terá atingido o estado de magnetização cíclica simétrica (curva $abcdef$ na figura 3). A esta curva fechada que se obtém quando o material se acha em estado de magnetização cíclica dá-se o nome de laço de histerese. A figura 4 mostra esta representação [24].

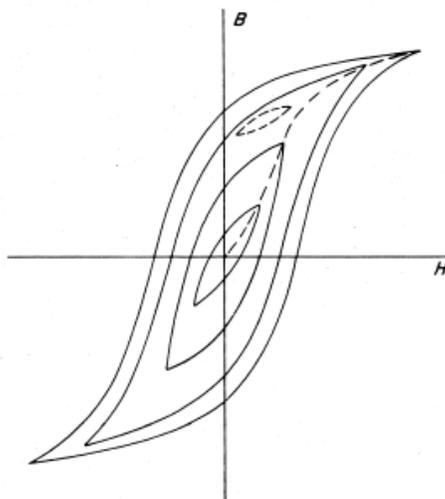


Figura 4– Laços de histerese em função de $H_{máx}$. [24]

2.1.4. Curvas de Histerese

As propriedades magnéticas são obtidas a partir da curva de histerese, que relaciona campo magnético H aplicado a um material, com a indução magnética B resultante. Para os materiais magnéticos duros ou ímãs permanentes, a relação $B \times H$ tem as características mostradas na figura 5. Os materiais magnéticos macios como os aços magnéticos, possuem um ciclo mais estreito com baixa coercitividade. A figura 6 mostra também gráficos comparativos entre estes dois tipos de materiais [1].

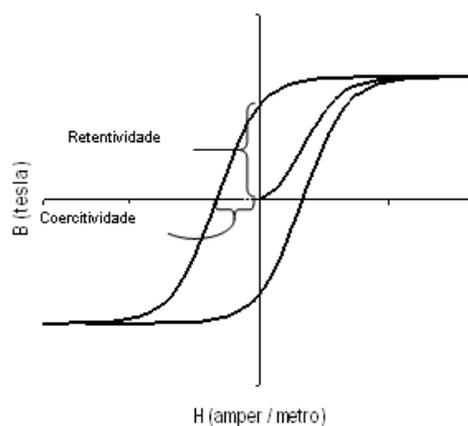


Figura 5– Ciclo de histerese para um material magnético duro. [1]

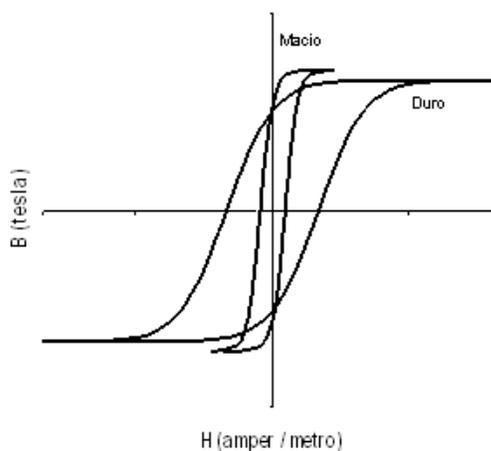


Figura 6– Ciclo de histerese comparando um material magnético duro com um material magnético macio. [1]

O ponto em que a curva corta o eixo de \mathbf{B} , no quadrante superior esquerdo, é denominado de remanência (\mathbf{B}_r) e representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado ($\mathbf{H} = \mathbf{0}$). O ponto em que a curva corta o eixo de \mathbf{H} no mesmo quadrante é denominado de coercitividade (\mathbf{H}_c) e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ($\mathbf{B} = \mathbf{0}$).

A permeabilidade magnética relativa μ_r está relacionada com o ponto de maior inclinação da curva de histerese. A indução de saturação $\mathbf{B}_{m\acute{a}x}$ pode ser visualizada a partir dos valores de campo onde a indução tende a permanecer constante ou com inclinação quase nula [2].

2.1.5. Análise das Curvas $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$

Quando o material se acha em estado de magnetização cíclica, a remanência (densidade de fluxo que permanece quando o campo magnético \mathbf{H} é removido) tem o nome de indução residual; e o valor $0c'$ da força magnetizante, necessário para anular densidade de fluxo, é a coercitividade. Ao aumentar progressivamente o campo magnético \mathbf{H} , aumenta a indução magnética \mathbf{B} , cuja expressão é mostrada na equação 2. [26]

$$\mathbf{B} = \beta + \mu_o \times \mathbf{H} \text{ (equação 2)}$$

Para valores relativamente baixos de \mathbf{H} , a densidade intrínseca de fluxo β aumenta muito mais que o termo $\mu_o \times \mathbf{H}$. A indução \mathbf{B} é então praticamente igual a β . Ao se elevar a intensidade da força magnetizante, β tende para um limite, que define a saturação magnética. Atingida esta, ao aumentar o campo magnético, β permanece constante, enquanto que $\mu_o \times \mathbf{H}$ continua a aumentar. Este comportamento pode ser observado na figura 7. Para um material inicialmente não magnetizado μ apresenta um certo valor, que cresce rapidamente até um máximo para depois decrescer (para o ferro na figura 7) [26].

Nos materiais ferromagnéticos, observa-se o fenômeno da magnetostricção, que consiste na variação de volume consequente à variação do estado de magnetização. Este fenômeno causa a vibração dos núcleos ferromagnéticos de aparelhos de corrente alternada, com o dobro da frequência da corrente. A magnetostricção é utilizada na produção e na detecção de ultrassons [26].

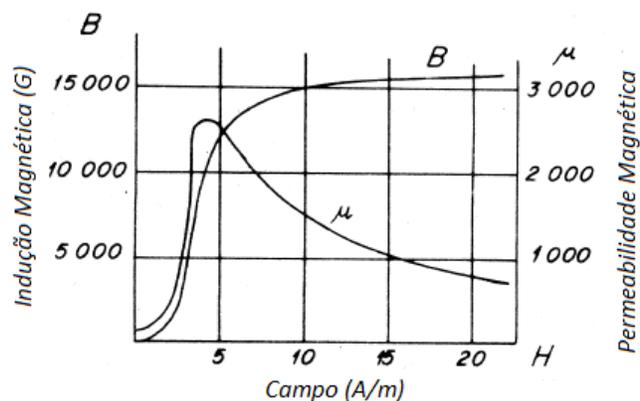


Figura 7-Variação de μ com B e H. [26]

A temperatura também influencia nas características dos materiais ferromagnéticos. Isto pode ser compreendido se lembrarmos de que um aumento de temperatura num sólido resulta em um aumento na magnitude das vibrações térmicas dos átomos e a livre rotação dos momentos magnéticos torna seu alinhamento aleatório. A magnetização de saturação é máxima a 0K, diminui gradualmente com o aumento de temperatura até cair abruptamente a zero na chamada “temperatura de Curie” ou “ponto de Curie”. Vejamos o valor do ponto de Curie de algumas substâncias: Ferro: 775°C; Níquel: 360°C; Cobalto: 1110°C. A Figura 8 mostra a curva de saturação para o ferro puro e o Fe_3O_4 em função da temperatura [26].

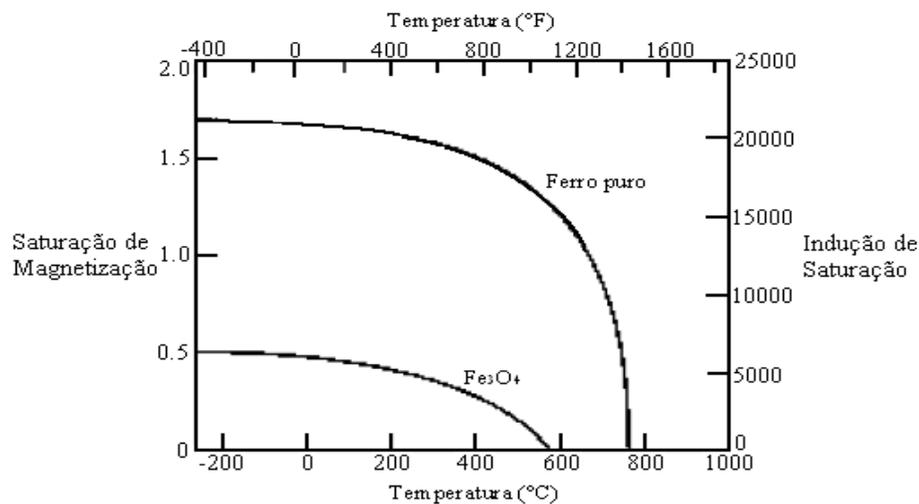


Figura 8- Curva de saturação para o ferro puro e o Fe_3O_4 em função da temperatura. [26]

As propriedades magnéticas dos materiais devem ser maiores ou menores, dependendo do destino final e sua aplicação. Ímãs permanentes exigem remanência e coercitividade altas. Um material com grande permeabilidade inicial é fundamental para aplicações que envolvem

blindagens, por exemplo, para desviar campos magnéticos muito fracos. Já a intensidade de campo de saturação bastante elevada juntamente com uma resistividade o mais elevada possível, são fundamentais para a construção de máquinas elétricas. Tais propriedades são extremamente importantes contra as correntes induzidas no material, fazendo com que tais correntes nas peças que compõe os circuitos da máquina, sejam reduzidas o máximo possível.

Para a construção de eletroímãs, isto é, quando queremos exercer ações magnéticas sob comando de correntes elétricas, interessa usar materiais de pequena remanência e pequena força coercitiva. Em peças sujeitas a magnetização alternada, convém que o ciclo histerético do material seja de pequena área porque, como veremos adiante, as perdas por histerese são proporcionais à área do ciclo, por unidade de volume do material [26].

2.1.6. Classificação dos Materiais quanto a Permeabilidade

Os diferentes meios são caracterizados, do ponto de vista magnético, pela sua permeabilidade magnética (μ). É costume considerar uma permeabilidade absoluta e uma relativa, sendo esta, o quociente daquela pela permeabilidade do vácuo ou do ar. De acordo com sua permeabilidade, podemos distinguir três tipos de meios: ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos [25].

Estes dois últimos distinguem-se do primeiro por um comportamento inteiramente diferente, motivo pelo qual recebem, no seu conjunto, a designação de materiais não ferromagnéticos. Nos meios não ferromagnéticos, a permeabilidade relativa é muito aproximadamente igual à unidade, podendo ser superior ou inferior a esta; para cada caso, recebe as designações respectivas de paramagnético e diamagnético. Entretanto, a permeabilidade deste meio é muito próxima da unidade de ambos os casos. Por exemplo, a permeabilidade da platina, que é uma substância paramagnética, é de 1,00036 e a do bismuto, substância diamagnética, é 0,99983 [25].

A figura 09 ilustra esquematicamente a dependência $B \times H$ para materiais com comportamento magnético diferente.

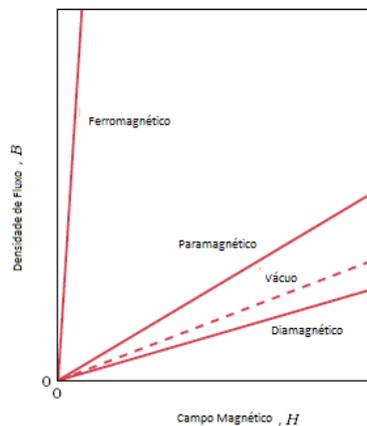


Figura 9– Representação esquemática da densidade do fluxo magnético B versus a força de campo magnético H , para materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. [25]

2.2. PERDAS EM NÚCLEOS MAGNÉTICOS

2.2.1. Introdução

Entre as partes constitutivas de uma máquina elétrica está o núcleo magnético, qualquer que seja a máquina elétrica, motor, gerador ou transformador, possuem perdas em seus núcleos magnéticos. Basicamente estas perdas são ocasionadas por correntes Foucault ou são perdas histeréticas. As perdas por correntes de Foucault estão relacionadas diretamente com a resistividade do material de que é composto o núcleo, quanto maior a resistividade, menores serão as perdas e melhor o rendimento. As perdas por histerese correspondem à energia necessária para orientar os domínios magnéticos do material na direção do campo. Para obter perdas por histerese menores tem-se que ter baixa coercitividade. [30-32]

2.2.2. Resistividade Elétrica

A determinação da resistividade elétrica de materiais pode ser realizada a partir da resistência elétrica de corpos com geometria perfeitamente conhecidas. Entretanto, para medição de resistência elétrica muito baixa, utiliza-se um artifício. Aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. O inverso, porém é mais prático, ou seja, aplica-se uma corrente e mede-se a tensão (figura 10).

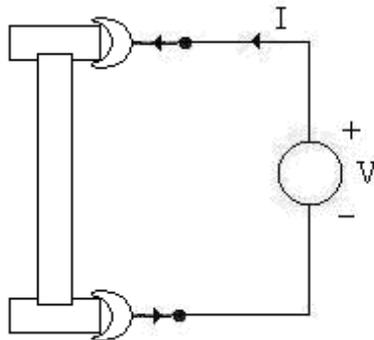


Figura 10- Esquema para medição da resistividade elétrica do material. [30]

Em se tratando de núcleos de máquina elétrica é desejável que este se comporte como um circuito aberto, ou seja, com resistividade infinita. A forma construtiva destes núcleos é determinante para que se obtenha um núcleo magnético com alta resistividade. A alta resistividade evita que hajam perdas produzidas por correntes induzidas no núcleo que levam ao aquecimento e a respectiva perda de rendimento.

2.2.3. Perdas por Histerese e Correntes de Foucault

Quando uma substância ferromagnética é sujeita a uma magnetização alternada, há perda de energia que se transforma em calor e que é proporcional a área do ciclo histerético, cada vez que este é percorrido. Inicia-se então a discussão das perdas à vazão pelas perdas por histerese, que podem ser calculadas pela equação abaixo [27]:

$$P_h = k \cdot B^{1,6} \cdot F \text{ (equação 3)}$$

Onde:

P_h = Perdas por histerese magnética;

k = Constante de qualidade do ferro;

B = Indução magnética;

F = Frequência de tensão aplicada.

Tais perdas podem ser exemplificadas se for considerado um modelo magnético, composto por infinitos ímãs contidos neste espaço, onde cada pequeno elemento representa um

dipolo magnético na estrutura cristalina de tal material magnético. Esses pequenos ímãs encontram-se de maneira totalmente desorganizada dentro desta estrutura, como pode-se observar na figura 11. [27]

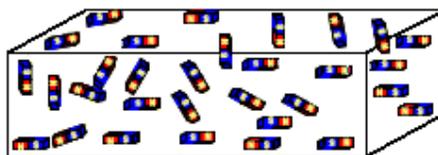


Figura 11– Proposta de modelo para o material magnético. [27]

O resultado deste modelo é que o fluxo magnético resultante seja igual a zero. Se uma bobina for colocada em torno do modelo e aplicar-se uma corrente de natureza alternada a tendência é que os dipolos se orientem de acordo com o sentido da circulação da corrente na bobina. O sentido do fluxo resultante devido a esta ação pode ser determinado pela regra da mão direita. Ocorre, no entanto, que a corrente inverte de sentido na bobina a cada meio ciclo, o que significa que o fluxo resultante também fica invertido. Esta ação de mudança de direção ocorre enquanto a corrente estiver presente na frequência da corrente aplicada. Como pode ser observado na figura 12. [27]

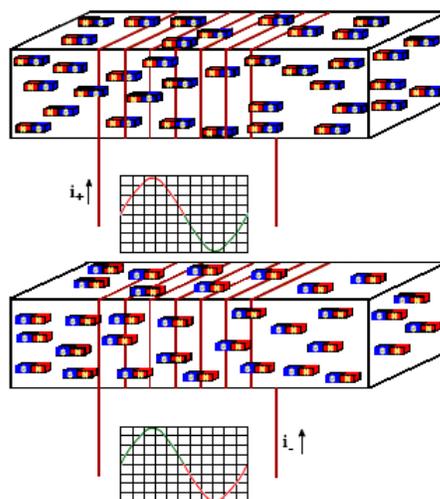


Figura 12– Inversão do sentido do fluxo no modelo de material magnético. [27]

Durante os processos de inversão dos fluxos, os dipolos (ímãs elementares) se atritam, gerando calor na estrutura do material. Pela equação 3 percebe-se facilmente que estas perdas dependem do valor dos níveis de indução e são diretamente proporcionais à frequência. Estudos

realizados comprovam que a adição de silício na estrutura cristalina dos materiais magnéticos reduz as perdas para níveis muito baixos. Estes procedimentos tornaram possíveis a utilização do aço-silício (Fe-Si) na fabricação de máquinas elétricas [27].

Quando o silício é introduzido na rede cristalina do ferro, ele reduz o atrito e as forças de ligação que existe entre eles, agindo como um separador de dipolos magnéticos. A diminuição de calor gerado pelo atrito e também, a diminuição da corrente fundamental para a magnetização é o resultado dessa mistura de silício com o ferro.

Já as perdas por correntes de Foucault, acabam produzindo calor por consequência das correntes parasitas induzidas nas chapas de aço silício. A explicação deste efeito fica mais bem esclarecida com a figura 13, onde são representadas as linhas de força de fluxo encontradas no material, através de uma seção num material magnético qualquer.

Pelo fenômeno da indução estudado por Faraday-Lens serão estabelecidas correntes na superfície da área da seção do material magnético, conforme indicado na figura 13.

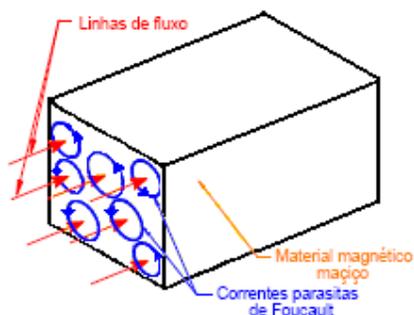


Figura 13– Representação das correntes parasitas de Foucault em um material magnético. [27]

Percebe-se que as correntes parasitas induzidas possuem a liberdade de circular pela superfície do material, sendo limitada apenas pela resistência elétrica do material magnético. Portanto, o quadrado da intensidade das correntes parasitas multiplicado pelo valor da resistência do caminho estabelecido por elas, produz calor devido ao efeito Joule. O calor produzido é indesejável. O ideal seria eliminar a ação deste calor. As perdas por correntes parasitas podem ser calculadas através da equação 04. [27]

$$P_F = 2,2 \cdot F^2 \cdot B^2 \cdot D^2 \cdot 10^{-3} \text{ (equação 4)}$$

Onde:

P_F = Perdas por corrente de Foucault;

F = Frequência da tensão aplicada;

B = Indução magnética;

D = Espessura do material.

2.3. METALURGIA DO PÓ

2.3.1. Introdução

A metalurgia do pó é o processo metalúrgico de fabricação de peças metálicas, não metálicas e cerâmicas, que vem se desenvolvendo numa taxa cada vez mais crescente. Distingue-se dos processos convencionais pela ausência de fase líquida ou presença apenas parcial de fase líquida durante o processamento. Trata-se de uma técnica de fabricação que permite a produção de peças com formas definitivas ou praticamente definitivas dentro de tolerâncias bastante apertadas, produção de componentes com certas características estruturais e físicas, impossíveis de serem obtidas através de qualquer outro processo metalúrgico.

Caracteriza-se, também, pela fabricação e obtenção de peças em grandes quantidades e é um processo que permite um elevado índice de isotropia estrutural, além de possibilitar a fabricação de peças complexas e de peças simples com o mesmo grau de dificuldade. Em princípio, na metalurgia do pó, não há necessidade de operações secundárias e de acabamento posterior.

Os quatro processos básicos da metalurgia do pó são: Obtenção dos pós, mistura, compactação e sinterização. Às vezes é necessária uma quinta etapa como a retificação. Na metalurgia do pó, os pós, depois de misturados, são compactados em matrizes onde adquirem a forma da cavidade da matriz. Após, são colocados em fornos para sinterização onde adquirem resistência mecânica.

2.3.2. Vantagens e Desvantagens

A metalurgia do pó tem como principais vantagens a utilização de fornos mais simples e com baixo consumo de energia, isto devido ao fato de necessitar de temperaturas de

sinterização mais baixas, em relação a outros processos. O produto final pode não precisar de ajustes dimensionais uma vez que possui excelente tolerância dimensional, aliado a isto temos a possibilidade de não precisar de operações de acabamento superficial. Face ao fato de termos um processo de compactação em um formato pré definido, temos também as vantagens de construção de peças de alta complexidade e em larga escala, além do controle total sobre a combinação de todos os componentes químicos que formação o material sinterizado.[30]

As desvantagens estão por conta de limitações geométricas da peça, uma vez que esta deverá ser extraída de uma matriz de compactação. Como o processo exige a compactação de pós, ainda não é possível criar peças de grande porte, uma vez que as potências requeridas para a compactação são proporcionais a sua área transversal. Em algumas aplicações onde é necessário altas solicitações mecânicas é preciso realizar um processo para redução da porosidade residual. [30]

2.3.3. Obtenção da Matéria-Prima

Os pós são obtidos por uma série de processos, que variam em função das propriedades do material, tais como sua resistência mecânica, ponto de fusão e comportamento químico, é necessário também conhecer as características que a aplicação requer do mesmo. Os processos químicos mais utilizados para a obtenção de pós metálicos ou cerâmicos são: moagem, quebra, processos químicos, termoquímicos e atomização. [30]

A figura 14 mostra o processo de atomização de pós, que podem ser tanto metálicos quanto não metálicos.

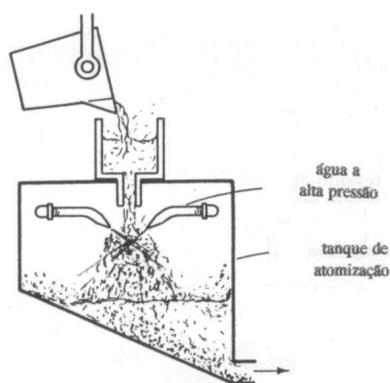


Figura 14 - Processo de obtenção de pós por atomização. [26]

2.3.4. Compactação

Esta etapa consiste em aplicar pressão sobre a mistura de pós, formando o material desejado. Este é o primeiro passo para obter uma peça pelo processo de fabricação da metalurgia do pó. Para isto é necessário conformar os pós na forma desejada, dando a forma e as características para seguir para o próximo passo. A compactação é executada em prensas mecânicas ou hidráulicas e os sistemas de compactação utilizados são: compactação unidirecional de ação simples e ação dupla, compactação isostática, laminação de pós, extrusão e forjamento de pré-formas sinterizadas. Estes sistemas podem ser empregados em regime quente ou a frio. [30]

A figura 15 apresenta o processo de compactação a frio.

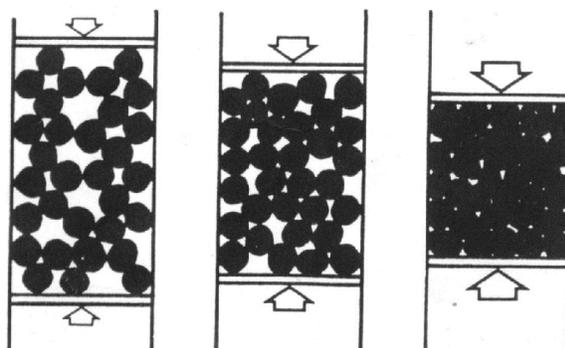


Figura 15 - Processo de compactação a frio [35]

2.3.5. Sinterização

A sinterização consiste no aquecimento das peças comprimidas a temperaturas específicas, sempre abaixo do ponto de fusão do metal base da mistura, eventualmente acima do ponto de fusão do metal secundário da mistura, em condições controladas de velocidade de aquecimento, tempo a temperatura, velocidade de resfriamento e atmosfera do ambiente de aquecimento. [31]

Em alguns casos certas peças de metal duro entre outros procede-se a uma sinterização prévia, a uma temperatura mais baixa com o objetivo de conferir a briquetes de compactadas

condições de serem usinadas antes da sinterização final. Esta operação é denominada pré-sinterização. [31]

A temperatura ideal de sinterização é da ordem de $2/3$ a $3/4$ da temperatura de fusão da liga considerada. Basicamente a sinterização é um processo de estado sólido ocorrendo ligação química e metalurgia do pó, no sentido de eliminar ou diminuir a porosidade existente no compactado verde; formando um corpo coerente provido das propriedades físicas primárias do sinterizado [30].

Em diversos casos, a temperatura de sinterização é suficientemente alta para fundir um ou mais componentes do material, caracterizando a chamada sinterização com fase líquida. Sob o ponto de vista de economia e funcionalidade do processo, o desejável é ter o produto sinterizado acabado após esta operação. Entretanto, quando certas características físicas e dimensionais não são atingidas, pode-se promover operações subseqüentes de recompressão, resinterização, infiltração com metais de mais baixo ponto de fusão, entre outras.

2.3.6. Cura

O processo de cura consiste também em aplicação de temperatura em forno, o processo é semelhante ao de sinterização, porém as temperaturas são mais baixas e são destinadas a compósitos resinados, a seleção das condições de cura é fundamental, uma vez que afetam o comportamento mecânico, magnético e elétrico. Estabelecendo-se as condições ideais de cura, a resina resulta em uma estrutura rígida.

A cura de polímeros termofixos é um processo de polimerização, sendo assim, durante a cura ocorre um aumento da massa molar média do polímero. A reação de cura é normalmente exotérmica, porém, quase sempre requer um fornecimento de energia para sua inicialização. Uma característica comum a todos os sistemas termofixos é o alto valor de calor de reação. As propriedades das resinas termofixas dependem diretamente das condições de cura utilizadas. [36],[37]

2.4. MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS

2.4.1. Introdução

Os materiais magnéticos macios, também conhecidos como materiais magnéticos moles ou doces são aqueles materiais que facilmente são magnetizados e desmagnetizados. Tem tipicamente baixa coercitividade ou campo coercivo, alta permeabilidade magnética e baixa perda por histereses. Esses tipos de materiais são fortemente afetados através de impurezas [39].

Os materiais utilizados em máquinas elétricas são caracterizados como materiais macios, para que estas máquinas tenham um bom rendimento, é necessário que seus circuitos magnéticos sejam feitos em materiais com alta permeabilidade magnética e baixa perda por histerese, características dos materiais macios.

2.4.2. Ligas Magnéticas Convencionais.

Os materiais magnéticos macios mais utilizados são as ligas de aço em geral, com exceção de algumas ligas de aço inox que são paramagnéticos e apresentam a mesma permeabilidade magnética relativa do vácuo. Em geral são utilizadas na construção de motores, geradores e transformadores como núcleo de bobinas alimentadas com corrente alternada, o que induz correntes parasitas, causando apreciável perda. Por este motivo rotores e estatores de motores, bem como núcleo de transformadores são construídos com chapas de aço ferromagnético laminadas, justapostas e isoladas para restringir o fluxo de correntes parasitas e reduzir as perdas, aumentando a resistividade. [3],[35]

Os três tipos de materiais mais utilizados para núcleos de máquinas elétricas, relacionados a seguir, são: Aço baixo carbono, aço-silício não orientado e aço-silício orientado. [35]

O Aço baixo carbono, com aproximadamente 0,05% de carbono, foi originalmente utilizado como material para construção de núcleos para transformadores, motores e geradores, mas é limitado hoje principalmente para núcleo de pequenos motores. Essencialmente, este tipo de material é o mesmo utilizado na construção de automóveis, máquinas diversas e outros. Aço baixo carbono laminado, tem uma permeabilidade magnética relativa máxima de 5.000 a 10.000, e pode ser considerado como ferro com impurezas. Tratamentos para purificação pode levar a uma melhora na permeabilidade. A purificação do ferro é realizada por fusão a vácuo e

recozimento em atmosfera de hidrogênio próximo de 1.300 °C para remover carbono, nitrogênio e oxigênio. Apesar da alta permeabilidade magnética, o ferro “puro” não é utilizado comercialmente em função do alto custo e baixa resistividade, o que induz correntes parasitas, aumentando as perdas [35].

O ferro puro possui uma magnetização de saturação relativamente alta e por ser abundante (aproximadamente 3.3% da crosta terrestre é composta de Fe) é muito barato sendo altamente utilizado em materiais ferromagnéticos macios.

O Ferro comercialmente disponível alcança permeabilidades relativas máximas da ordem de 5×10^3 e coercitividades da ordem de 70 A/m. Após tratamentos adequados estas propriedades podem ser melhoradas. As grandes desvantagens do uso do ferro puro são sua baixa resistividade elétrica e alta maleabilidade. A baixa resistividade é ruim para aplicações em altas frequências por causa de correntes de Foucault, decorrentes da lei de Faraday. Embora o cobalto e o níquel também sejam ferromagnéticos como o ferro, seu uso em larga escala comercial é inibido pelos altos custos [23].

O Aço-Silício não orientado foi desenvolvido pelo metalurgista inglês Robert Hadfield em 1900 e logo tornou-se o material preferido para construção de núcleo de transformadores, motores e geradores. A adição de silício ao ferro, modifica profundamente as mudanças de fase. Uma vez que o conteúdo de carbono é muito pequeno, atualmente estas ligas são conhecidas como ferro-silício. A adição de silício ao ferro resulta nos seguintes efeitos sobre as propriedades físicas: A resistividade elétrica aumenta, causando uma redução nas correntes parasitas; a anisotropia cristalina diminui, causando um aumento na permeabilidade, e diminui a indução de saturação. O percentual de silício varia de aproximadamente 1,05 a 3,25% para as ligas não orientadas e 3,25% para as ligas orientadas, e o percentual de carbono varia 0,03% (não orientado) a 0,01% (orientado). A permeabilidade magnética relativa, a uma indução de 15 kG (1,5 T), 60 Hz, para as ligas não orientadas, varia de 1.100 (1,05% de Si) até 700 (3,25% de Si), e para as ligas orientadas, varia de 16.000 a 23.000. As chapas são obtidas por laminação a quente até aproximadamente à espessura final; a seguir é realizada uma decapagem para retirar a película de óxido, e após, laminado a frio para a espessura final, melhorando as características mecânicas; finalmente é realizado um recozimento a baixa temperatura [35].

O Aço-silício com grãos orientados foi desenvolvido pelo metalurgista americano Norman Goss em 1933. Ele descobriu que, com uma laminação a frio e com um recozimento intermediário, acrescido de um recozimento final a alta temperatura, produz-se chapas com melhores propriedades magnéticas na direção de laminação, que as chapas com laminação a quente. Esta melhora é devido a uma textura magneticamente favorável, produzida por uma recristalização secundária, durante o recozimento a alta temperatura. Chapas com grãos orientados começaram a ser produzidas comercialmente por volta de 1945, e desde então, suas propriedades tem sido melhoradas continuamente [35].

A tabela 01 relaciona algumas ligas fundidas a partir do ferro, com as propriedades físicas de interesse, onde ρ_s é a densidade, B_m a indução máxima, B_r a indução residual, H_c a coercitividade, μ_r a permeabilidade magnética relativa máxima e ρ_e a resistividade elétrica.

Tabela 1 - Propriedades físicas de algumas ligas fundidas a partir do ferro. [11]

Liga	ρ_s [g/cm ³]	B_m [T]	B_m [kG]	B_r [T]	B_r [kG]	H_c [A/m]	H_c [Oe]	μ_r [Ad.]	ρ_e [$\mu\Omega.m$]
ASTM A348 (Ferro)	7,89	1,7	17	1,28	12,8	79,58	1,00	5.000	0,13
ASM-Handbook (Fe-Si)	7,65	-	-	-	-	56,00	0,70	8.000	0,47
Carpenter Tech. (aço-ferrítico)	7,26	1,2	12	0,60	6,0	159,00	2,00	2.000	-
ASM-Handbook (Fe-50%Ni)	8,20	1,6	16	0,80	8,0	3,98	0,05	70.000	-

Além das ligas de aço, existem ainda outras ligas especiais que são utilizadas como material magnético macio, tendo como inconveniente o custo. Estas ligas são constituídas principalmente de ferro-níquel contendo de 50 a 80% de níquel, e formam uma grande diversidade de séries usualmente denominadas de Permalloys, e são caracterizados principalmente por uma elevada permeabilidade à baixos campos magnéticos. Foram desenvolvidas por Elmen e seus associados no período de 1913-1921. São aplicados principalmente em equipamentos de comunicação como rádio, telefone e TV. A tabela 2 relaciona algumas ligas de ferro-níquel e ferro-colbalto com as propriedades físicas de interesse [35].

Tabela 2 - Propriedades físicas de algumas ligas fundidas a partir do ferro-níquel e ferro-cobalto. [35]

Liga	μ_r [Ad.]	H_c [A/m]	H_c [Oe]	B_m [T]	B_m [kG]	ρ_e [$\mu\Omega\cdot m$]	T_c [°C]
78 Permalloy (78%Ni-22%Fe)	100.000	3,98	0,050	1,08	10,8	0,16	580
Supermalloy (79%Ni-16%Fe-5%Mo)	1.000.000	0,16	0,002	0,79	7,9	0,60	400
Supermendur (49%Fe-49%Co-2%V)	60.000	15,92	0,200	2,40	24,0	0,27	980

2.4.3. Ligas Magnéticas Sinterizadas.

As propriedades físicas dos materiais obtidos por metalurgia do pó, como por exemplo, as magnéticas e elétricas, são influenciadas por vários fatores, que serão considerados a seguir.

Na maioria dos casos, a resistividade de um elemento metálico aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas impurezas provocam distorções no reticulado cristalino. Quanto maior as imperfeições da rede cristalina, maior a resistividade. Por esta razão, as maiores resistividades em metais são obtidas em ligas compostas de dois ou mais metais, nas mesmas proporções, ou em proporções próximas. Nestas condições há uma interpenetração das redes cristalina dos materiais presentes na liga. Por este motivo, ocorre um aumento da resistividade do ferro sinterizado, quando outros elementos como o silício (Si), fósforo (P) ou níquel (Ni) são adicionados. A adição de silício ao ferro, além de aumentar a resistividade elétrica, aumenta também a permeabilidade magnética relativa máxima, diminui a coercitividade, contudo, diminui também a indução de saturação conforme verificamos na figura 16. [9]

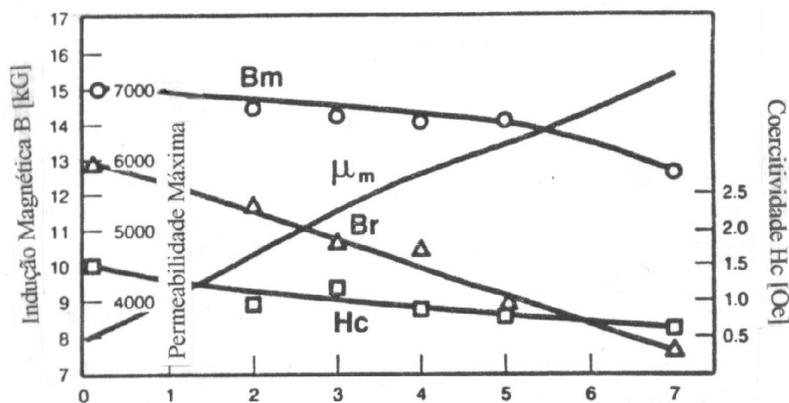


Figura 16- Propriedades magnéticas da liga Fe-Si em função do conteúdo de Si. [35]

A maioria dos materiais metálicos ferrosos sinterizados, possui resistividade elétrica maior do que materiais maciços de mesma composição química, devido principalmente à porosidade e a oxidação superficial das partículas. Portanto, é possível aumentar ainda mais a resistência elétrica total de peças metálicas sinterizadas, compactando com pressão menor, o que aumenta a porosidade do material, diminuindo, portanto a densidade. A resistividade das ligas metálicas diminui com o aumento da densidade, independente do tipo de metal. A figura 17 mostra a variação da resistividade em função da densidade para alguns materiais sinterizados.

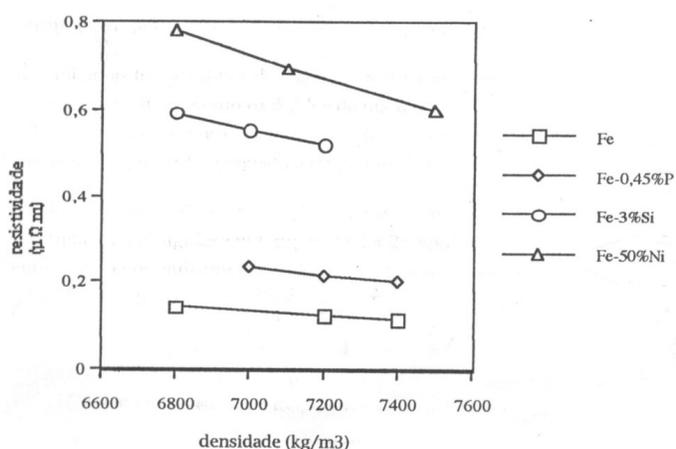


Figura 17– Variação da resistividade em função da densidade. [11]

Com o aumento da porosidade, há uma diminuição da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade [11]. A figura 18 mostra a variação da indução de saturação, para certo campo magnético, em função da densidade, para o ferro sinterizado.

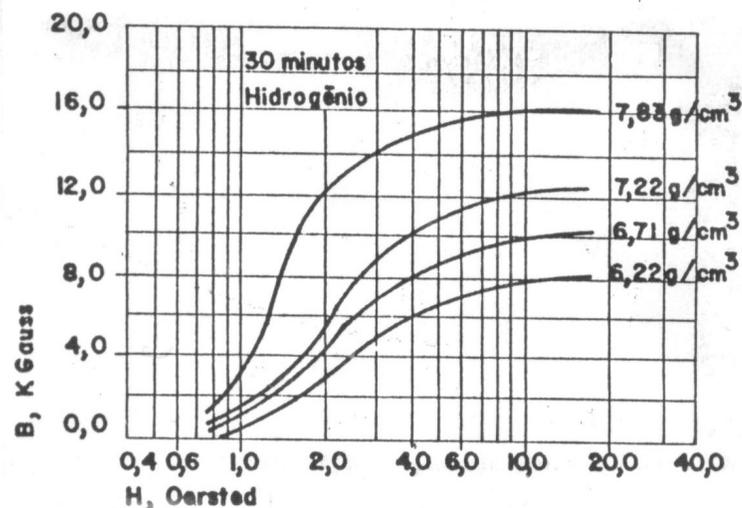


Figura 18– Variação da indução magnética em função da densidade para o ferro sinterizado. [4]

A resistividade elétrica para a maioria das ligas metálicas, também é função do tamanho do grão. Quanto menor o tamanho do grão, maior a quantidade de contornos de grãos, que também provocam distúrbios na rede cristalina, aumentando a resistividade. Entretanto, a diminuição do tamanho do grão causa um decréscimo da permeabilidade magnética e um aumento da coercitividade [13].

As impurezas como carbono, nitrogênio e oxigênio também afetam as propriedades magnéticas das ligas de ferro sinterizadas. Quando o objetivo é a obtenção de materiais magnéticos de boas propriedades, é conveniente que os percentuais destas impurezas sejam mantidos nos seguintes níveis [10]:

- Carbono: 0,01% máximo;
- Oxigênio: 0,02% máximo;
- Nitrogênio: 0,01% máximo;

Outro fator que também afeta as propriedades magnéticas dos materiais ferrosos sinterizados é o tamanho de partícula de pó. O aumento da granulometria do pó aumenta a permeabilidade magnética, mas aumenta também a coercitividade. Além disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização também alteram algumas propriedades físicas [14].

A seguir estão descritas duas das principais ligas que podem ser utilizadas e suas propriedades físicas de interesse, sendo eles o ferro puro e a liga de ferro-níquel. [12]

Os materiais sinterizados de ferro puro são caracterizados por altas perdas e propriedades magnéticas médias. Seu uso é aconselhável principalmente para corrente contínua ou circuitos de excitação magnética permanente, com fluxos magnéticos de médio a alto, devido a sua baixa resistividade elétrica. O ferro puro sinterizado de alta densidade possui saturação magnética e permeabilidade altas e baixa coercitividade, propriedades essenciais para aplicações de corrente contínua. Os materiais e as condições de processamento necessitam de um rígido controle para a obtenção de ótimas propriedades, por exemplo, se tensões são introduzidas ou o nível de pureza diminui, todas as propriedades são afetadas [12]. A tabela 3 mostra as propriedades físicas de interesse do ferro puro.

Tabela 3 - Propriedades físicas do ferro puro sinterizado [11]

Liga	ρ_s [g/cm ³]	B_m [T]	B_m [kG]	B_r [T]	B_r [kG]	H_c [A/m]	H_c [Oe]	μ_r [Ad.]	ρ_e [$\mu\Omega.m$]
ASTM A811-87 H=1194 A/m	6,6	0,90	9,0	0,76	7,6	175	2,20	1.800	-
	6,9	1,06	10,6	0,91	9,1	159	2,00	2.100	-
	7,2	1,23	12,3	1,07	10,7	159	2,00	2.500	-
Lall & Baum 1260 °C-AD 45 min. H=1990 A/m	6,8	1,14	11,4	0,96	9,6	131	1,65	2.900	0,14
	7,2	1,36	13,6	1,10	11,0	127	1,60	3.700	0,12
	7,4	1,47	14,7	1,29	12,9	119	1,49	4.700	0,11
McDermott 1260 °C,AD 30 min. H=1194 A/m	6,7	1,00	10,0	0,77	7,7	146	2,05	1.988	-
	7,0	1,17	11,7	0,91	9,1	146	2,05	2.317	-
Moyer 1121 °C-H2+N2 H=1194 A/m	7,3	1,27	12,7	1,05	10,5	146	1,95	2.651	-
	7,0	1,14	11,4	1,10	11,0	143	1,80	2.800	-
Mossner 1121 °C (1121 °C	7,0	1,00	10,0	0,89	8,9	159	2,00	2.000	-
	7,0	1,07	10,7	0,94	9,4	127	1,60	2.400	-

A principal característica que distingue as ligas ferro níquel das demais é a sua alta permeabilidade. Além disso, a indução máxima é baixa e a resistividade elétrica tem um valor intermediário, se comparada às demais [12]. Estas propriedades tornam estas ligas atraentes em aplicações mais sofisticadas, que operam em altas frequências e com baixa excitação, nas quais se exigem um tempo de resposta muito curto, como por exemplo em circuito atuadores de termopares. Para a obtenção de alta densidade (7,5 g/cm³), o pó é compactado numa pressão de 690 Mpa e sinterizado em vácuo acima de 1200°C. Com este processo, uma permeabilidade relativa máxima de 40000 e uma força coercitiva de 16 A/m pode ser obtida,

que são valores comparáveis aos das ligas ferro níquel maciças [40]. A tabela 4 é uma compilação de resultados obtidos por vários autores. Embora a temperatura de sinterização tenha algum efeito nas propriedades magnéticas, o mesmo não é tão pronunciado como no caso outras ligas. O efeito mais significativo do aumento do teor de níquel é uma queda na indução residual e um aumento na Coercitividade.[11] Apesar da liga Fe-50%Ni apresentar valores de coercitividade, indução residual e indução máxima menores se comparada à liga Fe-3%Si, ela é mais indicada para aplicações em corrente alternada de alto desempenho, especialmente se for considerado que a permeabilidade máxima deste material é aproximadamente quatro vezes à da liga Fe-3%Si e quase seis vezes do que a do ferro puro.[11]

Tabela 4 - Propriedades físicas da liga sinterizada Fe-50%Ni [11]

Liga	ρ_s [g/cm ³]	B_m [T]	B_m [kG]	B_r [T]	B_r [kG]	H_c [A/m]	H_c [Oe]	μ_r [Ad.]	ρ_e [$\mu\Omega.m$]
Lall & Baum	6,8	0,93	9,3	0,71	7,1	20,7	0,26		0,78
1260 °C-AD	7,1	1,09	10,9	0,80	8,0	19,9	0,25	2.100	0,69
45 min.	7,5	1,27	12,7	0,94	9,4	19,1	0,24		0,60
H=1990 A/m	7,4	1,08	10,8	0,86	8,6	23,9	0,30	10.600	-
Lall									
1260 °C-Vácuo									
H=1990 A/m									
Moyer & Ryan	7,3	1,12	11,2	0,70	7,0	23,9	0,30		-
1264 °C-Vac.2h	7,5	1,23	12,3	0,75	7,5	23,9	0,30	7.000	-
1264 °C-Vac.2h	7,4	1,23	12,3	0,75	7,5	48,0	0,60		-
1260 °C-Vac.1h									
Mossner	7,1	1,15	11,5	0,85	8,5	31,4	0,39	11.000	-
1121 °C	7,3	1,29	12,9	0,90	9,0	23,9	0,30	16.000	-
1288 °C									

2.5. TRANSFORMADORES

2.5.1. Introdução

O funcionamento do transformador é explicado através da Lei de Faraday- Neumann-Lens ou lei da Indução Eletromagnética (LFIEM), que nos diz que quando um circuito é atravessado por uma corrente variável é produzido um campo magnético, e quando um circuito é atravessado por um campo magnético variável é gerada uma corrente elétrica nesse circuito. O transformador básico é constituído de dois circuitos independentes, geralmente espiras de fio, sendo o primeiro circuito chamado de primário e o outro de secundário. [3],[7]

O circuito primário é atravessado por uma corrente alternada (variável). Então é gerado um campo magnético, que pode ou não ser variável, dependendo da forma como varia a

corrente no circuito primário, mas, para que o transformador funcione, ele tem que ser variável. [3],[7]

O circuito secundário é atravessado pelo campo magnético variável gerado no circuito primário, então é produzida no circuito secundário uma corrente, que tem a mesma forma da corrente que atravessa o circuito primário, mas com tensão alterada, para mais ou para menos, de acordo com um fator de proporcionalidade: a relação no número de espiras dos circuitos (N_1/N_2). A tensão no circuito 2 (tensão de saída) é igual a tensão no circuito 1 (tensão de entrada) multiplicado pela fração N_2/N_1 , sendo N_2 o número de espiras do circuito 2 e N_1 o número de espiras do circuito 1. [3],[19]

Considerando um transformador constituído por um circuito primário de 100 espiras e um circuito secundário de 50 espiras, se o circuito primário for atravessado por uma tensão de 110 Volts, teremos no circuito secundário uma tensão de 55 Volts, porque a fração N_2/N_1 vale 0,5 (50/100). Se tivermos, pelo contrário 50 espiras no circuito primário e 100 espiras no circuito secundário e o circuito primário for atravessado pelos mesmos 110 Volts, teremos no circuito secundário 220 Volts, pois a fração N_2/N_1 agora vale 2 (100/50). [3], [19]

Num transformador simples não se distinguem os circuitos primário e secundário. Chama-se primário o circuito que é atravessado pela corrente de entrada, e secundário aquele onde é gerada a corrente de saída. Dessa forma, um mesmo transformador pode tanto ser usado para aumentar quanto para diminuir a tensão de uma corrente, dependendo apenas da escolha do circuito primário e secundário. Se o circuito primário for o que tem menos espiras, a tensão será aumentada e a corrente diminuída. Se for o que tem mais espiras, ocorre o contrário, ou seja, a tensão diminui e a corrente aumenta. Isso se toda a potência aplicada ao primário fosse induzida no secundário, o que na realidade não acontece porque acontecem perdas de energia durante o processo. [3], [19]

Se o meio através do qual se dá a transferência do campo magnético das espiras do primário para o secundário for o ar, as perdas envolvidas serão elevadas. Para minimizar estas perdas são utilizados materiais ferrosos (ferromagnetites) que ajudam a transmitir o campo magnético. Mesmo nestes materiais ocorrem perdas, sendo as principais, as perdas por histerese e as correntes de Foucault. Estas causam uma perda de cerca de 20% na tensão induzida no secundário. [3], [19]

2.5.2. Modelo Equivalente do Transformador

As características de um transformador ideal, o torna um dispositivo perfeito, pelo menos em sua teoria. Para um transformador ideal, o núcleo teria uma permeabilidade magnética (μ) infinita, ou seja, fazendo com que sua resistência no núcleo fosse igual à zero. Outra característica seria os enrolamentos elétricos do equipamento sem qualquer tipo de perda, juntamente com a ausência de perdas no cobre e no ferro. A última característica importante seria a ausência de fluxo de dispersão, ou seja, a mútua entre o primário e o secundário é total (o fluxo produzido se concatena com os dois enrolamentos). Podemos verificar na figura 19, o esquema elétrico de um transformador ideal [5].

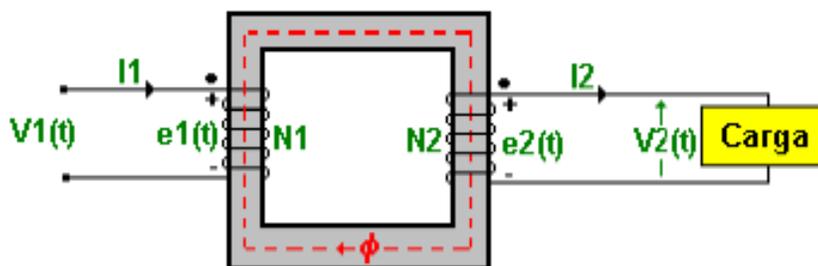


Figura 19– Esquema de um transformador ideal [5]

Um estudo completo da teoria do transformador deve levar em conta os efeitos das resistências dos enrolamentos, o fluxo magnético disperso, as perdas por histerese e de Foucault no núcleo. Embora acoplado pelo núcleo de ferro, uma pequena porção de fluxo disperso é produzida nos enrolamentos primário (F_{d1}) e o secundário (F_{d2}), além do fluxo mútuo (F_m) [7].

O fluxo disperso primário (F_{d1}), produz uma reatância indutiva primária X_1 e o fluxo disperso secundário (F_{d2}), produz uma reatância secundária X_2 . Para se levar em conta a dispersão do fluxo magnético, justifica-se a ligação de indutâncias X_1 e X_2 em série com os enrolamentos. É necessário considerar as resistências ôhmicas dos enrolamentos primário e secundário, responsáveis pela perda Joule no cobre dos enrolamentos. As resistências R_1 e R_2 devem ser colocadas em série no circuito equivalente [7].

As resistências e reatâncias dos enrolamentos do primário e secundário, produzem quedas de tensão no interior do transformador, com resultado das correntes primária e secundária. Embora estas quedas de tensão sejam internas, é conveniente representá-las externamente com parâmetros puros em série com um transformador ideal. Abaixo, a figura 20 representa um transformador real com carga.

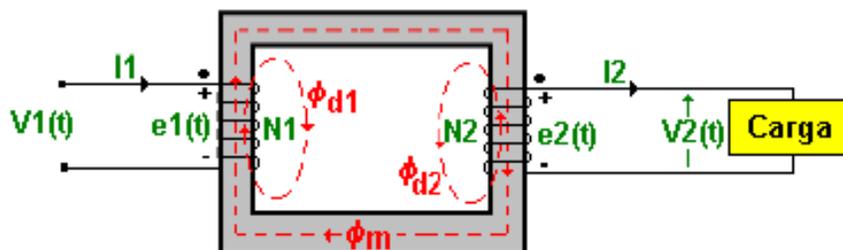


Figura 20– Representação dos fluxos dispersos em um transformador real carregado [5]

O transformador a vazio absorve uma fonte de corrente de excitação composta de duas componentes. Uma para produzir a força magneto motriz e a outra responsável pela energia perdida em calor no núcleo de ferro (perdas por histerese e de Foucault).

Existem alguns tipos de perdas que podemos encontrar na análise de perdas de um transformador. As perdas totais são compostas de perdas no cobre (efeito Joule) e perdas magnéticas (ou perdas no núcleo), que pode ser considerada a soma das perdas de Foucault com a perda histerética. Tais perdas geram aquecimento e conseqüentemente uma determinada elevação de temperatura do indutor acima da temperatura do ambiente ao qual este está submetido. [19]

As perdas no cobre dependem diretamente da resistência do enrolamento, que pode ser facilmente calculada com auxílio da equação 05 a seguir. [19]

$$R_{cobre} = \frac{\rho_{fio} \cdot l_{espira} \cdot N}{n_{condutores}} \text{ (equação n° 05)}$$

Onde:

l_{espira} = comprimento médio de uma espira;

ρ_{fio} = resistividade do fio por cm.

As perdas Joule são dadas pela equação 06:

$$P_{cobre} = R_{cobre} \cdot I_{ef}^2 \text{ (equação nº 06)}$$

As perdas magnéticas são devidas basicamente à histerese. A equação 07, determinar com boa aproximação, uma vez que foi determinada de forma empírica, o valor das perdas no núcleo. [19]

$$P_{núcleo} = \Delta B^{2,4} \cdot (K_h \cdot f \cdot K_f \cdot f^2) \cdot V_{núcleo} \text{ (equação nº 07)}$$

Onde:

K_h = coeficiente de perdas por histerese;

K_f = coeficiente de perdas por correntes parasitas;

$V_{núcleo}$ = volume do núcleo.

2.5.3. Transformadores com Núcleos de Chapas

Os transformadores convencionais possuem seus núcleos construídos com chapas de Fe-Si de grãos orientados, recortadas em formatos que possam receber os enrolamentos. Estes núcleos são dimensionados em função do tipo e da potência do transformador e tem a função de criar um circuito magnético para que haja a circulação do fluxo. As chapas são fabricadas em espessuras variadas e de acordo com padrões internacionais.

As chapas de ferro-silício são laminadas a frio, seguidas de um tratamento térmico adequado, que permite que os grãos magnéticos sejam orientados no sentido da laminação. São cobertas por uma fina camada de material isolante (elétrico) e fabricadas dentro de limites máximos de perdas eletromagnéticas [33].

A figura 21 mostra um transformador monofásico básico com um circuito magnético, construído com chapas metálicas e duas bobinas.

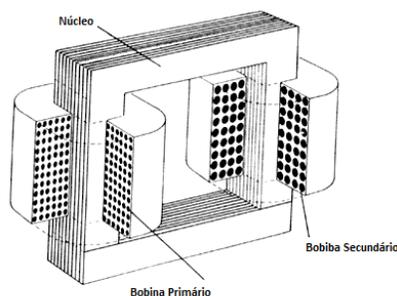


Figura 21- Transformador Monofásico com chapas de Fe-Si. [33]

2.5.4. Transformadores com Núcleos Maciços

Materiais sinterizados obtidos a partir de ligas de material magnético macio, com ferro e outros elementos como, por exemplo, níquel (Ni), silício (Si), fósforo (P) e cobalto (Co) podem ser utilizados na construção de núcleos magnéticos de dispositivos eletromagnéticos alimentados por corrente alternada (AC). Desta forma, núcleos de transformadores elétricos, podem ser construídos em blocos únicos, e deverão conferir aos mesmos, melhores características de desempenho. Materiais magnéticos macios para aplicações em corrente alternada, são os materiais da família do ferro, como as ligas ferro-silício e ferro-níquel, comumente utilizada na produção de dispositivos elétricos. Devido à natureza isotrópica dos núcleos magnéticos obtidos a partir da metalurgia do pó, fatores no projeto como empacotamento ou empilhamento de chapas laminadas, não são apropriadas para a redução das perdas totais. O sucesso da aplicação depende da forma e das dimensões das peças e das propriedades dos materiais.

A produção de núcleos com ligas ferro-silício e ferro-níquel por metalurgia do pó, é um processo industrial no qual as propriedades magnéticas são ajustadas por parâmetros do processo bem definidos, como a pressão de compactação, tempo e temperatura de sinterização. Os processos da metalurgia do pó permitem o uso de elementos, ligas e sistemas além da esfera dos tradicionais materiais magnéticos macios [18].

Um exemplo é a liga ferro-fósforo onde, com a adição de 0,8% de fósforo resulta em peças isotrópicas as quais, independente do ajuste da forma ou tamanho, é equivalente ao pacote de chapas laminadas de 0,65mm. A adição de fósforo melhora não somente as

propriedades magnéticas macias do ferro, mas também àsquelas das ligas ferro-silício. A extensão da faixa de materiais disponíveis por metalurgia do pó inclui também ferro-silício-fósforo e ferro-fósforo-estanho, aumentando a flexibilidade de escolha das combinações das propriedades magnéticas e elétricas e custo de produção total [20].

Os núcleos magnéticos de motores, por exemplo, construídos a partir dos processos da metalurgia do pó, em contraste ao método tradicional do empacotamento de chapas laminadas, oferecem vantagens na manufatura, uma vez que, os núcleos podem ser construídos a partir de blocos maciços. O processo tradicional de fabricação dos núcleos gera custos elevados, além de uma quantidade excessiva de sobras na estampagem, em torno de 40%. [17]

Outra vantagem de um núcleo sinterizado é que este, não tem as mesmas restrições no projeto como o pacote de lâminas. Três graus de liberdade estão disponíveis ao projetista em contraste aos dois graus impostos pelo simples empilhamento de chapas na forma de discos, uma vez que é possível projetar núcleos com variações de materiais e ligas. A sobra praticamente zero e o aumento do grau de liberdade do projeto, permitem uma redução nos gastos com energia na produção do material usado no dispositivo, permitindo também a otimização do circuito magnético relacionado a uma melhora no desempenho do dispositivo. A figura 22, mostra um comparativo entre o material compactado e dois tipos de lâminas de aço. [17]

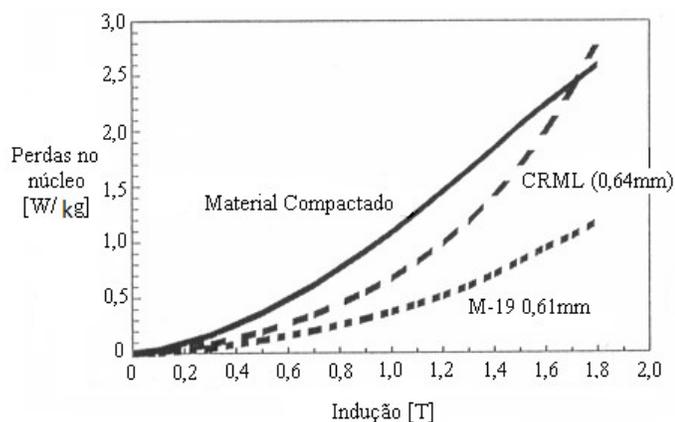


Figura 22-Comparação, em 60 Hz, da perda em núcleos de materiais sinterizados e de chapas laminadas de aço com fósforo, orientadas, de 0,64 mm e o aço M-19 de 0,61 mm. [17].

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Obtenção dos Núcleos dos Transformadores

3.1.1. Introdução

Para a realização da parte experimental, foram construídos núcleos de transformadores monofásicos de baixa potência. Estes núcleos foram construídos utilizando-se pós-metálicos e outras ligas que possam apresentar alta resistividade e alta permeabilidade magnética, estas características deveriam garantir um bom enlace magnético e baixas perdas por correntes de Foucault.

Foram analisados dois tipos de transformadores. O primeiro tipo é um transformador convencional, construído com chapas de Fe-Si. O segundo tipo é o transformador construído no LdTM com núcleo maciço e com algumas configurações de ligas. Destes transformadores foram obtidas algumas grandezas elétricas com ensaios de laboratório. Isto permitiu fazer as comparações entre o transformador convencional e os transformadores construídos a partir da metalurgia do pó. Os enrolamentos utilizados no dispositivo experimental e convencional foram os mesmos.

3.1.2. Geometria e Matrizes dos Núcleos E e T

Para avaliação das propriedades físicas de interesse (magnéticas e elétricas), corpos de prova foram confeccionados a partir de matrizes projetadas baseando-se na geometria de um transformador monofásico de baixa potência. O núcleo de transformador convencional consiste em duas partes, o núcleo tipo “E”, e o tipo “T”. No processo de montagem, estas duas partes são encaixadas para obtenção no núcleo final, onde após são colocados os enrolamentos do primário e secundário, que unidas aos enrolamentos primário e secundário, formaram os transformadores experimentais.

As figuras 23 e 24 mostram a geometria das matrizes:

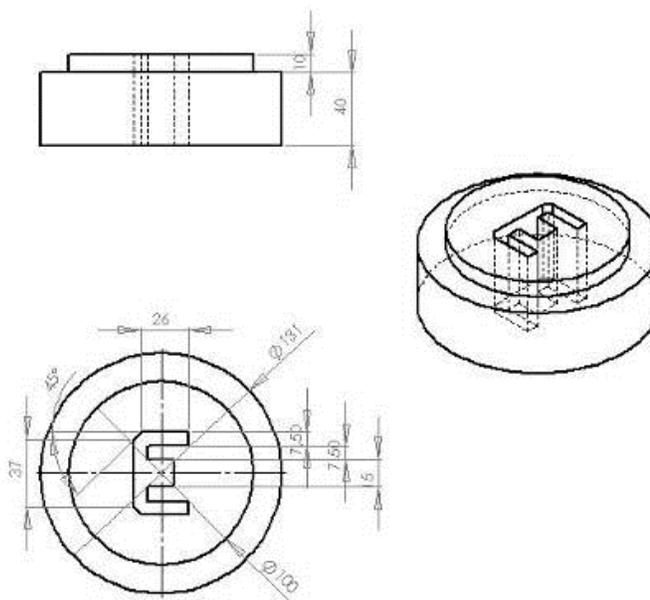


Figura 23– Desenho dimensional da matriz para compactação de núcleo “E”.

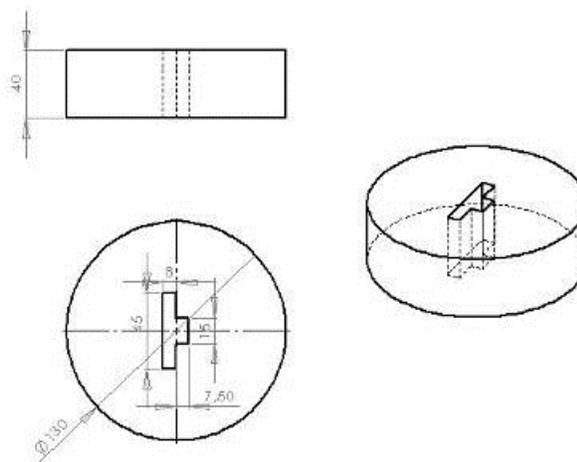


Figura 24- Desenho dimensional da matriz para compactação de núcleo “T”.

As figuras 25 e 26 mostram, respectivamente, as matrizes para obtenção dos núcleo “E” e “T”. Estas matrizes foram construídas a partir de aço ferramenta, usinadas, temperadas, revenidas e retificadas. Devido à existência de cantos vivos na cavidade e a possibilidade do rompimento da matriz, foi necessária a colocação de uma cinta de aço baixo carbono sobre a cavidade.

Estas cintas foram usinadas na oficina do LdTM, com material disponível.



Figura 25– Matriz do núcleo tipo “E”.



Figura 26– Matriz do núcleo tipo “T”.

3.1.4. Preparação dos Pós

A escolha dos pós utilizados para compactação dos núcleos dos transformadores foi baseada em uma das pesquisas desenvolvidas no GDER/LdTM/UFRGS, onde estão sendo estudadas ligas para núcleos de máquinas elétricas, com características similares as desejadas, bem como a disponibilidade das mesmas.

A tabela 5 mostra as ligas utilizadas para a confecção dos núcleos dos transformadores:

Tabela 5- Ligas utilizadas

Liga	
1	Fe
2	Fe + 50% Ni
3	Fe + 1% Resina HRJ
4	Fe + 50% Ni + 10% Baquelite

Os pós foram pesados e misturados em um misturador convencional tipo cone. A figura 27 mostra a fotografia da balança utilizada para pesagem dos componentes das ligas, e a figura 28 apresenta a fotografia do misturador.



Figura 27– Balança para pesagem dos componentes.



Figura 28– Misturador tipo cone.

3.1.5. Compactação

Nesta etapa, uma quantidade de pós é colocada na cavidade da matriz montada na prensa de compressão, a compactação ocorre por deslocamento simultâneo dos punções superiores e inferiores, à temperatura ambiente [31].

Nos primeiros movimentos do punção, a compactação causa apenas o adensamento do pó, sem deformação das partículas e sem produzir adesão entre elas. Com o aumento da pressão, ocorre deformação plástica das partículas, formando uma espécie de “solda fria” [31].

A compactação gera uma peça com formato final ou aproximado à peça a ser fabricada, chamada de compactado verde. [31]

Os corpos de prova foram compactados a uma pressão de 300×10^6 Pa, ou aproximadamente 300 kN/cm^2 . Através da divisão do núcleo do transformador em duas partes, uma na forma de “E” e a outra na forma de “T”, calculando-se as respectivas áreas e aplicando a pressão estipulada, temos os resultados da pressão de compactação mostrados na tabela 6:

Tabela 6- Pressão de compactação.

Forma	Área [cm²]	Pressão [kN/cm²]
E	9,58	aprox..300
T	4,65	aprox. 140

Definida a pressão de compactação pôde ser estipulada a prensa. Foi utilizada uma prensa manual de 30 toneladas. A figura 29 mostra a disposição da matriz para compactação.



Figura 29– Matriz para compactação.

3.1.6. Sinterização

Foi aplicado o método da sinterização nas amostras composta exclusivamente de pó de ferro e nas amostras de compostas por 50% de pó de ferro e 50% de níquel. A sinterização foi realizada em forno tubular tipo mufla, com atmosfera controlada e gás marrom (25% de Hidrogênio e 75% de Nitrogênio). Foi utilizada uma taxa de aquecimento de 15°C por minuto, até a temperatura de 500 graus, onde as peças permaneceram por 40 minutos. A seguir a temperatura é elevada para 1.120°C onde ocorre de fato a sinterização. Os núcleos dos transformadores ficam nesta temperatura por 30 minutos, em seguida os núcleos são resfriados até a temperatura ambiente dentro do próprio forno. A Figura 30 mostra a curva de sinterização.

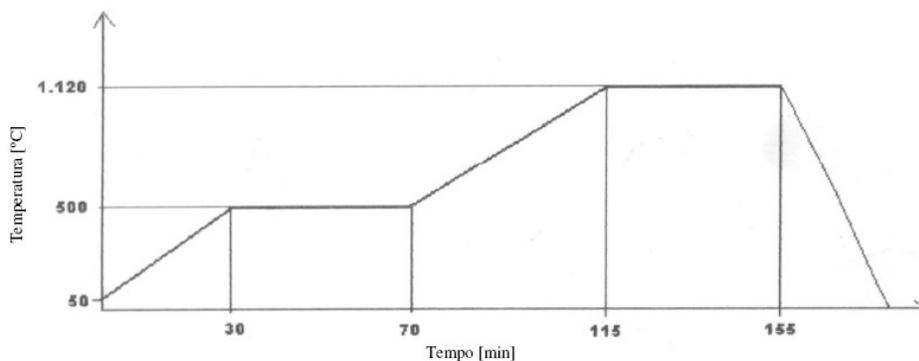


Figura 30 - Curva de Sinterização [34]

3.1.7. Cura

O processo de cura é realizado para as amostras compactadas com a resina fenólica HRJ, nome comercial da resina fornecida pela SI Group Crios Ltda. As amostras foram curadas em um forno com atmosfera ambiente, de acordo com o fabricante, este processo deve seguir o ciclo com base nas especificações das resinas testadas, onde o ciclo é ilustrado na figura 31. Deve-se aquecer até a temperatura de 90°C, e nesta temperatura, mantém-se um patamar de 2 minutos; novamente aumenta-se a temperatura até 155°C com novo patamar de 2 minutos; nova elevação de temperatura até 220°C, e mantém-se novo patamar de 2 minutos. Por fim o forno é desligado e é feito o resfriamento natural das peças curadas.

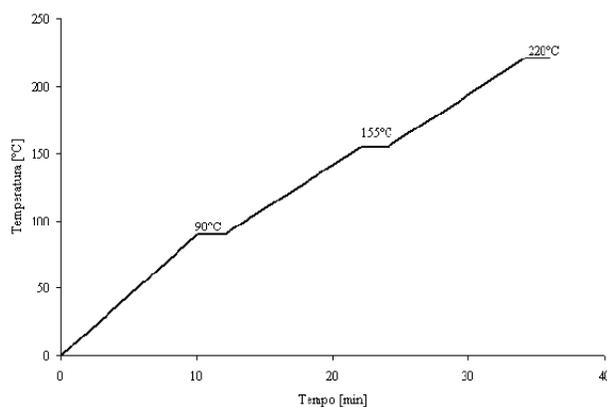


Figura 31 - Curva de Cura [34]

3.1.7. Transformadores Obtidos

Para definição da espessura dos corpos de prova, foram adquiridos transformadores com geometrias levemente maiores e menores que a da cavidade da matriz, uma vez que, conforme os tipos de pós utilizados, pode haver uma expansão ou contração da peça na sinterização ou cura. Os transformadores adquiridos podem ser vistos na figura 32:



Figura 32- Transformadores 6V/500mA e 12V/600mA.

O estudo teórico de transformadores mostra que, a tensão induzida nos enrolamentos do primário e secundário, é função da permeabilidade magnética do núcleo. Na realidade esta característica é fundamental para o dimensionamento do número de espiras dos enrolamentos.

No caso do enrolamento do primário, a tensão induzida na bobina, tende a se opor, em polaridade, a tensão no terminal. Para um transformador ideal, tensão nos terminais e induzidas é idêntica. Para um transformador real, estas tensões diferem devido às perdas elétricas e magnéticas [3]. A figura 33 ilustra a composição do núcleo do transformador por chapas metálicas e o núcleo compactado através da metalurgia do pó.

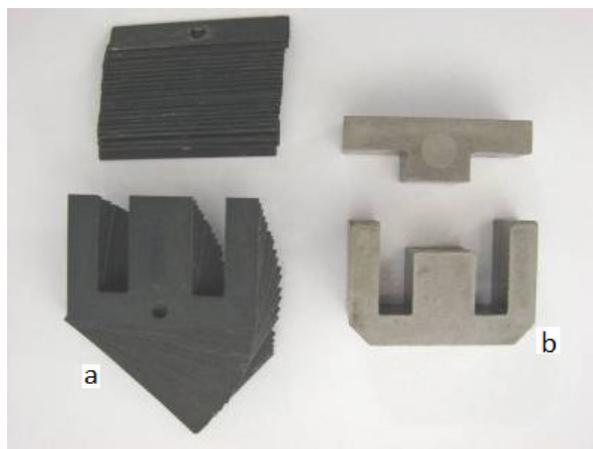


Figura 33 – Chapas metálicas de um transformador convencional (a) e o núcleo compactado por metalurgia do pó (b).

Salienta-se que, este estudo, tomou como base um transformador convencional e comercial de baixa tensão e potência. Para um estudo comparativo, optou-se por construir transformadores de geometria e dimensões o mais próximas possíveis, deste

convencional. Assim, os enrolamentos utilizados nos transformadores desenvolvidos neste trabalho, foram retirados dos transformadores convencionais. Este procedimento foi utilizado para que fosse possível uma análise comparativa do transformador convencional e aqueles desenvolvidos. Entretanto, existem diferenças entre a permeabilidade magnética das ligas desenvolvidas para os núcleos maciços e as chapas do núcleo convencional. Isto ocasiona diferentes tensões induzidas, tanto de liga para liga (núcleos por metalurgia do pó) quanto das ligas para o núcleo convencional (chapas laminadas). Um estudo mais profundo sugere que, para cada tipo de liga do núcleo, deve ser calculado o número de espiras dos enrolamentos do primário e secundário.

Para análise de desempenho dos transformadores obtidos através da metalurgia do pó, foram compactadas oito amostras de núcleos, duas de cada liga. Depois de sinterizadas (ligas 1 e 2), e curadas (ligas 3 e 4), estas foram usinadas afim de se obter um bom acoplamento, e a mesma dimensão do transformador convencional que foi utilizado para comparação.

A mostra 04 não foi utilizada nos ensaios, pois foi descartada em função da não conformação num núcleo denso, após a cura, o material se mostrou muito frágil e foram descartadas as amostras. A figura 34 mostra a fotografia dos núcleos após a usinagem:



Figura 34– Amostras dos núcleos compactados obtidos através da metalurgia do pó.

Para se obter a espessura dos corpos de prova bem próxima a dos transformadores adquiridos, foram usinados calços para sustentar as matrizes e possibilitar a medida exata da altura da cavidade. Sabendo-se a espessura requerida, e que a taxa de compressão dos pós, para a pressão utilizada, fica em torno de 50% da altura da cavidade preenchida, pode-se

calcular a altura exata destes cálculos. A figura 35 mostra a fotografia dos calços montados na matriz.



Figura 35– Calços para a matriz.

Também foi usinado um anel, a ser utilizado no processo de extração dos corpos de prova. Em prensas utilizadas industrialmente na confecção de peças por metalurgia do pó, um sistema mecânico, elétrico ou hidráulico, faz com que a peça seja pressionada pelo punção inferior ou superior, fazendo com que esta saia de dentro da cavidade. Em prensas mais simples, utiliza-se um artifício para esta extração. Geralmente, retira-se o punção superior, posiciona-se um anel sobre a cavidade da matriz, forçando este anel para baixo, com o uso da própria prensa. Como o punção inferior está fixado sobre a mesa da prensa, a cavidade desliza sobre o punção, e a peça é extraída por cima da cavidade. A figura 36 mostra a fotografia do anel:



Figura 36– Peça para extração.

A figura 37 mostra os transformadores convencionais e os núcleos sinterizados. A figura 38 apresenta um transformador convencional e um transformador já montado num núcleo obtido a partir da M/P.

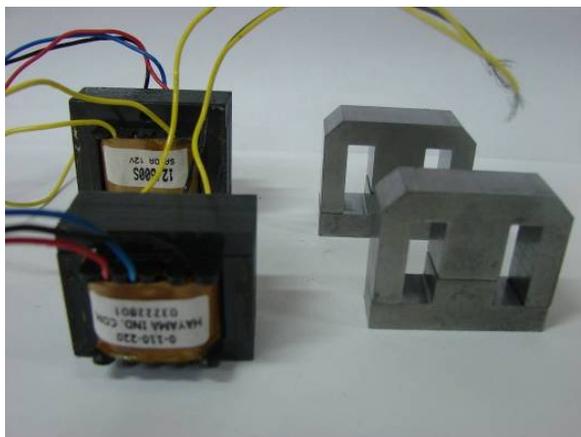


Figura 37– Transformadores convencionais à esquerda e os núcleos compactados à direita.

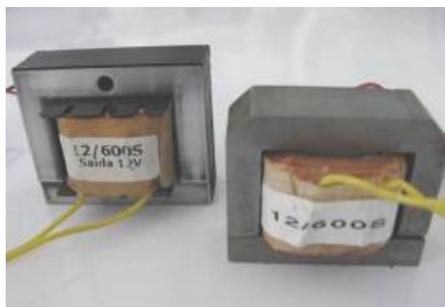


Figura 38– Transformadores: Convencional (esquerda) e compactado (direita).

3.2. ENSAIOS

3.2.1. Introdução

Para a análise final, foram realizados testes com os vários tipos de núcleos de transformadores confeccionados e também com o transformador convencional, onde foi seguida a seguinte metodologia:

Para cada núcleo testado, foram utilizadas tensões de 0 até 127V, variando a tensão de 10 em 10 volts. A tensão é regulada pelo VARIAC. Então, pôde-se medir a corrente que

circula no primário e a tensão do secundário no multímetro. Através das formas de ondas observadas no osciloscópio, pode-se calcular a defasagem entre elas, estas formas de onda podem ser observadas na figura 39.

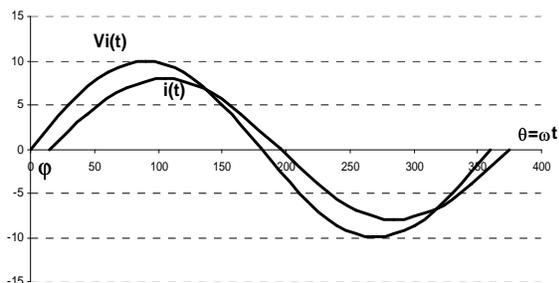


Figura 39 - Formas de onda de tensão e corrente e sua defasagem [35].

Foram realizadas medições com os transformadores a vazio e com uma carga de 180, com os valores de massa obtidos para cada núcleo, foram levantados os valores referentes às seguintes grandezas:

R_L – Carga resistiva ligada na saída

V_P – Tensão do enrolamento primário

I_P – Corrente do enrolamento primário

θ – Defasagem entre tensão e corrente no primário

P_P – Potência do primário – Calculada como:

$$P_p = V_p \cdot I_p \cdot \cos(\theta) \quad (\text{equação n}^\circ 08)$$

R_P – Resistência do enrolamento do primário

V_S – Tensão do enrolamento secundário

I_S – Corrente do enrolamento secundário

P_S – Potência do secundário:

R_S – Resistência do enrolamento do secundário

P_{ele} – Perdas elétricas totais – Calculada como:

$$P_{ele} = (I_p^2 \cdot R_p) + (I_s^2 \cdot R_s) \text{ (equação nº 09)}$$

P_{mag} – Perdas magnéticas no núcleo – Calculada como:

$$P_{mag} = P_p - P_s - P_{ele} \text{ (equação nº 10)}$$

η – Rendimento – Calculado como:

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \text{ (equação nº 11)}$$

3.2.2. Curvas de Histerese

Os dados obtidos para a caracterização das propriedades magnéticas foram obtidos a partir das curvas de histerese das amostras estudadas e da referência (ferro puro sinterizado) O método utilizado segue a norma ASTM A773 (*Standard Teste Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedure with dc Electronic Hysteresigraphs*). Este método fornece o procedimento de obtenção de curvas de histerese através de um Traçador de Curvas de Histerese Magnética, modelo TLMP-TCH-14, para determinação de propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel (toróide) [30].

Para aplicação deste método é necessário a preparação de amostras, que consiste na bobinagem (enrolamento de fios de cobre) de espiras primárias e secundárias no anel, conhecidas como Anel de Roland (figura 42). O procedimento consiste em: isolar o anel com filme plástico para evitar o descascamento do fio esmaltado, enrolamento de espiras secundárias e novo isolamento seguido do enrolamento das espiras primárias[30].



Figura 40 Etapas da preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (D) enrolamento primário [30].

3.2.3. Curvas de Magnetização

As curvas de magnetização também são obtidas no Traçador de Curvas de Histerese, magnética. Em síntese é obtida através da aplicação de um campo magnético H , aumentando o campo magnético até a saturação magnética (B). Inicialmente o fluxo magnético aumenta rapidamente, depois esta indução tem um aumento lento.

3.2.4. Ensaio de Desempenho nos Transformadores

Foi implementada uma bancada para testes com um variac (regulador de tensão), três multímetros e um osciloscópio como podemos verificar na figura 42. Para cada núcleo testado, foram utilizadas tensões de 0V até 127V, variando a tensão de 10 em 10 volts. A tensão é regulada pelo variac, controlando-a no primeiro multímetro (b). Então, pôde-se medir a corrente que circula no primário no multímetro (c) e finalmente, a tensão do secundário no terceiro multímetro (d). Através das formas de ondas observadas no osciloscópio (e), pode-se calcular a defasagem entre elas. Para cada núcleo testado, alterou-se o valor de carga do secundário (a vazio e 18 ohms).

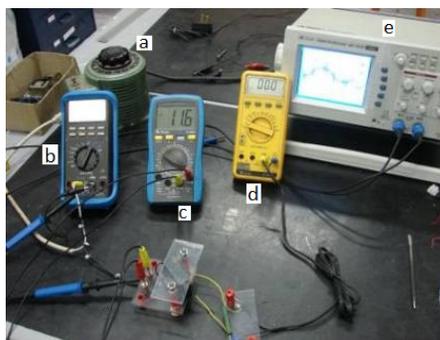


Figura 41 – Bancada de testes.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

O trabalho realizado tem por objetivo avaliar grandezas magnéticas e elétricas de transformadores de tensão de baixa potência cujos circuitos magnéticos foram obtidos utilizando M/P. Foram construídos núcleos com ferro puro, 50% ferro + 50% níquel, ferro + 1% de resina fenólica HRJ e por ultimo um núcleo com 40% de ferro + 50% de níquel e 10% de baquelite, sendo que esta ultima não foi utilizada em função da inconsistência física.

4.1 PROPRIEDADES ELÉTRICAS

4.1.1. Tensão de entrada x tensão de saída.

As figuras 42 e 43 apresentam respectivamente os gráficos que relacionam a tensão no primário V_p e no secundário V_s , sem carga e com carga.

As relações entre tensão no enrolamento secundário $V_S[V]$ e primário $V_P[V]$, sem carga e com uma carga de 18 Ω , nos mostram que há uma perda considerável nos enrolamentos. O melhor desempenho é obtido com o núcleo de material resinado e o pior desempenho é obtido com o núcleo obtido com a liga de Fe-Ni. Sem carga não há circulação de corrente no enrolamento secundário, isto faz com que a tensão entregue nesta bobina seja maior que a obtida na simples relação de transformação, com carga a tensão entregue é menor. Pode-se observar que a queda de tensão no transformador tradicional é maior que a do transformador com núcleo maciço.

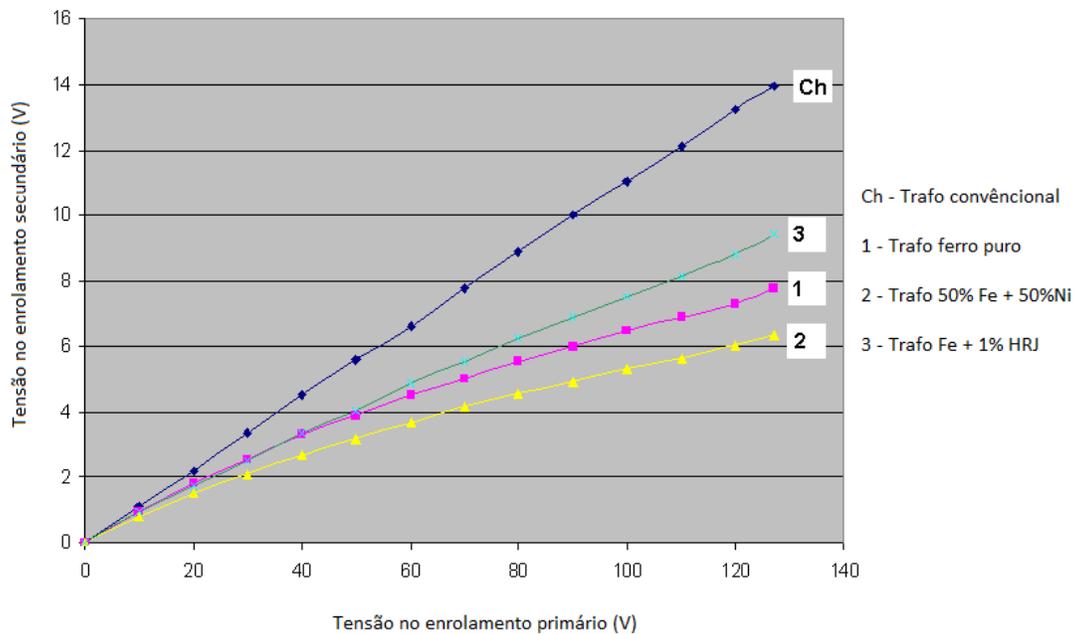


Figura 42– VS [V] / VP [V] (a vazio) para todos os compostos

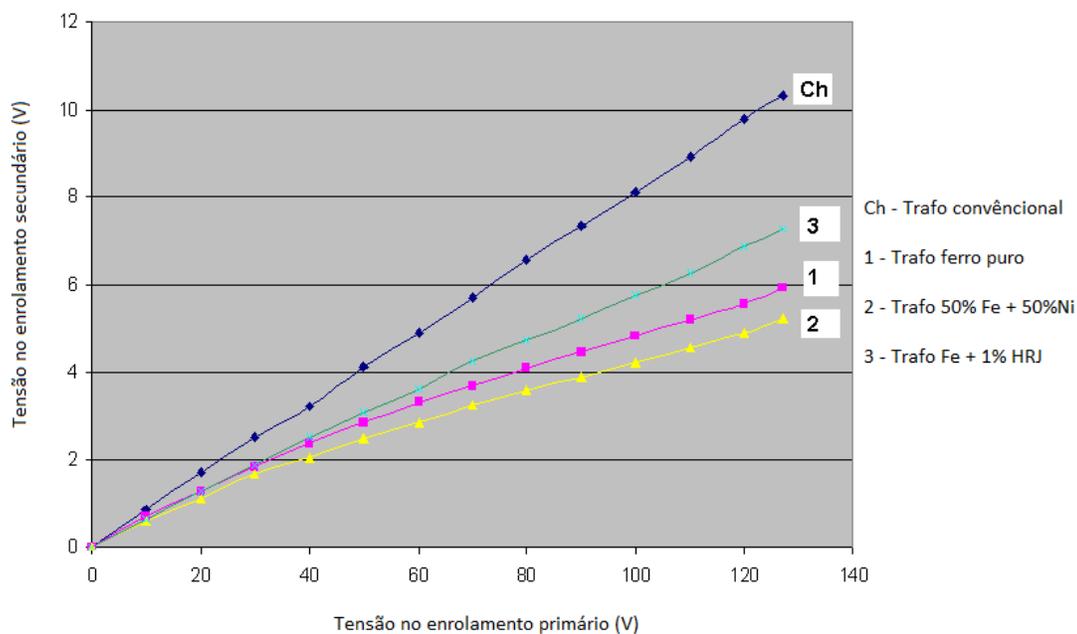


Figura 43– VS [V] / VP [V] (com carga RL = 18 O) para todos os compostos

4.1.2 Relação entre as perdas elétricas e a corrente no secundário do transformador

A figura 44 apresenta a curva de obtida pela equação 09, onde foram imputados dados obtidos nas medições de laboratório. Estas medições foram realizadas sem carga nos transformadores. Os valores registrados indicam uma perda por corrente de fuga bastante acentuada. Os valores registrados para o núcleo conformado com ferro puro, apresenta o melhor rendimento em relação ao transformador convencional. Porém este ainda apresenta perdas muito significativas em relação ao transformador convencional. Os outros dois modelos ampliaram ainda mais as perdas, foi identificado que estas perdas tem maior variação com a aplicação de corrente no secundário.

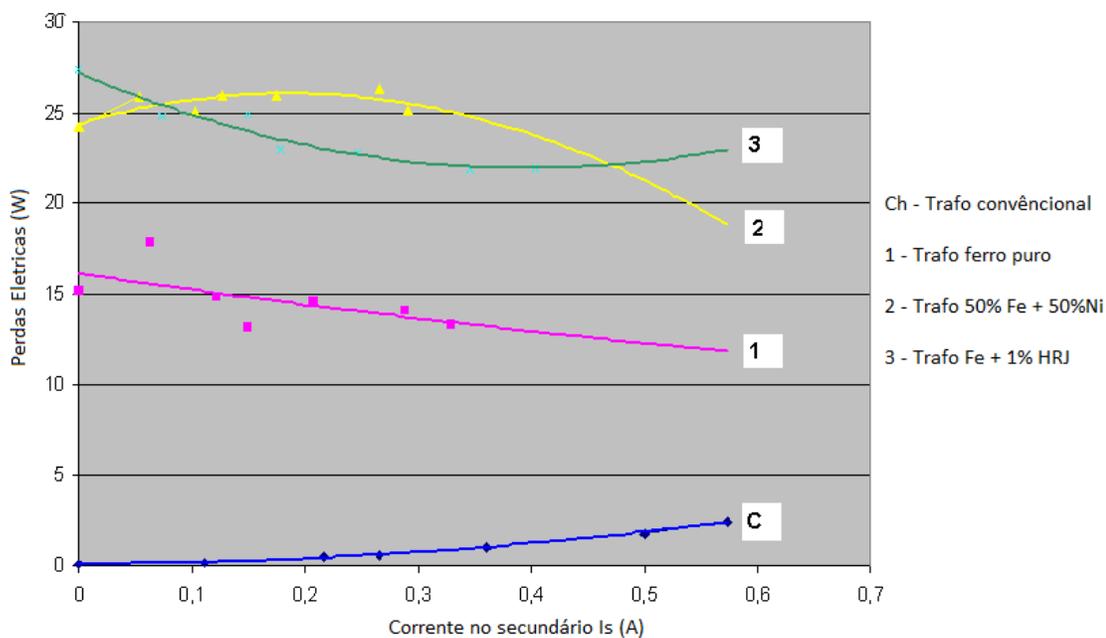


Figura 44– Pele [W] / I_s [A] (a vazio) para todos os compostos

4.1.3 Relação entre as perdas magnéticas e a corrente no secundário do transformador.

A Figura 45 apresenta então as perdas magnéticas relacionadas com a corrente do secundário do transformador. Os resultados apresentados nos mostram que as perdas mais uma vez se mostraram significativas nos transformadores construídos com M/P. O melhor desempenho entre os transformadores maciços foi obtido com o núcleo construído com

material resinado. Mesmo assim para correntes mais altas as diferença entre este e o núcleo feito a base de Fe-Ni, ficaram próximos, conforme mostra a figura abaixo:

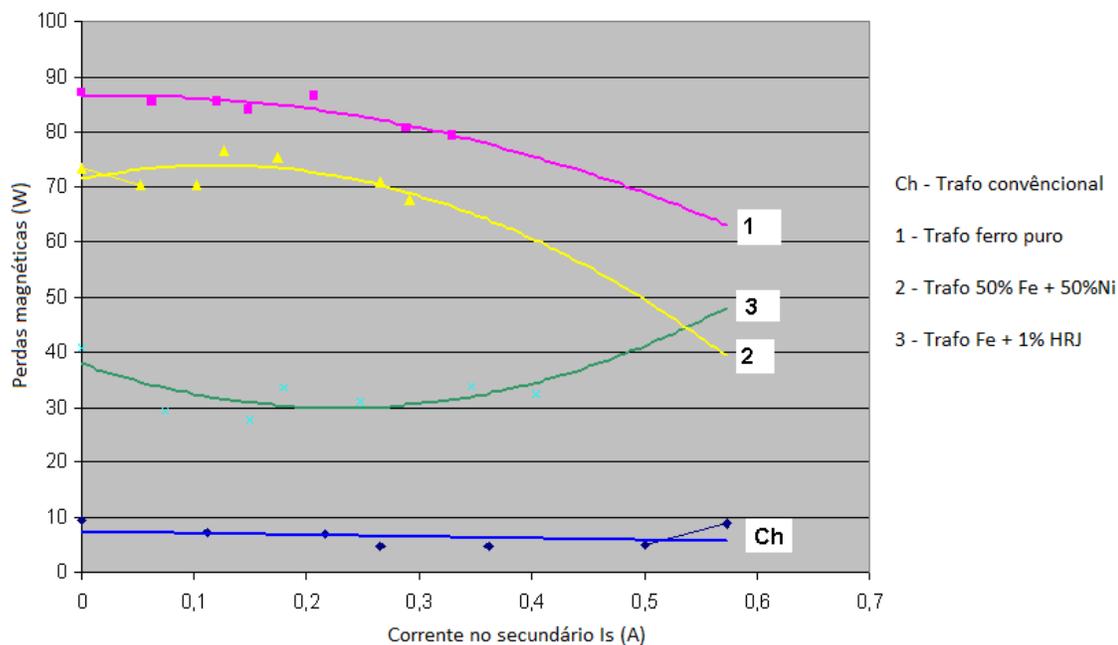


Figura 45– Pmag [W] / IS [A] (a vazio) para todos os compostos

4.1.4 Avaliação do rendimento dos transformadores.

Foram realizadas duas avaliações do rendimento do transformador, na figura 46 é apresentado o resultado da avaliação do rendimento, tendo a circuito secundário aberto, ou seja, sem carga. O transformador construído convencional apresentou um rendimento típico de uma máquina elétrica estática. Os transformadores maciços apresentaram uma curva de rendimento bastante linear e com valores muito próximos entre si, com destaque para o dispositivo construído com Fe mais a resina fenólica. Mesmo este, possui rendimento muito inferior ao obtido no dispositivo convencional.

A figura 47 mostra a análise de rendimento dos dispositivos acrescentado uma carga no enrolamento secundário de 180. Foi aplicada uma tensão no primário do transformador e foram efetuadas leituras de tensão sobre a carga. O transformador convencional apresentou os melhores resultados, com baixa variação no rendimento, obtivemos valores muito próximos dos 60%. Os transformadores maciços apresentaram rendimento muito abaixo do transformador convencional. O melhor resultado ainda foi obtido com o dispositivo com o

núcleo obtido a partir da mistura de Fe com resina fenólica, mesmo assim da ordem de 10%, o que o torna inviável. O pior resultado foi obtido com a amostra 2, onde o rendimento ficou na ordem de 5%.

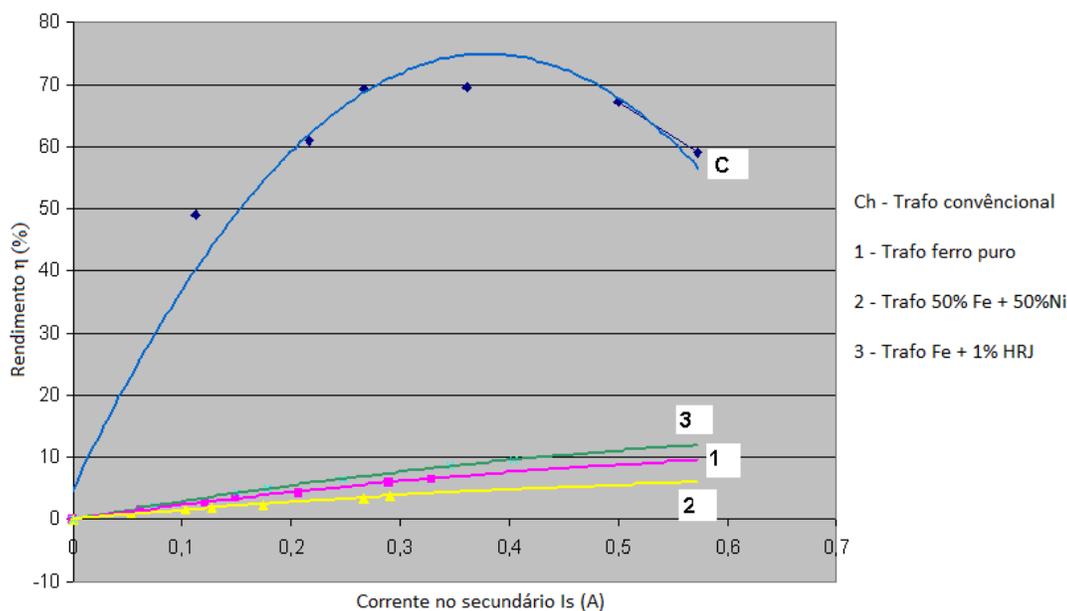


Figura 46 - Rendimento η [%] / I_s [A] (a vazio) para todos os compostos

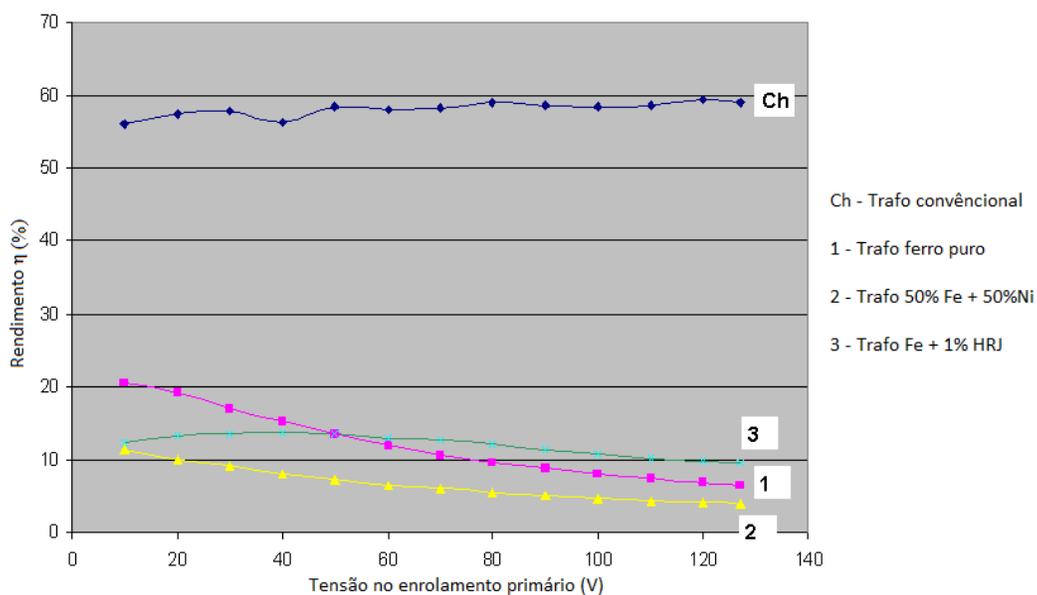


Figura 47 – η [%] / VP [V] (com carga $R_L = 18 \Omega$) para todos os compostos

4.1.5 Perdas elétricas e magnéticas com carga.

Foram analisadas ainda as perdas elétricas e magnéticas a partir dos dados obtidos na bancada de testes, desta vez com a carga de 180. Os dados foram aplicados nas equações 09 e 10 e traçados os gráficos. A figura 48 apresenta o gráfico de perdas elétricas relacionados com a tensão no primário. As perdas elétricas para o transformador convencional foram baixas, conforme o esperado. As perdas elétricas para os outros núcleos foram altas, em especial para o núcleo composto por Fe e Ni. O Trafo curado, utilizando a resina fenólica, obteve resultado muito próximo ao do anteriormente mencionado. Isto demonstra que há geração de correntes de Foucault em grande escala, provocando este tipo de perda sob a forma de aquecimento.

As perdas magnéticas com carga podem ser observadas na figura 49. Estas perdas ficaram mais acentuadas nas amostras com núcleos sinterizados, o melhor resultado ficou com o núcleo curado, ainda assim apresentam perdas consideráveis em relação ao transformador convencional. Isto se deve a saturação do fluxo no circuito magnético.

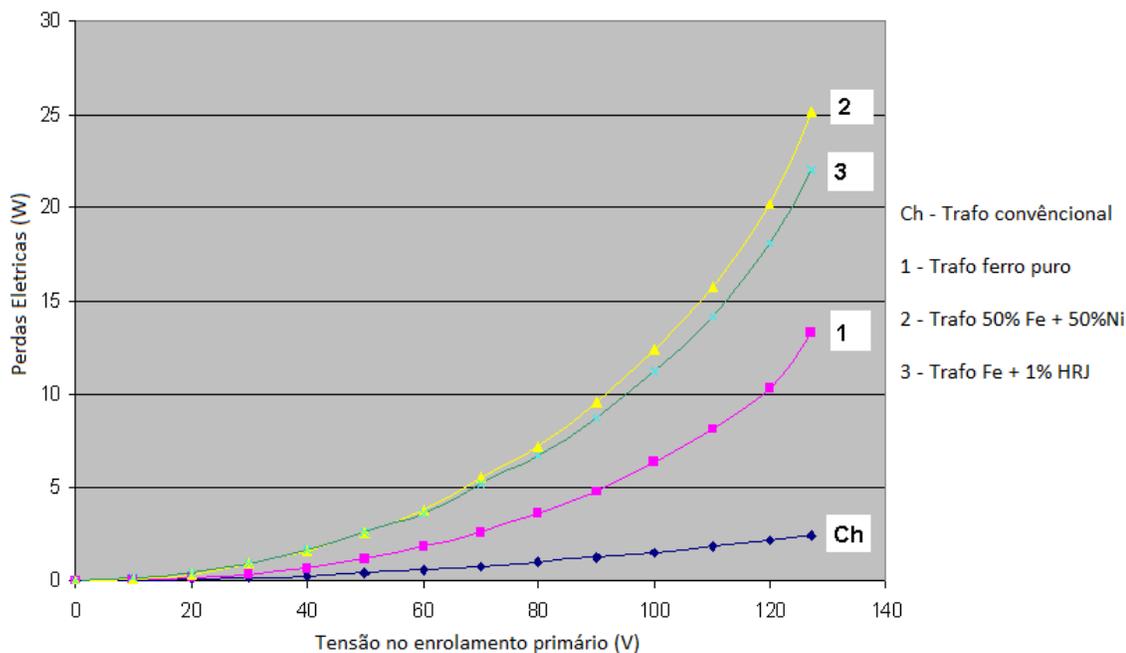


Figura 48 – Pele [W] / VP [V] (com carga RL = 180) para todos os compostos

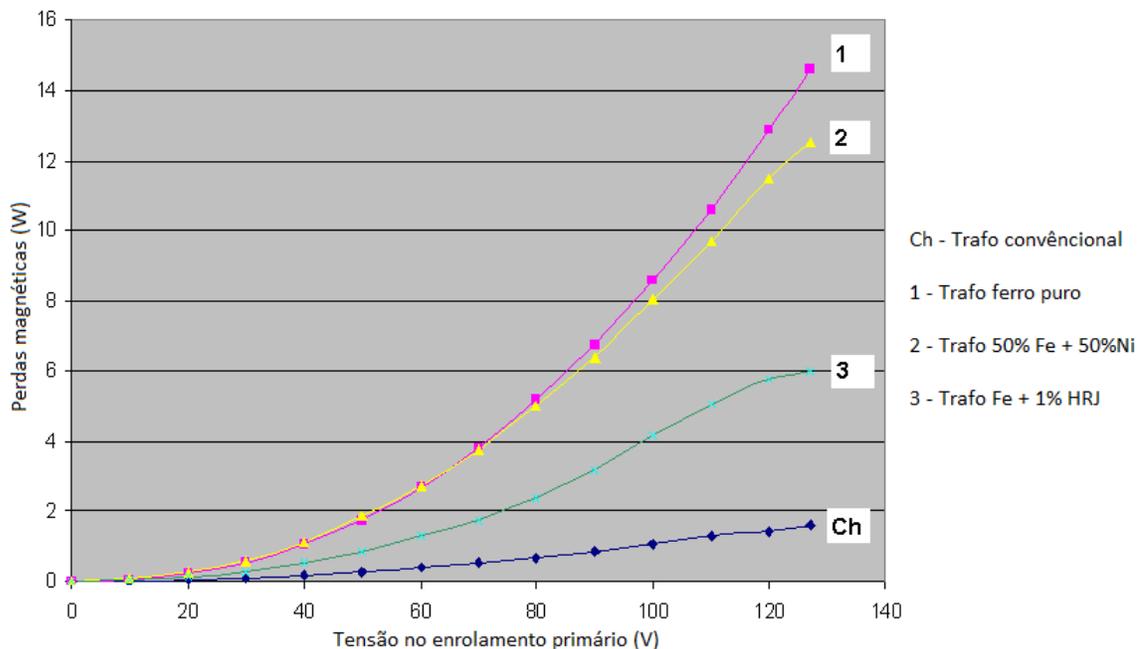


Figura 49 – Pmag [W] / VP [V] (com carga RL = 18 O) para todos os compostos

4.1.6 – Resultados em frequência.

Todos os ensaios acima foram realizados com a frequência de operação do transformador convencional que é de 60 Hz. A figura 50 mostra o gráfico obtido em outra dissertação que tinha entre outros objetivos, comparar várias ligas em diferentes frequências de operação.

As comparações foram feitas entre o transformador com chapas de aço e transformadores, cujos núcleos magnéticos foram construídos com ferro e resina termofixa HRJ-10236, sendo que estes possuíam as concentrações de 1%, 3% e 5% de resina.[41]

Os resultados obtidos mostram que há um decréscimo das perdas com o aumento da frequência, sendo que em frequências acima de 800Hz estas perdas quase se equiparam as perdas nos núcleos construídos com chapas de aço.

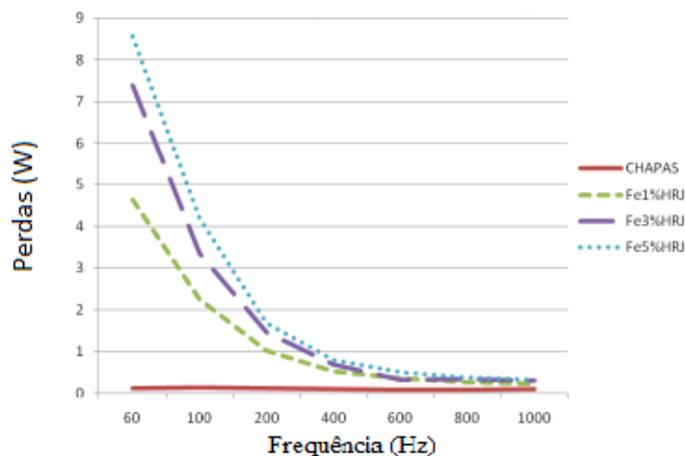


Figura 50- Perdas Magnéticas em Transformadores com Núcleo de Chapas e Fe com 1%, 3% e 5% de HRJ-10236 [41]

4.1.7 – Resistividade Elétrica

Foram realizadas medições de resistividade das amostras que compuseram os núcleos fabricados no LdTM. Os resultados obtidos apresentam os valores de resistividades e pode-se facilmente observar um significativo aumento da resistividade elétrica, resistividade esta, altamente desejada para um núcleo de transformador, uma vez que este é o fator determinante para a redução das perdas por correntes de fuga. Os valores são apresentados na tabela 07.

Tabela 7 - Resistividade Elétrica

<i>Material</i>	ρ_e [$\mu\Omega \cdot m$]
Fero Puro	0,139
Fe50%Ni	0,261
Fe1%Resina	1.248,000

4.2 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

Foram traçadas as curvas de histerese bem como as curvas de magnetização das amostras compactadas no LdTM. Os ensaios foram realizados conforme descrito nos itens 3.2.3 e 3.2.4 deste trabalho. As figuras 51, 52 e 53, representam respectivamente as curvas de

histerese traçadas com os núcleos construídos a partir de ferro puro, ferro e níquel e ferro adicionada de resina fenólica HRJ.

4.2.1 Curva de histerese para amostras com núcleo sinterizado com ferro puro.

A curva de histerese apresentada na figura 51, nos mostra a característica do ferro enquanto material macio. O valor de coercitividade magnética (H_c) ficou na ordem de 500 A/m. A permeabilidade magnética relativa ficou em 3000, indução residual em 0,8T e a indução de saturação (B_{max}) em aproximadamente 1 T.

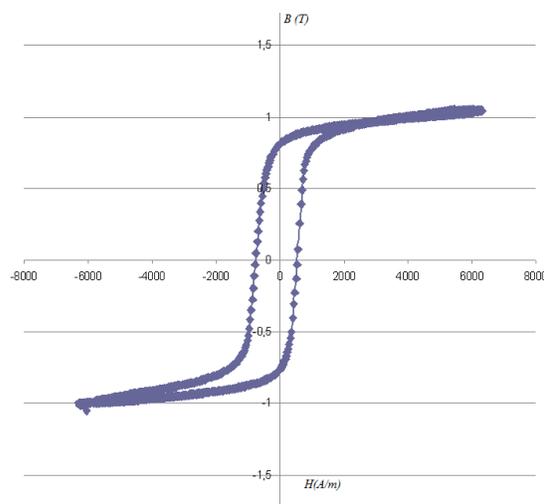


Figura 51- Curva de Histerese Fe puro.

4.2.2 Curva de histerese para núcleo do transformador sinterizado com a liga 50%Fe+50%Ni;

A curva de histerese apresentada na figura 52, nos mostra a característica da liga 50% Fe+50%Ni. A área de curva é menor do que a área da curva de histerese do Fe puro. Caracterizando um material com melhores propriedades magnéticas que o Fe puro. O valor coercitividade magnética (H_c) ficou na ordem de 80 A/m. A permeabilidade magnética relativa ficou em 600 e indução residual (B_r) em 0,1T e a indução de saturação (B_{max}) em aproximadamente 1 T.

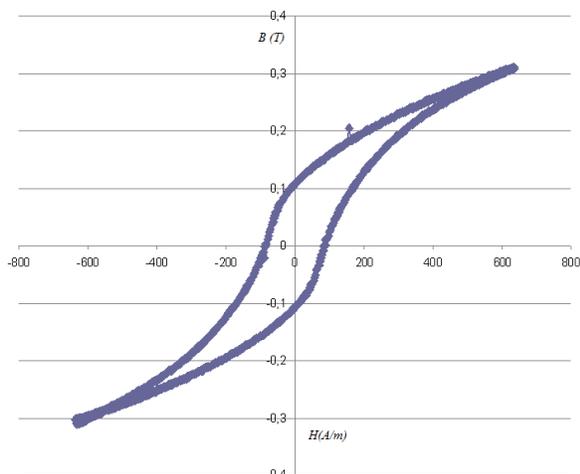


Figura 52- Curva de Histerese 50%Fe+50%Ni

4.2.3 Curva de histerese para núcleo de transformador com liga curada de Fe+1% resina HRJ.

A curva de histerese apresentada na figura 53, nos mostra a característica da liga Fe + 1% HRJ. A área da curva de histerese do material compósito possui qualidades inferiores aos apresentados nas duas amostras anteriores. O valor coercitividade magnética (H_c) ficou na ordem de 240 A/m. A permeabilidade magnética relativa ficou em 180 e indução residual (B_r) em 0,087 T e a indução de saturação (B_{max}) em aproximadamente 0,54 T.

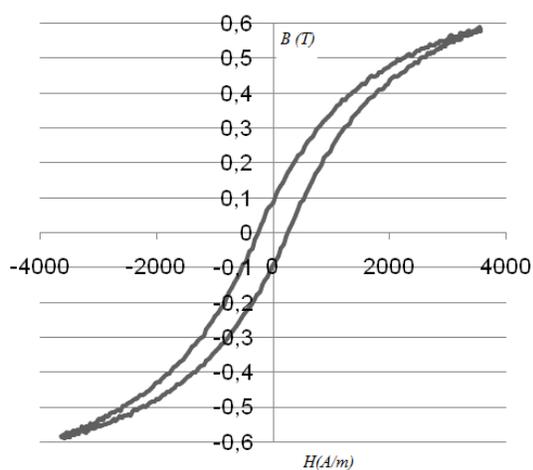


Figura 53 - Curva de Histerese Fe + 1% Resina HRJ

4.2.4 Curvas de magnetização.

As figuras 54, 55 e 56 apresentam respectivamente as curvas de magnetização para os núcleos fabricados com ferro puro, ferro + níquel e ferro adicionado da resina HRJ.

A curva de magnetização, indica de forma qualitativa e quantitativa o desempenho do transformador, levando em consideração, tanto a derivada da região inicial da curva, que indica o quanto o material pode absorver de fluxo magnético, quanto o ponto de saturação do material utilizado no dispositivo.

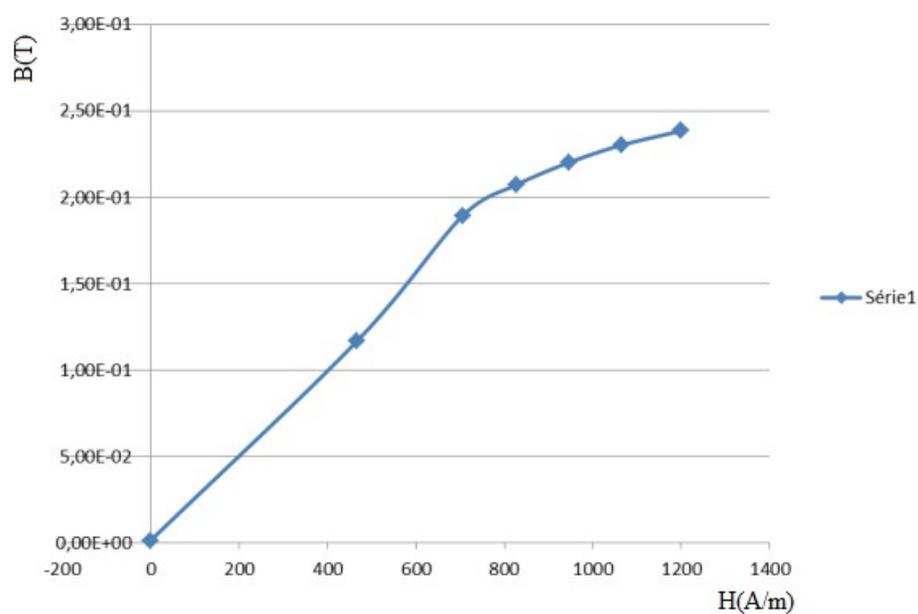


Figura 54- Curva de Magnetização Fe 100%

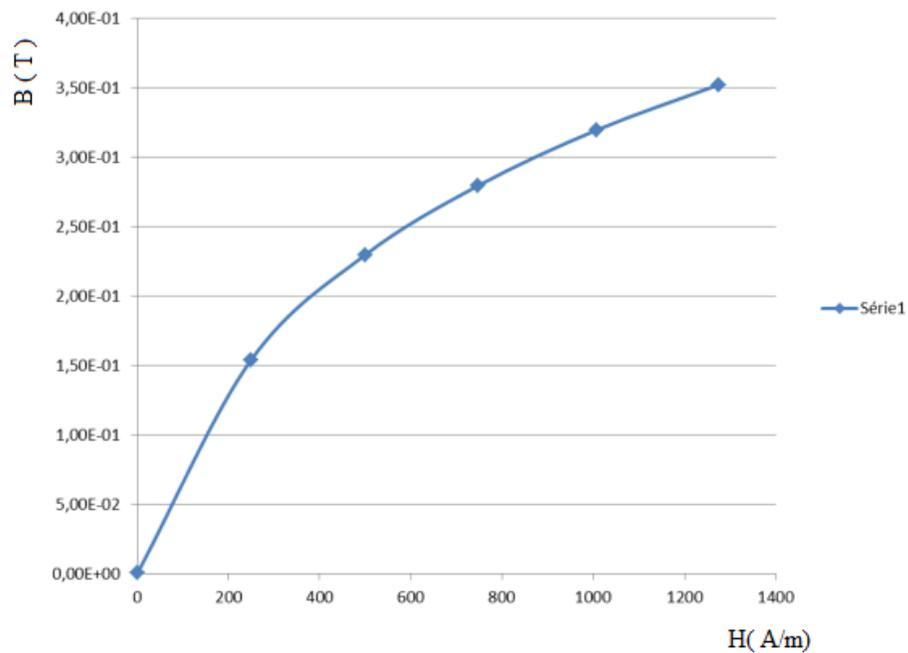


Figura 55- Curva de Magnetização FE + 50Ni

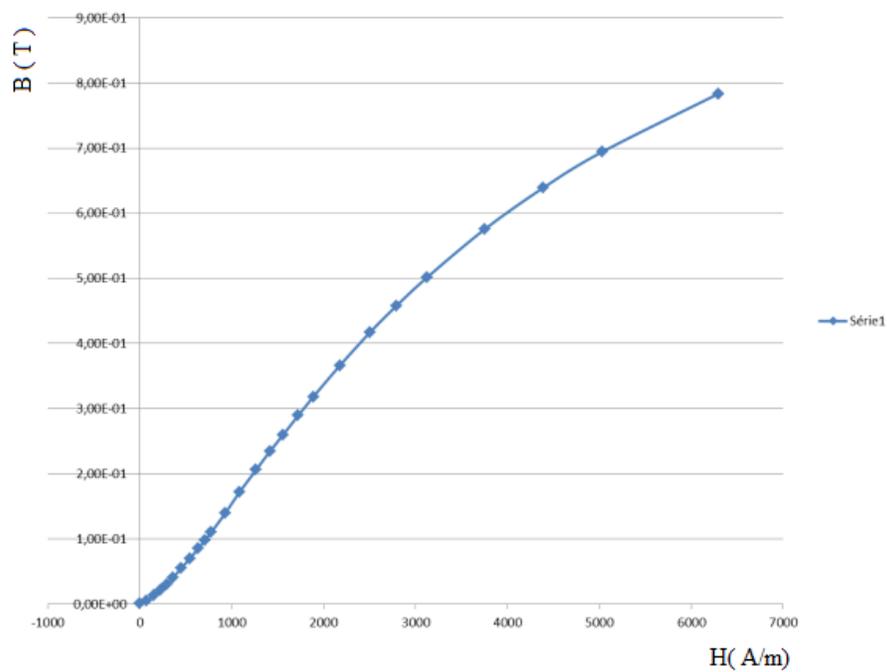


Figura 56- Curva de Magnetização Fe + 1%HRJ

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir dos transformadores construídos no LdTM utilizando M/P ficaram muito aquém dos transformadores convencionais, construídos com chapas de aço. Os núcleos sinterizados apresentaram boas características magnéticas, especialmente no que diz respeito à permeabilidade relativa e indução máxima de saturação.

O baixo rendimento nos núcleos obtidos com M/P é especialmente observado em aplicações de baixa frequência, objeto deste estudo e utilizada na maioria dos dispositivos que utilizam transformadores, sejam este de baixa, média ou alta tensão. Porém a literatura indica que em altas frequências estas perdas praticamente se igualam, especialmente a partir de 800Hz.

As ligas resinadas apresentam menor permeabilidade relativa, mesmo assim o resultado do núcleo produzido com a liga resinada apresentou melhores resultados que as ligas sinterizadas. Mesmo com uma permeabilidade reduzida, exigindo assim uma corrente de magnetização maior para entregar os mesmos níveis de tensão elétrica, estas ligas apresentam uma resistividade muito maior, reduzindo assim as correntes de Foucault.

O rendimento de todas as ligas obtidas pela M/P ficaram muito abaixo do transformador comercial construído com chapas de aço. Em baixa tensão de operação o rendimento do núcleo ferro puro é superior aos das outras ligas, uma vez que induz uma menor densidade de fluxo magnético e também uma menor corrente de Foucault. A medida que a tensão é aumentada a característica de melhor resistividade elétrica da liga resinada, provoca um melhor rendimento deste dispositivo.

Os transformadores de energia são máquinas estáticas de relativa baixa complexidade, podem ter altas taxas de rendimento, se comparadas a outras máquinas elétricas girantes. Porém o seu estudo enquanto dispositivo eletromagnético é muito versátil, os conceitos estudados para este tipo de máquina pode ser facilmente extrapolado para outras máquinas, guardadas as devidas proporções de tamanho, aplicabilidade e características elétricas de operação.

6. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.

Este trabalho revelou algumas características de materiais obtidos a partir da M/P com objetivos ligados aos fenômenos magnéticos, porém levantaram outras possibilidades:

Investigar o processo de mistura e sinterização ou cura de pós com objetivo de produzir materiais com características magnéticas e elétricas mais apropriadas.

Avaliar o processo de fabricação de um transformador pela ótica tradicional e utilizando a M/P, com vistas a identificar o seu tempo de fabricação e custos envolvidos neste processo.

Investigar outras possibilidades de configurações de pós, com diferentes composições e processos de mistura, sinterização ou cura. Dentro destas possibilidades, pesquisar a inclusão de algum material que, através do processo de cura, promova alta resistência elétrica.

Estudar a inclusão do silício na composição de pós para estudar sua influência nas características elétricas.

Substituir as resinas fenólicas por sílicas ou óxidos, buscando com isto uma melhor isolamento elétrica.

Avaliar também a influencia do aumento da temperatura de cura, nas características eletromagnéticas do núcleo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. London: Chapman and Hall, 1991. 440 p.
- [2] KRAUS, J. D.; CARVER, K. R. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1978. 780 p.
- [3] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. New York: McGraw-Hill Inc, 1990.
- [4] JAMES, B. A.; WILLIAMS, G. Review of the Magnetic Properties of Sintered Iron. **Powder Metallurgy**, [S.l.], v.22, n.2, p.75-85, 1979.
- [5] PINTO, J. R. **Conversão Eletromecânica de Energia**. Apostila. Sorocaba, 2004.
- [6] CAPANO, W. **Projeto e Construção de Transformadores**. São Paulo: [s.n.], 2007.
- [7] CAPARÓ, José Luis Choque. **Modelagem de Transformadores de Distribuição para Aplicação em Algoritmos de Fluxo de Potência Trifásico**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2005.
- [9] LUBORSKY, F. E.; LIVINGSTON, J. D.; CHIN, G. Y. **Magnetic Properties of Metals and Alloys: Physical Metallurgy**. Amsterdam: Elsevier Science, 1996.
- [10] LALL, C.; BAUM L, W. High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Metal Injection Molding. **Modern Developments in P/M**, [S.l.], v. 18, p.363-389, 1998.

- [11] LALL, C. **Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding, Princeton**. New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1992. 139 p.
- [12] BAS, J. A.; PUIG, J.; MOLINS, C. B. Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art: Modern Developments in Powder Metallurgy. **Metal Powder Industries**, New Jersey, v.18, p.745-756, 1988.
- [13] LANDGRAF, F. J. G.; PLAUT, R. L. Efeito do Tamanho de Grão na Permeabilidade Magnética Máxima da Liga Ferro 47,5% Níquel. **Metalurgia, ABM**, Brasil, v.45, n.380, p.677-681, 1989.
- [14] MOYER, K. H. **The Effect of Proposity on the Properties of Iron Compacts**. Riverton: Hoeganes Corporation, 1980.
- [15] JACK, A. G. **Experience with the use of soft magnetic composites in electrical machines**. Istanbul, Turkey: [s.n.], 1998, p. 1441–1448.
- [16] GUO, Y. G. et al. Comparative study of 3D flux electrical machines with soft magnetic composite core. **IEEE Trans. Ind. Appl.**, [S.l.], n.39, p. 1696–1703, 2003.
- [17] KRAUSE, R. F.; BULARZIK, J. H.; KOKAL, H. R. New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications. **Journal of Materials Engineering and Performance**, USA, n.6, p.710-712, dec. 1997.
- [18] ITOH, Y.; TAKEDA, Y.; KUROISHI, N. AC Magnetic Properties of New Fe--Si Sintered Alloy. **Modern Developments in Powder Metallurgy: Special Materials**. New Jersey, USA, v. 17, p.641-655, 1985.
- [19] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JUNIOR, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 648 p.

- [20] JANSSON, P. Soft Magnetic Materials for A.C. Applications. **Powder Metallurgy**, v.35, n.1, p.63-66, 1992.
- [21] CHIH-WEN, C. **Magnetism and Metalurgy of Soft Magnetic Materials**. New York: Dover Publications, 1986.
- [22] MORRISH, A. H. **The physical Principles of Magnetism**. New York: John Willey & Sons, 1965. 411 p.
- [23] SINNECKER, J. P. Materiais magnéticos doces e materiais ferromagnéticos amorfos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Brasil, v. 22, n. 3, p. 396-405, 2000.
- [24] ROLIM, J. G. **Materiais Elétricos**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- [25] CALLISTER JR., W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction** .5nd edition. USA: John Wiley and Sons, 2000.
- [26]. DIAS, Moisés de Matos. **Obtenção de Imãs de Ferrita Estrôncio Anisotrópicos**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1996.
- [27] PITTA, A. J. C. **Observação da forma de onda de corrente de magnetização, composição da curva de histerese e ensaio à vazio de transformadores trifásicos**. [S.l.: s.n.], 2004.
- [28] TORRES, A. **Tratamento térmico industrial de chapas de ferro silício (Si 3,2%) usados na construção de transformadores de média potência**. 2003. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade de Maringá, Maringá, 2003.

[29] CORTEZ, Orfelinda Avalo. **Síntese e caracterização de ligas Fe-Ni nanoestruturadas**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

[30] BARBOZA, Juliano Soares. **Caracterização de Compósitos Magnéticos Macios Desenvolvidos através da metalurgia do pó, aplicados a núcleos de máquinas elétricas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

[31] CHIAVERINI, V. Metalurgia do Pó. 3. ed. São Paulo: Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, 1992. 352 p.

[32] CALIL, Wilerson Venceslau; SILVA, V. C. **Determinação de Fator de Ajuste de Perdas Magnéticas em Núcleo de Transformadores de Potência pelo Método de Elementos Finitos**. In: MOMAG. Anais... Florianópolis: [S.l.], 2008. p. 190-193.

[33] ARANA, E. **Teoria dos Transformadores**. Centro Universitário Araraquara, SP: [s.n.], 2007.

[34] ESSWEIN JUNIOR, Jorge Alberto Lewis. **Desenvolvimento de compósitos magnéticos macios utilizados em núcleos de máquinas elétricas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

[35] DIAS, Moisés de Matos. **Construção de uma Máquina Síncrona de Relutância Trifásica com Rotor de Material Magnético Sinterizado**. 1999. Tese (Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Eng. Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

[36] WILLIAMS, R. J. J. Curing of Thermosets. **Developments in Plastics Technology**, London, v.2, p.339-376, 1985.

[37] NEAG, C. M.; **Coatings Characterizations by Thermal Analysis, ASTM Manuak 17, American Society for Testing and Materials**. West Conshocken: [s.n.], 1965.

[38] ANDERSON, J. C.; LEAVER, K. D. **Materials Science**. [S.l.]: Butler & Tanner, 1971.

[39] GONTIJO, Marcelo Robert Fonseca. Dissertação de mestrado. **Investigação das propriedades elétricas e magnéticas no composto BaNbxFe_{2-x}O₄**. 1997. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais para Engenharia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 1997.

[40] LENEL, F. V. Magnetic Applications. **Metals Handbook**, [S.l.], v.7, p.638-641, 1984.

[41] NIADA, Rafael Francisco. **Caracterização de Ligas Compósitos Magnéticas a partir da Metalurgia do Pó para Aplicação em Núcleos de Máquinas Rotativas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais) - Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, 2011.