



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE
RECOZIMENTO DE AÇOS TOTALMENTE
PROCESSADOS PARA FINS ELÉTRICOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS

SÉRGIO ROBERTO GEBLER

FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 2000

**CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE
RECOZIMENTO DE AÇOS TOTALMENTE PROCESSADOS
PARA FINS ELÉTRICOS**

SÉRGIO ROBERTO GEBLER

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS

ESPECIALIDADE CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS
E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS



Prof.^a Ingeborg Kuhn, Dra. Eng. – Orientadora



Prof. Carlos A. S. de Oliveira, Dsc. – Co-Orientador



Prof. Dachamir Hotza, Dr. Ing. – Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Pedro A. N. Bernardini, Dr. Eng. - Presidente



Prof.^a Ana Maria Maliska, Dra. Eng.



Prof. Carlos A. S. de Oliveira, Dr. Eng.



Prof. Hélio de Brito Costa, Dr. Eng.

*“ A criatividade baseia-se na incerteza:
o criativo erra muitas vezes,
mas quando acerta,
revoluciona.”*

(Domenico De Masi)

AGRADECIMENTOS

- À Deus, pela vida e pelas eternas bênçãos;
- Aos meus pais, Arno e Laíde, onde sempre busquei o exemplo de pessoas que conquistam um espaço com muito amor, honestidade e coragem. Agradeço pela base da educação centrada pelo amor, no valor dos estudos e pelo incentivo dado à minha formação, essenciais para alcançar meus objetivos;
- A EMBRACO S.A (Empresa Brasileira de Compressores S.A.), pelo apoio e ao uso de suas instalações e equipamentos para realização deste trabalho;
- Aos colegas da EMBRACO (Engenharia, Laboratórios, Produção e Biblioteca) que de alguma forma colaboraram na realização deste trabalho;
- À prof^a. Ingeborg Kühn e ao prof. Carlos Oliveira, pela orientação, estímulo, conhecimento e liberdade de pensamento, que contribuíram para realização do mesmo;
- Aos prof. Pedro A. N. Bernardini e Aloísio Nelmo Klein, pelo seu grande conhecimento e incentivo, contribuindo desde o início para minha evolução profissional;
- Ao colega e amigo Rívio Ramirez pelo companheirismo e incentivo, necessários para vencer os desafios de concluir esta etapa de minha formação;
- Ao colega e amigo Sergio Luiz Maganhoto, pelo apoio e compreensão enquanto chefia pela ausência do trabalho para o comparecimento as aulas teóricas na UFSC;
- Ao PGMAT, pelo apoio conferido durante todo o período de vínculo à esta instituição;
- Aos meus amigos José Rizzo, Marcelo Fischer, Maurício Moreira, Geraldo Veroneze, e Cedric pela capacidade de proporcionar momentos de descontração durante esta caminhada;
- A minha namorada Danielle, responsável por dar um outro sentido a minha vida e tornar a felicidade sempre próxima. Obrigada pela paciência, carinho e amor que demonstrou na finalização deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xiii
Resumo	xiv
Abstract	xv
CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
CAPÍTULO 2	4
Fundamentos Teóricos	4
2.1 – Motores elétricos.....	4
2.1.1 – Introdução.....	4
2.1.2 – Motores de corrente contínua.....	6
2.1.3 – Motores de corrente alternada.....	6
2.1.4 – Manufatura de motores.....	8
2.2 – Caracterização de aços elétricos.....	10
2.2.1 – Introdução aos materiais magnéticos – classificação.....	10
2.2.2 – Aços elétricos.....	11
2.2.3 – Fatores que influenciam as características dos aços elétricos.....	12
2.3 – Tratamento térmico.....	17
2.3.1 – Introdução.....	17
2.3.2 – Ciclos térmicos.....	18
2.4 – Fatores de influência no ciclo de recozimento.....	21
2.4.1 – Tempo e temperatura.....	21
2.4.2 – Atmosferas.....	21

2.4.3 – Velocidade de aquecimento.....	23
2.4.4 – Velocidade de resfriamento.....	24
2.4.5 – Aspectos cinéticos da descarbonetação.....	24
2.4.6 – Termodinâmica da descarbonetação.....	27
2.5 – Recuperação / Recristalização / Crescimento de Grão.....	28
2.5.1 – Introdução.....	28
2.5.2 – Recuperação.....	30
2.5.3 – Recristalização.....	31
2.5.4 – Crescimento de grão e recristalização secundária.....	32
2.6 – Oxidação.....	32
CAPÍTULO 3.....	36
Metodologia Experimental.....	36
3.1 – Seleção das amostras.....	37
3.2 – Realização dos tratamentos térmicos.....	39
3.3 – Fabricação de estatores.....	41
3.4 – Avaliação do rendimento dos motores.....	42
3.5 – Análise da composição química.....	43
3.6 – Caracterização das propriedades elétricas e magnéticas.....	44
3.6.1 – Resistência de isolamento – Frankling.....	44
3.6.2 – Perdas magnéticas – Epstein.....	45
3.6.3 – Envelhecimento.....	46
3.6.4 – Resistividade elétrica.....	46
3.7 – Caracterização microestrutural do material.....	47
3.7.1 – Preparação dos corpos de prova.....	47
3.7.2 – Microscopia ótica.....	47

3.7.3 – Microscopia eletrônica de varredura.....	47
3.7.4 – Difração de raios-X.....	48
CAPÍTULO 4.....	49
Resultados e Discussões.....	49
4.1 – Análise da composição química.....	49
4.2 – Caracterização elétrica e magnética.....	50
4.2.1 – Avaliação do rendimento dos motores.....	50
4.2.2 – Avaliação das perdas magnéticas.....	54
4.2.3 – Análise do envelhecimento.....	56
4.2.4 – Avaliação da resistência de isolamento.....	58
4.2.5 – Avaliação da resistividade elétrica.....	60
4.3 – Caracterização microestrutural.....	61
4.3.1 – Caracterização das regiões.....	61
4.3.2 – Caracterização das amostras do grupo 1 - Sem Tratamento.....	62
4.3.3 – Caracterização das amostras do grupo 2 - Brasimet.....	65
4.3.4 – Caracterização das amostras do grupo 3 - Mebsa.....	69
4.3.5 – Caracterização do grão nas regiões da coroa e do dente de ranhura.....	72
4.4 – Caracterização do revestimento superficial.....	76
4.4.1 – Caracterização em corte transversal.....	76
4.4.2 – Caracterização superficial.....	79
CAPÍTULO 5.....	86
Conclusões.....	86
Sugestões para trabalhos futuros.....	88
Referências bibliográficas.....	89
Anexo I.....	94

Anexo II	98
Anexo III	102
Anexo IV	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho de conjunto de um compressor de refrigeração.....	2
Figura 2 - Conjunto de lâminas do motor para compressor; rotor (esquerda) e estator (direita).....	9
Figura 3 - Efeito do teor de carbono nas perdas por histerese.....	13
Figura 4 - Curva teórica do tratamento de recozimento de aços elétricos.....	19
Figura 5 - Relação entre ponto de orvalho e potencial de carbono para atmosfera exotérmica.....	27
Figura 6 - Representação das regiões de uma lâmina estampada.....	28
Figura 7 - Variação das propriedades do ferro pelo aquecimento.....	30
Figura 8 - Representação esquemática da recristalização primária.....	31
Figura 9 - Curvas de equilíbrio da formação dos óxidos de ferro, quando um aço é aquecido em atmosfera de $H_2 - H_2O$	33
Figura 10 - Forno de tratamento térmico das amostras do grupo 2 – Brasimet.....	40
Figura 11 - Forno de tratamento térmico das amostras do grupo 3 – Mebsa.....	41
Figura 12 - Dinamômetro – Bancada para avaliação do desempenho de motores elétricos..	43
Figura 13 - Equipamento de teste Frankling.....	45
Figura 14 - Comparativo dos resultados de rendimento dos motores para cada grupo de amostras.....	52
Figura 15 - Resultados de torque máximo (MK) de cada grupo de amostras.....	53
Figura 16 - Perdas magnéticas das amostras do grupo 1 – Sem Tratamento.....	54
Figura 17 - Perdas magnéticas das amostras do grupo 2 – Brasimet.....	55
Figura 18 - Perdas magnéticas das amostras do grupo 3 – Mebsa.....	55
Figura 19 - Comparativo dos resultados de perdas antes e após envelhecimento.....	57
Figura 20 - Comparativo dos resultados do ensaio de Frankling.....	58

Figura 21 - Comparativo dos resultados do ensaio de resistividade elétrica.....	60
Figura 22 - Representação do fluxo magnético entre lâmina de estator e de rotor.....	61
Figura 23 - Microestrutura da região do dente - 100X – Grupo 1 – Sem Tratamento.....	62
Figura 24 - Microestrutura da região da coroa - 100X – Grupo 1 – Sem Tratamento.....	63
Figura 25 - Microestrutura da região do dente parte superior - 400X – Grupo 1 – Sem Tratamento.....	64
Figura 26 - Microestrutura da região do dente parte inferior - 400X – Grupo 1 – Sem Tratamento.....	64
Figura 27 - Microestrutura da região da superfície do dente - 1000X – Grupo 1 – Sem Tratamento.....	65
Figura 28 - Microestrutura da região do dente - 100X – Grupo 2 – Brasimet.....	66
Figura 29 - Microestrutura da região da coroa - 100X – Grupo 2 – Brasimet.....	66
Figura 30 - Microestrutura da região do dente parte superior - 400X – Grupo 2 – Brasimet	67
Figura 31 - Microestrutura da região do dente parte inferior - 400X – Grupo 2 – Brasimet.	68
Figura 32 - Microestrutura da região da superfície do dente - 1000X – Grupo 2 – Brasimet.....	68
Figura 33 - Microestrutura da região do dente - 100X – Grupo 3 – Mebsa.....	69
Figura 34 - Microestrutura da região da coroa - 100X – Grupo 3 – Mebsa.....	70
Figura 35 - Microestrutura da região do dente parte superior - 400X – Grupo 3 – Mebsa...	71
Figura 36 - Microestrutura da região do dente parte inferior - 400X – Grupo 3 – Mebsa....	71
Figura 37 - Microestrutura da região da superfície na coroa – 1000X – Grupo 3 – Mebsa..	72
Figura 38 - Microestrutura da região da coroa - 1000X – Grupo 1 – Sem Tratamento.....	73
Figura 39 - Microestrutura da região da coroa - 1000X – Grupo 2 – Brasimet.....	73
Figura 40 - Microestrutura da região da coroa - 1000X – Grupo 3 – Mebsa.....	73

Figura 41 -	Microestrutura da região do dente – MEV 500X – Grupo 1 – Sem Tratamento	74
Figura 42 -	Microestrutura da região do dente – MEV 500X – Grupo 2 – Brasimet.....	75
Figura 43 -	Microestrutura da região do dente – MEV 500X – Grupo 3 – Mebsa.....	75
Figura 44 -	Espectro de concentração representativo da camada de óxido na região da espessura para todas as amostras do experimento.....	76
Figura 45 -	Microestrutura da região da coroa – MEV 2000X – Grupo 1 – Sem Tratamento.....	78
Figura 46 -	Microestrutura da região da coroa – MEV 2000X – Grupo 2 – Brasimet.....	78
Figura 47 -	Microestrutura da região da coroa – MEV 2000X – Grupo 3 – Mebsa.....	79
Figura 48 -	Microestrutura da região da superfície – MEV 100X – Grupo 1 – Sem Tratamento.....	80
Figura 49 -	Microestrutura da região da superfície – fase clara – MEV 1500X – Grupo 1 – Sem Tratamento.....	80
Figura 50 -	Microestrutura da região da superfície – fase escura – MEV 1500X – Grupo 1 – Sem Tratamento.....	80
Figura 51 -	Microestrutura da região da superfície – MEV 100X – Grupo 2 – Brasimet	81
Figura 52 -	Microestrutura da região da superfície – fase clara – MEV 1500X – Grupo 2 - Brasimet.....	81
Figura 53 -	Microestrutura da região da superfície – fase escura – MEV 1500X – Grupo 2 – Brasimet.....	81
Figura 54 -	Microestrutura da região da superfície – MEV 100X – Grupo 3 – Mebsa.....	82
Figura 55 -	Microestrutura da região da superfície – fase clara – MEV 1500X – Grupo 3 Mebsa.....	82
Figura 56 -	Microestrutura da região da superfície – fase escura – MEV 1500X – Grupo 3 – Mebsa.....	82

Figura 57 - Espectro de concentração representativo da camada de óxido na região da superfície das amostras do grupo 2 – Brasimet.....	84
Figura 58 - Difratoograma genérico das três amostras do experimento em escala linear.....	85
Figura 59 - Esquema elétrico para medição da resistência de isolamento.....	99
Figura 60 - Esquema das bobinas no quadro Epstein.....	103
Figura 61 - Posicionamento das lâminas no quadro Epstein.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da eficiência dos motores em função da faixa de rendimento.....	6
Tabela 2 - Valores de D_0 e Q para difusão do carbono no Fe.....	26
Tabela 3 - Composição química do material E185-C4 obtida junto ao fornecedor (% em peso).....	37
Tabela 4 - Perdas magnéticas máximas para o aço E185-C4 obtidas junto ao fornecedor..	38
Tabela 5 - Número de amostras para execução do experimento e o tipo de processamento.....	38
Tabela 6 - Composição química das amostras do experimento (% em peso).....	50
Tabela 7 - Valores do rendimento dos motores para cada grupo de amostras do experimento.....	51
Tabela 8 - Comparação dos valores de perdas entre fornecedor e medições do experimento.....	54
Tabela 9 - Comparativo dos resultados típicos de perdas magnéticas antes e após aplicação do ciclo de envelhecimento.....	57
Tabela 10 - Comparativo da composição química obtida através de energia dispersiva de raios-X para a região da espessura das amostras do experimento.....	77
Tabela 11 - Comparativo da composição química obtida através de energia dispersiva de raios-X para a superfície das amostras do experimento.....	83

RESUMO

A busca mundial pela redução do consumo de energia tem incitado os fabricantes de motores elétricos a procurar alternativas para aumentar o rendimento de seus produtos. Dentre as diversas variáveis que estão envolvidas no processo produtivo, merece destaque a influência exercida pelos parâmetros do ciclo de tratamento térmico a que são submetidos os aços utilizados na fabricação de rotores e estatores.

A definição de parâmetros apropriados implica na adequação correta de recursos, na conseqüente redução de custos, no aprimoramento da qualidade e, inclusive, na interferência positiva sobre os tempos de fabricação.

Neste trabalho, são apresentadas as análises realizadas em um aço elétrico da classe totalmente processado, revestido com fosfato, sob três condições de fabricação distintas:

- a) Sem tratamento térmico, conforme recebido do fabricante.
- b) Tratamento térmico de recozimento e oxidação em atmosfera descarbonetante.
- c) Tratamento térmico de recozimento de alívio de tensões em atmosfera oxidante.

Os resultados indicam que o efeito do encruamento decorrente da conformação das lâminas na geometria de estatores é um fator determinante sobre o rendimento do produto final, uma vez que os melhores resultados foram encontrados para as condições de recozimento pleno. Mostram também que, embora a elevação de temperatura leve à degradação da camada de fosfato que inicialmente revestia o aço, o tratamento de oxidação propicia isolamento satisfatório.

ABSTRACT

The global energy consumption reduction effort has lead the electrical motors manufacturers to pursue different approaches to increase motors' efficiency. Among the variables involved in the production process special attention must be paid to the influence of the thermal cycle on the rotors and stators steel electrical properties.

The parameters selection plays a critical role in the definition of the equipment and consequently in cost reduction, quality improvement and in production cycle optimization.

In this work the test results are presented in a fully processed class electrical steel, protected by a phosphate layer in three process conditions:

- a) As received (no heat treatment)
- b) Annealing and oxidation heat treating in decarburization atmosphere
- c) Annealing and stress relieved in oxidation atmosphere

Test results indicate that the strain hardening induced by the stators cold-forming operations is a critical factor on the final product performance since the best results were obtained with total annealing condition.

It is also shown that although a higher temperature treatment may lead to some degradation on the phosphate layer, the oxidation treatment provides the necessary protection.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente, o consumo de energia elétrica no Brasil pode ser dividido da seguinte forma: 45% na indústria, 27% em residências, 13% no comércio e 15% no setor público e rural. Estima-se que 9% são gastos em equipamentos de refrigeração doméstica (geladeiras e freezers), isto sem incluir equipamentos de pequeno porte utilizados no comércio e em serviços.

Cerca de 30% do consumo global de energia elétrica no país destina-se ao acionamento de motores elétricos. No setor industrial, essa proporção atinge aproximadamente 51% do consumo. Assim, a melhora de eficiência neste setor é da maior relevância [Eletrobras, 1999].

Nos países desenvolvidos existem valores máximos de consumo de energia, fixados pelos governos, para aplicação em equipamentos de refrigeração. Isto se traduz em níveis mínimos de consumo na operação dos compressores de refrigeração. Os fabricantes de compressores herméticos têm portanto, de produzir equipamentos cada vez mais eficientes. Existiriam outras alternativas para a redução de consumo nestes sistemas que, entretanto, são mais caras ou de maior dificuldade de implementação.

As características de desempenho do compressor, que são diretamente dependentes do rendimento do motor elétrico, vão definir as necessidades de qualidade no motor. Os motores são compostos essencialmente pelo estator ou indutor, que é a parte fixa formada por eletroímãs que dão origem ao campo magnético e é formado pelo empilhamento de lâminas finas de aço que podem variar entre 0,35mm a 0,85mm de espessura. O rotor ou induzido conforme mostrado na Figura 1, é a parte que gira pois está sendo percorrida por um fluxo magnético ou corrente elétrica. Como o estator, o rotor também é formado pelo empilhamento de lâminas de aço.

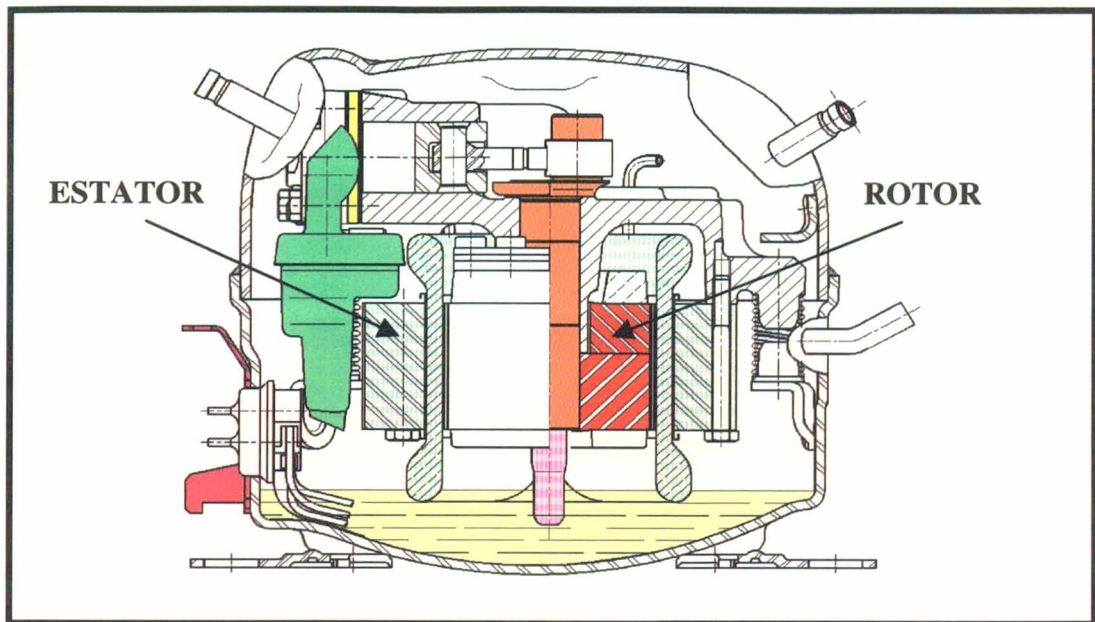


Figura 1 – Desenho de conjunto de um compressor de refrigeração.

Os aços elétricos têm um papel importante na fabricação em larga escala de motores. Existem três diferentes classes de aços de grãos não orientados, que estão associadas a diferentes formas de processamento industrial, particularmente no que se refere às etapas de conformação e de tratamento térmico.

Especificamente em relação ao tratamento térmico, fatores metalúrgicos dos materiais que afetam diretamente o comportamento magnético, tais como impurezas, tamanho de grão, deformação, textura, revestimentos e envelhecimento, nem sempre são explorados. Limitações de conhecimento tecnológico, de operacionalidade com diferentes atmosferas, grandes volumes de produção, limitações construtivas dos fornos de recozimento, bem como a irregularidade da qualidade dos aços de fabricação nacional, são também fatores que afetam a otimização dos ciclos térmicos pelos fabricantes de motores elétricos.

Em condições industriais a possibilidade de recozer diferentes classes de aços em um mesmo ciclo térmico é interessante por trazer flexibilidade para a produção, apesar de que muitas vezes os custos envolvidos não justificam estes procedimentos. A crescente demanda por motores de maior eficiência elétrica tem induzido a realização de pesquisa para determinação de

ciclos mais otimizados.

O presente trabalho vem ao encontro da necessidade verificada no processamento dos aços elétricos da Embraco, onde os atuais ciclos térmicos de recozimento e descarbonetação foram determinados quando a tendência do mercado não era por motores com alta eficiência e a redução de consumo de energia não era foco em países industrializados.

Este trabalho objetiva caracterizar os fatores metalúrgicos que afetam o comportamento magnético de um aço elétrico de grande utilização na indústria, sob três condições distintas: (1) conforme recebido da siderúrgica, (2) após recozimento pleno em atmosfera descarbonetante e (3) após recozimento para alívio de tensões em atmosfera oxidante.

O aço utilizado é do tipo totalmente processado e revestido com fosfato, de fabricação nacional, e que apresenta perdas magnéticas típicas de 1,85 W/Kg (1T - 50 Hz). Este estudo foi realizado em escala industrial, e assim os ciclos térmicos utilizados ficaram limitados àqueles disponíveis na Embraco. O desenvolvimento de tecnologia para tratamento térmico de aços elétricos requer o conhecimento das relações entre as características metalúrgicas do material e o seu desempenho no rendimento dos motores. Os resultados deste trabalho também irão contribuir com os fabricantes de motores nos seguintes aspectos:

- Entendimento do comportamento do material durante cada ciclo de tratamento, onde serão identificados os parâmetros importantes e influentes do processo. Estes dados servirão de base para o desenvolvimento de estudos para a otimização dos atuais ciclos de tratamento térmico em aços elétricos.
- Possibilidade de incremento de produtividade do atual ciclo térmico descarbonetante aplicado, correlacionando desempenho do motor e características microestruturais do material tratado.
- Possibilidade de redução dos custos de fabricação dos motores, com a utilização de menores quantidades de energia e materiais indiretos como gases e vapor, caso exista a viabilidade técnica de otimizarem-se os ciclos térmicos atualmente utilizados.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, será feita uma breve revisão da tecnologia e da ciência envolvidas na fabricação de motores elétricos. Inicialmente, serão apresentados os princípios básicos de funcionamento dos motores elétricos e como estes estão classificados em função da sua aplicação. Na continuidade, será vista a classificação dos materiais magnéticos e os principais tipos de aços elétricos empregados na fabricação de motores elétricos.

Por fim, será apresentado um capítulo mais completo sobre Tratamento Térmico, no qual serão descritos os tipos de tratamentos térmicos aplicados em aços elétricos para a fabricação de motores.

2.1 MOTORES ELÉTRICOS

2.1.1 Introdução

Motores elétricos são motores que transformam a energia elétrica em energia mecânica comunicada a um eixo que gira a uma certa velocidade e com determinado momento de rotação [Anderson & Miller, 1986].

O funcionamento desses motores baseia-se na propriedade de que toda a espira percorrida por uma corrente elétrica gera em torno de si um campo magnético. Os motores são compostos essencialmente por um conjunto formado pelo estator e rotor. Todos os motores elétricos são construídos para uma classe de corrente, com características determinadas de tensão, e requerem

condições de trabalho adequadas ao seu funcionamento. Portanto, na seleção de um motor para uma determinada máquina deve-se considerar a adequação ao funcionamento e à corrente que se dispõe. Normalmente, em aplicações industriais a corrente costuma ser trifásica e em aplicações domésticas a corrente é monofásica. Entretanto, algumas máquinas ou instalações requerem uma corrente diferente da que se possui. Neste caso, deve-se utilizar conversores de corrente ou de frequência ou até mesmo transformadores para mudança de tensão da rede.

Os motores para compressores herméticos de refrigeração doméstica têm potência útil na faixa de 50 a 200 W e trabalham em um ambiente isolado da atmosfera. Como estão acoplados a um conjunto mecânico de elevada precisão e que tem a função de bombear o gás através do sistema de refrigeração, estes motores não podem gerar nenhuma espécie de resíduo nem faíscas que carbonizem o óleo lubrificante, caso contrário, pode haver um comprometimento do sistema de refrigeração pelo entupimento do capilar. Além deste fato, o motor de compressor hermético deve ter uma vida útil de pelo menos dez anos sem qualquer tipo de manutenção.

As características acima tornam o *Motor de Indução de Campo Alternado* a opção ideal para compressores herméticos devido à ausência de contatos deslizantes, alta confiabilidade, grande robustez e baixo custo.

Atualmente todos os compressores usados em refrigeração doméstica utilizam motores de indução monofásicos por este tipo de corrente estar presente em todas as residências.

As características de desempenho do compressor, que por sua vez vão definir as restrições do motor, são em geral fixadas pelas indústrias de sistemas de refrigeração. São elas que definem o tipo de equipamento no qual o compressor será utilizado (capacidade, temperatura interna, tensão de aplicação, etc.).

O rendimento médio dos motores usados em refrigeração varia em uma ampla faixa de valores [Werner & Jaffee, 1992], segundo o modelo de compressores. Podem ser divididos em três grupos de acordo com rendimento apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da eficiência dos motores em função da faixa de rendimento.

Tipo de Motor	Faixa de Rendimento
Baixa Eficiência	65% a 75%
Média Eficiência	75% a 80%
Alta Eficiência	80% a 88%

2.1.2 Motores de corrente contínua

São motores facilmente reguláveis quanto à velocidade e de fácil colocação em funcionamento. Pelo tipo de ligação elétrica pode-se ter motores em série e em derivação. Nos motores em ligação em série deseja-se obter um elevado torque na partida e uma velocidade variável inversa ao torque durante o funcionamento. Nas ligações em derivação tem-se uma velocidade pouco variável com a carga e um torque crescente, de modo que não apresentam o perigo de “queimar”, como acontece com os motores em série [Anderson & Miller, 1986].

2.1.3 Motores de corrente alternada

Os motores de corrente alternada podem ser monofásicos ou polifásicos, sendo mais comuns os trifásicos. Eles apresentam velocidades constantes, em função da frequência e do número de pólos do motor. De acordo com o tipo de rotor empregado, os motores podem ser divididos em síncronos e assíncronos. Motores síncronos possuem rotores com magnetização própria e o rotor é forçado a acompanhar o estator na sua frequência de rotação. Motores assíncronos não possuem magnetização própria no rotor. Esta magnetização é obtida pela indução do estator. Os principais tipos de motores de corrente alternada são [Pareto, 1982]:

- *Motores de Campo Constante* – São classificados como motores síncronos. Estes motores têm o estator (indutor) alimentado por corrente contínua, produzindo um campo de grandeza e direção constantes, e o rotor (induzido) é alimentado por uma corrente alternada monofásica.

- *Motores de Indução de Campo Giratório* – São classificados como motores assíncronos. Nestes motores o estator é formado por vários carretéis percorridos por corrente alternada de modo que cada dois deles formam um campo variável que, combinado com os demais, geram um campo resultante giratório. O rotor é formado por um sistema de condutores fechados sobre si mesmos, sem serem ligados à corrente elétrica. Estes motores apresentam torque de partida mínimo, o que impede o arranque com carga.

- *Motores de Indução de Campo Alternado* - Esses motores são iguais aos anteriores, mas o estator é alimentado por uma corrente monofásica. O campo alternado de direção constante formado é considerado resultante de dois campos giratórios iguais e de sentidos contrários, de modo que o rotor não pode girar por si mesmo. A partida desses motores é feita por meio de um enrolamento auxiliar ligado à mesma rede através de uma bobina de auto-indução, com o que se estabelece uma defasagem entre a bobina auxiliar e a principal que atua como uma corrente bifásica, produzindo um campo giratório que induz a rotação do rotor. Quando o motor está em marcha, o circuito auxiliar desliga-se.

2.1.4 Manufatura de motores

Os motores são compostos essencialmente pelo estator e pelo rotor. O estator ou indutor, é a parte fixa formada por eletroímãs que dão origem ao campo magnético. O rotor ou induzido, é a parte que gira, pois está sendo percorrida por um fluxo magnético ou corrente elétrica.

Os estatores e os rotores, dado suas especificidades, são fabricados com materiais magneticamente moles. Tradicionalmente, são feitos a partir do empilhamento de finas lâminas de aço estampadas (com espessura variando entre 0,35 mm a 0,85 mm), devidamente isoladas. Esta tradição naturalmente é decorrente de fatores técnicos.

Os aços são materiais condutores e assim sofrem também a indução de forças eletromotrizes quando sujeitos a campos magnéticos variáveis.

No caso dos motores elétricos, estes campos são resultantes da corrente alternada. A ação indutiva do estator (enrolamento indutor) sobre o rotor (enrolamento indutivo) se faz sentir também sobre o núcleo magnético do material, no qual circularão correntes induzidas de grandeza considerável. Estas correntes podem ser reduzidas pela elevação da resistência elétrica do material magnético [Schmidt, 1979].

O aumento da resistência à circulação das correntes induzidas pode ser obtido através da justaposição de um dado número de chapas (pacotes de lâminas), isoladas entre si, reconstruindo a seção magnética necessária para as condições de operação. É manifesto que as correntes induzidas não podem circular através de lâminas isoladas com a mesma facilidade existente em uma seção contínua.

A redução das correntes parasitas leva, por sua vez, à redução do problema de aquecimento do núcleo devido às perdas Joule que apareceriam em suas seções transversais, sem, entretanto, prejudicar a circulação das linhas magnéticas. As perdas são ainda função da espessura da lâmina: quanto mais fina, menores serão as correntes induzidas, porque maior é a

resistência oferecida ao seu fluxo. Existe, entretanto, um limite inferior mecânico e econômico para essa espessura.

Quanto mais fina é a lâmina, menor é a sua resistência mecânica, e, em núcleos de grande dimensão, este efeito pode resultar em dificuldades de manuseio. Além disso, o número de lâminas necessárias para construir um dado núcleo é função direta da espessura destas lâminas. Assim, quanto menor esta espessura, maiores os trabalhos associados à fabricação das chapas (siderúrgica), à estampagem e à montagem (fabricante do motor) [Werner & Jaffee, 1992].

As restrições de manufaturabilidade do motor são dependentes do volume de produção e se tornam críticas em grandes volumes. O desenho da lâmina é fundamental para o projeto e geralmente é fixo para uma grande gama de motores de compressores herméticos de um dado fabricante (Figura 2). Este fato permite grande padronização, indispensável a empresas que produzem milhões de unidades/ano em função dos custos de equipamentos envolvidos na fabricação.

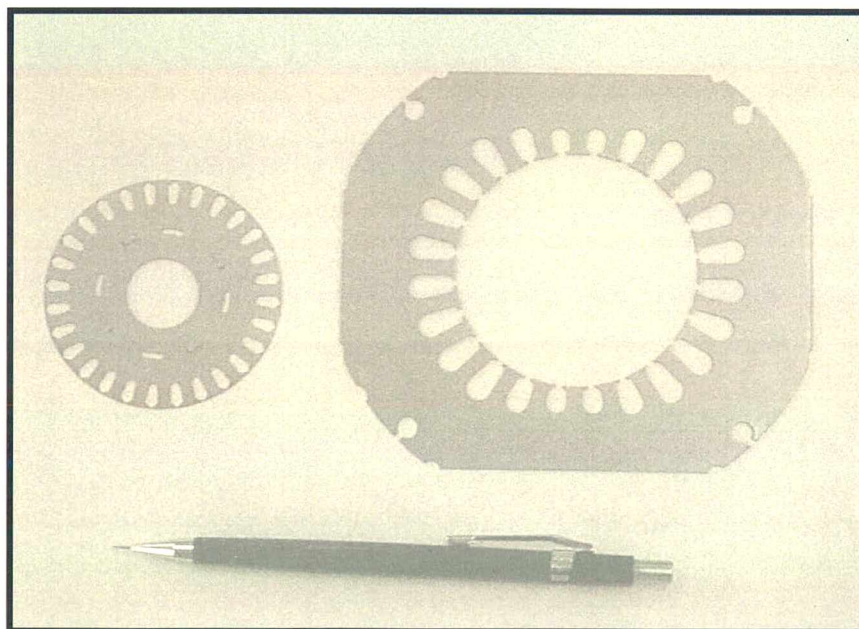


Figura 2 – Conjunto de lâminas do motor para compressor; rotor (esquerda) e estator (direita).

Restrições com relação ao volume de cobre e altura do motor são dependentes das características do produto, mas com impacto direto na produtividade das linhas de fabricação. Geralmente motores de alta eficiência são mais difíceis de fabricar, se comparados aos motores normais, devido ao maior volume de cobre empregado nas bobinas.

Restrições de rendimento, apesar de requeridas pelas montadoras, devem-se basicamente à pressão governamental por produtos de maior eficiência energética. O consumidor final em geral tem pouco interesse no consumo de energia dos produtos, seja no Brasil ou no exterior.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE AÇOS ELÉTRICOS

2.2.1 Introdução aos materiais magnéticos – classificação

Os materiais magnéticos podem ser classificados em [ABNT, 1997]:

- *Magneticamente Duros* – Imãs
- *Magneticamente Moles* – São materiais que ampliam o campo magnético.

Entre os materiais utilizados para fins elétricos podem ser citados os seguintes:

- *Metálicos Cristalinos*: Aços elétricos, Alnico (Imã Metálico Fe-Al-Ni-Co), Permalloy (52% Fe – 48% Ni).
- *Vidros Metálicos*: ligas amorfas de Fe-Si-B.
- *Compostos Intermetálicos*: Sm-Co, Nd-Fe-B.
- *Cerâmicos*: Imãs de ferrita, ferritas para alta frequência.
- *Compostos*: pó de ferro misturado com borracha.

Como os aços elétricos são o objeto desta proposta de trabalho, a seguir serão mostradas algumas características destes materiais.

2.2.2 Aços elétricos

Existem dois tipos de aços para fins elétricos [Kumano et al., 1995]: os de grãos orientados (GO), que apresentam alta anisotropia magnética, e os aços de grãos não orientados (GNO), que apresentam isotropia em suas propriedades e são altamente utilizados em motores elétricos.

Grão Orientado - Totalmente Processado – Atualmente são disponíveis comercialmente três grandes classes de aços GO:

- Normal.
- Alta Indução.
- Com Refino de Domínios.

Os aços GO são basicamente ligas de Fe-Si produzidas pelo processo de laminação à quente e recozimento final a altas temperaturas [Andrade, 1990]. Uma vez que exibem forte textura cristalográfica do tipo [110] paralela à superfície da chapa, têm excelentes propriedades magnéticas nesta direção. Estes aços foram desenvolvidos para alcançar baixas perdas e elevada permeabilidade magnética, requisitos necessários para maior eficiência dos equipamentos e economia de energia elétrica. Aplicados basicamente na fabricação de núcleos de transformadores, também são utilizados em reatores de potência, hidrogeradores e turbo geradores.

Grão Não Orientado - Os aços elétricos de grãos não orientados são divididos em três grupos [AISI, 1983]:

- *Totalmente Processados* (Fully Processed): São aços ao silício cujas propriedades magnéticas são desenvolvidas plenamente pelo fabricante do aço. Na maioria das suas aplicações podem ser utilizados sem qualquer tratamento térmico posterior. Possuem excelente valor de permeabilidade em altas induções e baixo valor médio de perdas magnéticas.

- *Semi-Processado* (Semi Processed): É uma classe de aços elétricos onde as propriedades magnéticas devem ser desenvolvidas pelo usuário através de um tratamento térmico de recozimento. São processados para ter um grande crescimento de grãos neste recozimento.

- *Não Processados* (Full Hard): São os aços do tipo ABNT 1006/1008 de qualidade comercial. Com tratamento térmico de descarbonetação e crescimento de grãos é possível obter redução de cerca de 50% de perdas magnéticas. Mesmo com o adequado processo de tratamento térmico as propriedades magnéticas não são tão boas quando comparadas aos semi-processados, em função da composição química diferenciada. São os aços de mais baixo custo.

Para certas aplicações, tanto de aços GO como GNO, as propriedades mecânicas são relevantes, seja pelas exigências mecânicas do produto final ou pelo efeito destas propriedades no processamento dos materiais (exigências dos processos de estampagem e tratamento térmico).

À medida que aumenta o teor de Si, crescem também o limite de resistência, o limite de escoamento e a resistência ao cisalhamento [AISI, 1983]. A anisotropia destas propriedades mecânicas pode produzir desvios de ovalização, empenamento e incremento das rebarbas nas lâminas, comprometendo a qualidade final. Com esta variabilidade é extremamente difícil otimizar um projeto da ferramenta para estampagem. Normalmente dimensiona-se uma quantidade maior de ferramentas para absorver tais variações.

2.2.3 Fatores que influenciam as características dos aços elétricos

Os fatores que afetam as características dos aços elétricos são [Gebler, 1997]:

Composição química - exercem efeito marcante os teores de silício e de carbono, além daqueles elementos associados às impurezas residuais.

O silício eleva a resistividade do material [Hou, 1996], reduzindo assim as correntes parasitas. Contudo, causa um apreciável endurecimento por solução sólida, o qual, em

contrapartida, dificulta a estampabilidade. O silício, devido ao seu efeito grafitizante, induz à dissociação da cementita e, devido ao seu efeito desoxidante, leva à eliminação quase total do oxigênio. Em consequência, verifica-se um acréscimo na permeabilidade magnética bem como a redução da força coercitiva e das perdas por histerese e por correntes parasitas [Andreas, 1982].

O carbono assim como as impurezas residuais (enxofre, oxigênio e nitrogênio), sob a forma de precipitados e inclusões (carbonetos, sulfetos, óxidos e nitretos), aumentam a força coercitiva interferindo no movimento dos domínios magnéticos [Günther, 1988]. Indiretamente, restringem o crescimento de grão e o desenvolvimento de uma textura adequada. A Figura 3 mostra as perdas em função do teor de carbono [Metals Handbook, 1981].

Outros elementos, como o alumínio, o manganês e o fósforo, são normalmente adicionados aos aços elétricos por aumentarem sua resistividade diminuindo as perdas por corrente parasitas e assim melhorarem suas propriedades magnéticas [Hou, 1996].

O oxigênio afeta significativamente as perdas no ferro e a permeabilidade magnética através da interação de finas partículas de óxidos com as paredes de domínio. Já o nitrogênio também é prejudicial as propriedades, pois em valores acima de 20 ppm favorecem a formação de precipitados de nitretos de alumínio [Fitzgerald et al., 1995].

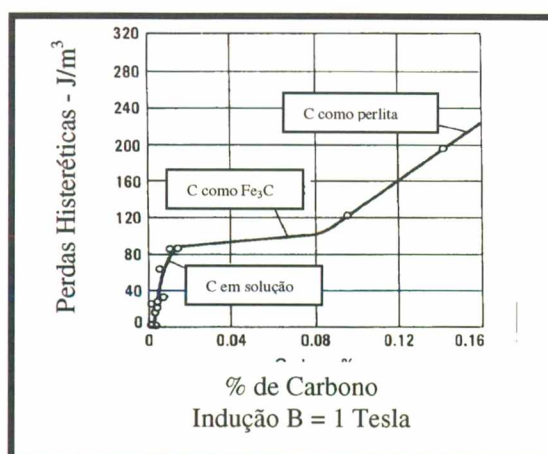


Figura 3 – Efeito do teor de carbono nas perdas por histerese ($B=1,0T$).
[Metals Handbook, 1981]

Tamanho de grão – Para aplicações na fabricação de motores os aços elétricos devem apresentar boas características de permeabilidade e baixas perdas histeréticas. Estas propriedades magnéticas são obtidas com a redução da área de contorno de grãos responsáveis pelo ancoramento das paredes de domínio. Segundo Werner e Jaffee (1992) o efeito do excesso de perdas das correntes parasitas quando do aumento do tamanho de grão é justificado pela existência de poucos domínios para participar da magnetização. O tamanho de grão ótimo em função de menores perdas por histerese e da máxima permeabilidade nas induções de 10 KG e 15 KG, é obtido com de grãos entre 90 a 160 μm . A partir deste tamanho de grão as perdas vão decrescendo gradualmente [Stephenson, 1986].

Textura – Cada grão em um agregado policristalino tem orientações cristalográficas diferentes de seus vizinhos. Considerando de modo geral as orientações de todos os grãos podem estar distribuídas aleatoriamente em relação a uma referência, bem como podem estar concentradas em alguma orientação preferencial. Esta última condição é que caracteriza a existência de textura [Padilha, 1995].

A orientação cristalográfica influi diretamente sobre a orientação dos domínios magnéticos, uma vez que a estrutura cristalina dos metais apresenta anisotropia quanto à direção de magnetização.

Chapas com grãos orientados (GO) apresentam elevado valor de permeabilidade e perdas muito reduzidas quando a direção do fluxo magnético coincidir com a de laminação [Nikulin, 1987]. Neste caso, as características magnéticas são inferiores às dos aços não texturizados. Sendo assim, são adequadas para aplicações onde o campo magnético tem direção constante, como no caso dos transformadores. Já para a fabricação de componentes onde os campos magnéticos não circulam por núcleos de composição fixa, como nos motores, é aconselhável a utilização de chapas não texturizadas.

Os aços elétricos apresentam estrutura cúbica e a direção $\langle 100 \rangle$ é a de mais fácil magnetização, seguida pela direção $\langle 110 \rangle$, enquanto que a direção de maior dificuldade de magnetização é a $\langle 111 \rangle$ [Cullity, 1972]. Para os planos cristalográficos seguem o mesmo critério, sendo os planos $\{100\}$, $\{110\}$ e $\{111\}$ pela ordem, os de melhor magnetização. Segundo Werner e Jaffee (1992), alguma textura é normalmente desenvolvida durante o processamento de aços para motores elétricos e o termo “não orientado” é somente aproximado, visto que podem desenvolver alguma orientação preferencial durante a laminação. Uma maior quantidade de planos $\{100\}$ paralelos a superfície da chapa em detrimento dos planos $\{111\}$ fazem aumentar as propriedades magnéticas especialmente em altas induções. A textura ideal é a do plano $\{100\}$ que maximiza o número de direções de magnetização no plano da chapa.

Grau de deformação - o processo de estampagem leva à deformação plástica do material e, em consequência, reduz a sua permeabilidade e aumenta a sua coercividade, resultando em elevadas perdas de energia que podem, inclusive, conduzir ao aparecimento de aquecimentos em níveis nada desprezíveis. A deformação causa a desorientação dos domínios magnéticos e assim a seção afetada pelo corte opera longe das melhores condições.

As deformações que se observam nas amostras de aços de baixo carbono submetidas a deformações plásticas são identificadas como linhas de escorregamento ou linhas de deformação [Takanohashi et al., 1998]. Estas linhas são eliminadas, ou pelo menos atenuadas, através do recozimento de recristalização que atualmente é uma etapa de rotina quando da fabricação de núcleos magnéticos laminados. Nos próximos capítulos detalha-se os fatores influentes no ciclo de recozimento responsáveis em minimizar os efeitos negativos da deformação da estrutura do material pela estampagem (ver itens 2.4 e 2.5).

Envelhecimento magnético – O envelhecimento em aço ocorre principalmente em função dos altos teores de carbono. A estabilidade de uma solução sólida super-saturada pode diminuir em função da energia livre do sistema, gerando a formação de precipitados, e com isto alterar as propriedades do material, ou seja: aumentam a dureza, a resistência à tração e diminuem a ductilidade e a resistência ao choque. A mudança nas propriedades pode se manifestar de forma lenta à temperatura ambiente, mas acelera-se à medida que se eleva a temperatura entre 150 e 350°C. Nos materiais para fins eletromagnéticos, o envelhecimento afeta o comportamento magnético, pois produz aumento das perdas magnéticas, diminuindo a permeabilidade magnética para teores de carbono acima de 0,003% [Emura et al, 1998]. Durante o uso e em decorrência da ação de campos alternados, de variações na temperatura, da ação de forças mecânicas e de outros fatores que influem sobre o posicionamento dos domínios, verifica-se a precipitação de uma segunda fase (comumente carbeto e nitreto). Esta precipitação provoca uma diminuição na permeabilidade e um sensível aumento nas perdas [Michal, 1986].

Aços com teor de carbono superior a 30 ppm devem ser descarbonetados para evitar o envelhecimento magnético. Este tratamento, normalmente realizado em atmosfera úmida, provoca o aparecimento de uma camada superficial de óxidos que, por sua vez, aumenta a perda por histerese [Werner & Jaffee, 1992].

Tipo de isolamento – A função básica do isolamento é a redução das correntes parasitas entre as lâminas do motor. Além das propriedades de isolamento, este revestimento muitas vezes tem a função de lubrificar os punções e matrizes, facilitando a estampagem e incrementando a vida útil das ferramentas. São diversos os tipos de revestimentos usados no isolamento interlamelar e podem ser divididos em orgânicos e inorgânicos. Na maioria das vezes podem ser fornecidos pelo fabricante do aço como é o caso dos vidros, fosfatos, vernizes e resinas, sendo que o revestimento óxido normalmente é desenvolvido pelo fabricante do motor em uma etapa do processo de recozimento das lâminas.

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

2.3.1 Introdução

A redução de perdas pela adoção de uma forma construtiva mais apropriada (empilhamento de lâminas) e pelo uso de um aço mais adequado, não é suficiente para levar o valor das perdas magnéticas a um nível desejado. Isto se deve aos seguintes fatos: (1) os aços de grãos não orientados, principalmente os nacionais, não apresentam garantia de composição química e de propriedades mecânicas, (2) o fabricante do motor necessita cortar em tiras as bobinas de aço adquiridas das siderúrgicas e posteriormente estampar as lâminas na geometria do estator e do rotor. Este procedimento naturalmente leva a deformação plástica das regiões do material próximas à superfície de corte.

Sendo assim, o fabricante do motor deve desenvolver as propriedades magnéticas desejadas, ou seja, reduzir as perdas e elevar a permeabilidade [Werner & Jaffee, 1992 / Stephenson, 1990]. Isto comumente é feito através de um tratamento térmico de recozimento que tem por objetivo descarbonetar o aço, produzir o tamanho de grão e a textura adequados, oxidar a superfície a fim de garantir isolamento elétrico, e eliminar as tensões e o encruamento gerados no processo de estampagem [Hou, 1996 / Shapiro, 197? / Stephenson, 1990 / Judd, 1995].

Industrialmente é comum a realização dos tratamentos de descarbonetação, recozimento e recobrimento inorgânico em um mesmo ciclo térmico, que é padrão independentemente do tipo específico de aço a tratar. Estes tratamentos são normalmente realizados em fornos contínuos, mantidos em operação ininterruptamente.

Freqüentemente o recozimento é a última etapa do processamento metalúrgico dos aços elétricos. O recozimento em lâminas de estator pode ser aplicado as três classes de aços elétricos, com funções bem diferentes, como mostrado a seguir:

Recozimento dos Aços Não Processados e Semi-Processados - Esta etapa é fundamental para melhoria das propriedades magnéticas destes aços. Ela proporciona o crescimento de grão, diminui o teor de carbono e forma uma camada superficial isolante de óxido. Com este recozimento, as perdas são reduzidas pela metade e a permeabilidade aumenta de 100 a 300% [Landgraf et al, 1997].

Recozimento de Aços Totalmente Processados - Diferente das múltiplas funções do recozimento dos aços semi-processados, o principal papel do recozimento dos aços totalmente processados é um “alívio de tensões”, ou seja: eliminar o encruamento que as operações de corte introduzem nas lâminas do estator, através do processamento das bobinas e da estampagem das ranhuras e perfil externo. Com este recozimento obtém-se uma redução em torno de 10% nas perdas magnéticas e um aumento da permeabilidade de até 50% [Landgraf et al, 1997]. Desta forma, parece evidente que estes tipos de aços devem ter um ciclo térmico diferenciado dos aços acima mencionados (semi e não processados). Atualmente a Embraco utiliza o mesmo ciclo térmico para qualquer um dos tipos de aço.

Recozimento dos Aços de Grão Orientado – Como estes tipos de aços não são objetos desta proposta de trabalho, não serão abordados. Cabe informar apenas que a função do recozimento nos aços elétricos de grãos orientados também é de obter um “alívio de tensões”.

2.3.2 Ciclos térmicos

A Figura 4 apresenta de modo esquemático o ciclo térmico de recozimento de lâminas de estator empregado na Embraco. Antes de qualquer discussão sobre cada uma das etapas do tratamento térmico de recozimento, cabe ressaltar que as lâminas de rotor são tratadas em um

equipamento com ciclo térmico diferente do apresentado abaixo, pois estas necessitam somente de uma oxidação externa.

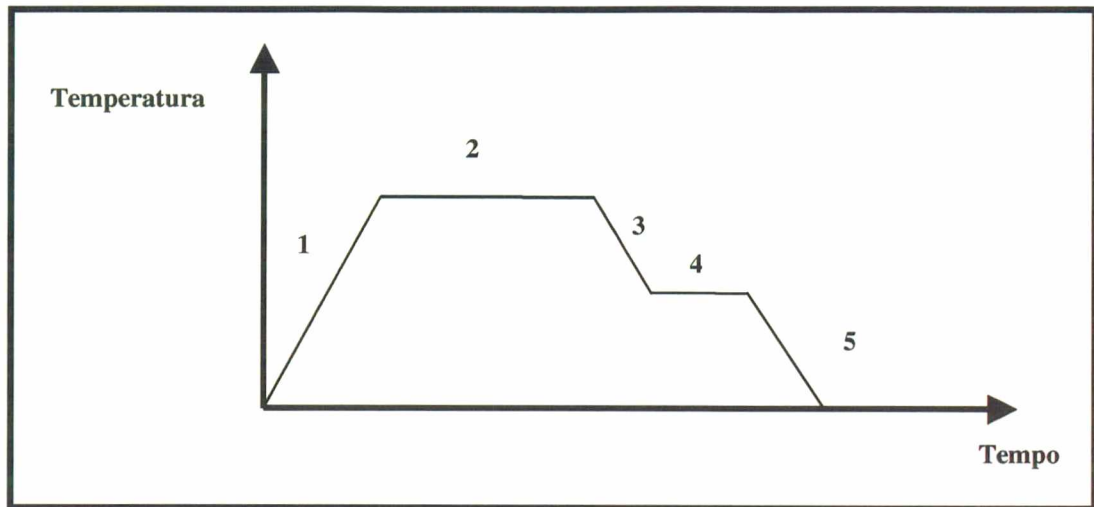


Figura 4 – Curva teórica do tratamento de recozimento de aços elétricos.

ETAPA 1 - Nesta fase o material é aquecido até a temperatura de descarbonetação, onde o óleo proveniente da estampagem é removido. É aconselhável que esta etapa seja realizada numa zona fisicamente separada da zona de descarbonetação. A atmosfera é mantida seca, ou seja com ponto de orvalho muito baixo, pois a formação de uma camada de óxido, neste momento, poderia interferir na etapa seguinte, que é de descarbonetação. O tempo estimado desta fase é de 150 min.

ETAPA 2 – Nesta etapa ocorre a injeção da atmosfera de gás exotérmico (exo-gás) e a introdução de vapor de água até ser atingido um ponto de orvalho de cerca de 30°C, o que corresponde a cerca de 4,2% em volume da água para 1 atm. A temperatura variando entre 750 e 800°C, propicia o processo de descarbonetação das lâminas de estator. A remoção dos carbonetos através de sua dissociação e posterior difusão do carbono principalmente nos contornos de grãos, permite que nesta fase ocorram simultaneamente os processos de recristalização e crescimento de grãos. Nos aços para fins elétricos este tratamento é realizado no

campo monofásico (α) ou bifásico ($\alpha+\gamma$) dependendo do teor de carbono. O tempo estimado desta fase é de 200 min.

ETAPA 3 - Resfriamento até a temperatura de oxidação (azulamento), próxima a 480°C. Normalmente esta etapa é dimensionada e limitada em função da carga térmica que está sendo resfriada. O tempo estimado desta fase é 150 min.

ETAPA 4 - Para que o processo de oxidação ocorra é necessário o aumento do ponto de orvalho para cerca de 85°C e temperatura de 550°C. Ocorre então a formação de uma camada de óxido de ferro, basicamente Fe_3O_4 (magnetita) aderente à superfície da chapa. O tempo estimado desta fase é de 100 min.

ETAPA 5 - Nesta etapa obrigatoriamente o resfriamento deve ser lento, de modo que o carbono ainda existente em solução não precipite, minimizando o efeito do envelhecimento magnético. Normalmente abaixo de 360°C o resfriamento passa a ser forçado até a temperatura para manuseio da carga, a fim de aumentar a produtividade. Tempo estimado da primeira fase é 150 min e da segunda fase é de 30 min.

O ciclo térmico aplicado para as lâminas do rotor na Embraco difere do apresentado acima nos seguintes pontos: não apresenta as zonas 2 e 3; na zona 1 o aquecimento é até a temperatura entre 460 e 480°C com atmosfera de N_2 mais vapor d'água.

2.4 FATORES DE INFLUÊNCIA NO CICLO DE RECOZIMENTO

2.4.1 Tempo e temperatura

Para tratamento de aços semi-processados onde é necessária a redução do teor de carbono, o tempo é função dos teores iniciais de carbono dos aços utilizados. Normalmente, empresas fabricantes de motores utilizam aços de diversos fornecedores. Esta diversidade implica em possuir um equipamento dimensionado para que, durante o ciclo de descarbonetação, este material fique o tempo suficiente para reduzir os teores de carbono de 800 ppm (valores máximos) para níveis próximos a 30 ppm, melhorando assim suas propriedades magnéticas.

Para aços totalmente processados onde não existe a necessidade de descarbonetação, e deseja-se somente alívio da tensão gerada pela estampagem, o tempo de encharque é dimensionado para uniformizar a temperatura da chapa acima de 550 °C.

2.4.2 Atmosferas

Vários tipos de atmosferas são utilizadas para o processo de descarbonetação de aços para fins elétricos. A seguir são apresentadas as principais características das atmosferas mais utilizadas a nível industrial.

Atmosfera exo-gás - Esta atmosfera é obtida através da combustão controlada de um gás hidrocarboneto, normalmente o propano, em um gerador exotérmico [Judd, 1995 / Metals Handbook, 1981]. A combustão controlada do propano com o ar, resulta em uma atmosfera de 10% H₂ + 12% CO + 5,8% CO₂ + 0,5% O₂ + 0,5% CH₄ + 71% N₂ + 0,2% de impurezas. Esta atmosfera está em desuso em função da complexidade de manutenção dos geradores, da

dificuldade de garantia de qualidade do gás gerado (apresenta grande variação de composição) e principalmente pelo fator de segurança (presença de monóxido de carbono – CO).

Atmosfera H₂ - N₂ - É a atmosfera mais utilizada atualmente. Segundo Geiger (1979) a proporção N₂ / H₂ pode variar de 5 a 25% de hidrogênio, sendo que o consumo médio é de 10% de H₂. Para este tipo de atmosfera utiliza-se normalmente nitrogênio obtido de membrana. Apresenta um custo por m³ maior do que a atmosfera de exo-gás, mas o custo final por Kg de material tratado é menor, pois, com esta atmosfera, pode-se utilizar vazões menores durante o processamento.

Outra vantagem expressiva em relação à atmosfera de exo-gás é o controle da qualidade da composição que é realizado simplesmente com as variações de vazões dos gases em um misturador.

Para utilização deste tipo de atmosfera na descarbonetação é necessária a introdução de vapor d'água [Judd, 1995] que é realizada dentro da câmara do forno somente com o controle do ponto de orvalho da mistura em torno de 25°C.

Atmosfera Neutra – Este tipo de atmosfera é aplicável em aços elétricos totalmente processados com o objetivo de somente eliminar as tensões mecânicas introduzidas durante as operações de corte. Este tipo de tratamento tem sido realizado pelos consumidores de aços elétricos, das mais diferentes formas, dependendo da infra-estrutura disponível. Entretanto, é possível recozer o aço totalmente processado em atmosfera de nitrogênio puro. O nitrogênio de pureza comercial, entretanto, tem um teor de oxigênio e umidade que normalmente causam oxidação do material. Se o ponto de orvalho da atmosfera for controlado abaixo de 0°C é viável seu uso.

Outra atmosfera que pode ser utilizada no tratamento de aços totalmente processados é a de N_2 / H_2 seca, ou seja, com baixíssimos teores de vapor de água. Neste caso é importante o controle para que a oxidação não ocorra, pois aumentam a espessura do óxido na superfície do material.

2.4.3 Velocidade de aquecimento

Esta variável refere-se à primeira etapa do ciclo de recozimento, conforme mostrado anteriormente. Nesta primeira fase do ciclo é de extrema importância a eliminação dos resíduos de óleo provenientes da estampagem, pois podem interferir com a atmosfera do forno e gerar outras reações químicas que levem a mudanças nas características microestruturais do material a ser tratado.

Nesta etapa do ciclo é aconselhável que exista um sistema de exaustão para que os resíduos desta queima sejam retirados e que ela seja isolada da câmara de descarbonetação ou de alívio de tensão. Normalmente, deseja-se aquecer a massa de aço o mais rápido possível para aumentar a produtividade do ciclo de tratamento. A limitação está na quantidade de calor gerada pelo forno para aquecimento das lâminas. Velocidades de aquecimentos de $1000\text{ }^\circ\text{C/h}$ são valores normais em se tratando de equipamentos industriais [Lyudkovsky et al , 1983].

Conforme Landgraf (1997) a taxa de aquecimento até a temperatura de encharque deve ser a mais rápida possível, pois desta forma eliminam-se os riscos de formação de muitos núcleos de recristalização e com isto a formação de uma estrutura com tamanhos de grãos heterogêneos que não é a ideal para as propriedades magnéticas.

2.4.4 Velocidade de resfriamento

No ciclo térmico do processo de recozimento existem duas rampas de resfriamento. A primeira de 780°C para 480°C e uma segunda rampa após a ferro-oxidação das lâminas, de 550°C até a temperatura que permita o manuseio do material.

Na primeira rampa deve-se ter um resfriamento lento. A taxa clássica para esta fase é de 100°C/h. Nesta etapa do processo, devemos ter a preocupação de que o carbono residual não precipite em contornos de grão e sim fique em solução na matriz de ferro.

Na segunda fase do resfriamento, o objetivo é um resfriamento mais lento até a temperatura de 360°C. Normalmente esta etapa é realizada com a carga dentro do forno, pois assim tem-se um melhor controle. Uma taxa menor que 100°C/h é interessante para evitar tensões térmicas nas lâminas, fato este que aumenta as perdas magnéticas.

Após a carga chegar à temperatura de 360°C, o resfriamento pode ser mais acelerado. Normalmente no processo fabril, este resfriamento é realizado em outra etapa ou câmara do forno e utiliza-se ar forçado com o objetivo de reduzir o tempo.

2.4.5 Aspectos cinéticos da descarbonetação

Aplicável a aços elétricos semi-processados e não processados, onde deseja-se reduzir o teor de carbono do material com objetivo de melhorar suas propriedades magnéticas.

A descarbonetação ocorre principalmente pela reação do vapor de água com o carbono em solução no aço em temperatura próximas a 760°C, conforme a seguinte reação:



A grande maioria dos aços não e semi processados comerciais tem teores de carbono entre 0,02 e 0,08%. A principal razão para se reduzir o teor de carbono está associada à eliminação dos carbonetos é a redução do carbono em solução, facilitando a movimentação das paredes de domínio, redução das perdas por histerese e também do envelhecimento magnético [Stratton & Staneuscu, 1999].

A cinética da descarbonetação depende do equilíbrio químico da reação do carbono com o vapor de água, reação (1). Quanto mais alta a temperatura, mais rápido ela ocorrerá. Entretanto, para que haja descarbonetação até o centro da chapa, é necessária a difusão do carbono desta região até a superfície e a sua reação com a umidade do gás [Metals Handbook, 1981]. A difusividade do carbono no aço pode ser representada pela equação:

$$D = D_o \exp \frac{-Q}{RT} \quad (2)$$

A profundidade de descarbonetação em função da temperatura é obtida por:

$$X = k \sqrt{T} \quad (3)$$

onde:

D_o = Coeficiente de difusão do carbono no ferro.

Q = Energia de ativação para difusão do carbono no ferro.

T = Temperatura.

R = Constante universal dos gases.

K = Constante relativa a concentração do carbono no material.

A difusão do carbono no ferro varia conforme a estrutura cristalina. É muito maior na ferrita (Fe α - estrutura CCC) do que na austenita (Fe γ - estrutura CFC). Os valores de D_0 e Q para ferrita e austenita são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de D_0 e Q para a difusão do C no Fe.

	Fe α	Fe γ
D_0 (cm^2 / s)	0,079	0, 21
Q (cal / mol)	18100	33800

O diagrama de equilíbrio Fe-Fe₃C mostra que abaixo de 727°C o carbono está inteiramente sob forma de cementita, Fe₃C. Nesta condição, para que haja efetiva decarbonetação, é necessária a dissociação do carboneto, que é um processo mais lento. Acima de 727°C, para um aço com 0,05%C, as fases α e γ do ferro coexistirão, sendo que grande parte do carbono estará dissolvido na austenita. Apesar da menor difusividade do carbono em γ , este elemento sai da austenita para a ferrita e através desta fase chega até a superfície do material. O aumento da temperatura favorece a formação de austenita e acima de 910°C a estrutura será totalmente austenítica, onde o carbono tem menor coeficiente de difusão. Assim, o tratamento de decarbonetação é mais efetivo quando realizado entre temperaturas de 727 e 910°C.

2.4.6 Termodinâmica da descarbonetação

A descarbonetação é o processo que visa a retirada de carbono dos aços. Esta retirada, dependendo do tipo de atmosfera empregada nos fornos seguirá reações segundo relação de pressão parciais de H_2 , H_2O , CO e CO_2 . Em atmosferas obtidas em geradores exotérmicos este processo é mais lento, pois existirão várias reações que se processarão ao mesmo tempo. Em se tratando de aços elétricos, os teores iniciais de carbono do material e a quantidade de umidade vão determinar o tempo necessário para que as reações se processem. Entretanto, se for utilizada uma grande quantidade de vapor d'água poderá haver a formação de FeO na superfície do aço que será prejudicial ao processo. A Figura 5 mostra os teores de carbono de equilíbrio em função do ponto de orvalho em cada temperatura de tratamento utilizando-se atmosfera exotérmica.

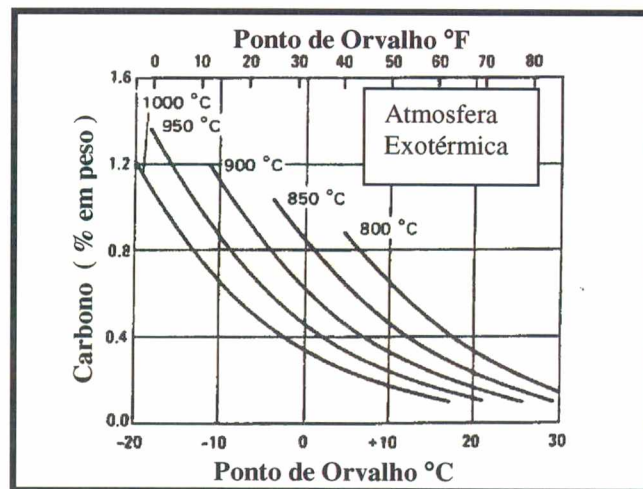


Figura 5 – Relação entre ponto de orvalho e potencial de carbono para atmosfera exotérmica. [Metal Handbook,1981]

Para que o aço não seja oxidado, ou seja, para que o tratamento seja realizado no campo do Fe puro, são utilizadas temperaturas da ordem de $780^{\circ}C$ (também, por razão de cinética de reação) e um ponto de orvalho próximo a $25^{\circ}C$. O controle da umidade é realizado pela medição do “ponto de orvalho” da atmosfera. É uma técnica para avaliar a quantidade de

umidade presente. O ponto de orvalho é a temperatura de condensação da água quando uma atmosfera contendo umidade é resfriada. Quanto mais umidade tiver a atmosfera, mais alta será a temperatura onde se forma o “orvalho” ou o “ponto de orvalho”.

2.5 RECUPERAÇÃO / RECRISTALIZAÇÃO / CRESCIMENTO DE GRÃO

2.5.1 Introdução

A estampagem, ou mais precisamente o processo de puncionamento, é uma operação importante no processamento dos aços elétricos. Primeiro, porque é a etapa que define a geometria da lâmina do motor e depois porque esta conformação introduz deformação plástica, principalmente na região próxima à superfície de corte, deteriorando as propriedades magnéticas do material.

Como mostrado na Figura 6, as deformações na estrutura cristalina ocasionadas pela estampagem podem alcançar até 0,20 mm da superfície de corte (detalhe A), independente do tipo de material. No detalhe B, a deformação pela redução da espessura corresponde a mais de 10% da espessura total. Isto acarreta aumento das perdas magnéticas em relação aos valores típicos especificados.

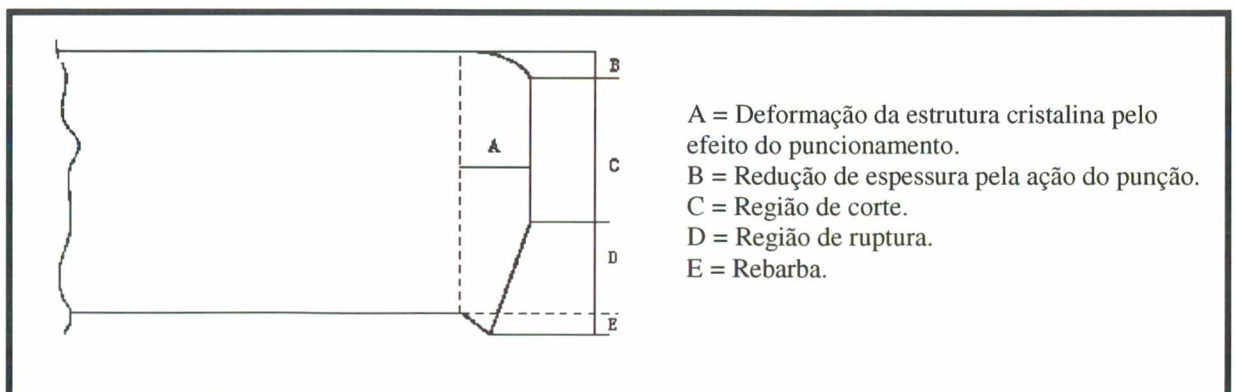


Figura 6 – Representação das regiões de uma lâmina estampada.

Este encruamento é identificado na literatura como um dos responsáveis pelo mau desempenho magnético do material, pois gera maior número de discordância na estrutura cristalina do material, dificultando o movimento de paredes de domínio magnético [Günter & Bölling, 1988]. Especificamente nos aços semi-processados, além dos fatores acima mencionados, ocorre a necessidade de desenvolver as propriedades magnéticas pelo fabricante do motor. Com o objetivo de facilitar este processo, o aço é fornecido ao usuário com um grau de deformação da ordem de 8% que induz à recristalização do material, produzindo um tamanho de grão maior que o inicial [Usiminas, 1996].

Na análise do crescimento de grãos deformados pelo processo de laminação, pode-se identificar que este fenômeno está correlacionado a vários estágios que antecedem o processo, tais como:

- Origem do material;
- Processo de refino e desgaseificação;
- Deformação por laminação à quente e à frio;
- Recuperação e recristalização;

O crescimento de grãos ocorre posteriormente à recuperação e à recristalização, sendo, portanto, necessário considerar estes dois aspectos.

Um material deformado à frio apresenta elevada energia armazenada pela deformação. A diminuição desta energia se dá por mecanismos de redução e rearranjo de defeitos cristalinos.

Durante a deformação ocorre:

- Aumento da resistência à tração, da dureza e da tensão de escoamento;
- Diminuição do alongamento, da ductilidade e da estrição;
- Diminuição da permeabilidade magnética e da condutividade elétrica;
- A energia interna do metal aumenta em consequência do aumento de energia livre;
- Alta densidade de discordância.

O aumento da resistência do aço resultante do trabalho de deformação à frio é causado pela geração e rearranjo das discordâncias. Estas são as mais importantes imperfeições cristalinas nos metais.

A Figura 7 mostra as alterações nas propriedades do ferro pelo aquecimento após deformação plástica. O processo de reorganização da disposição geométrica dos átomos e dos cristais consiste nas fases: recuperação, recristalização e crescimento de grãos.

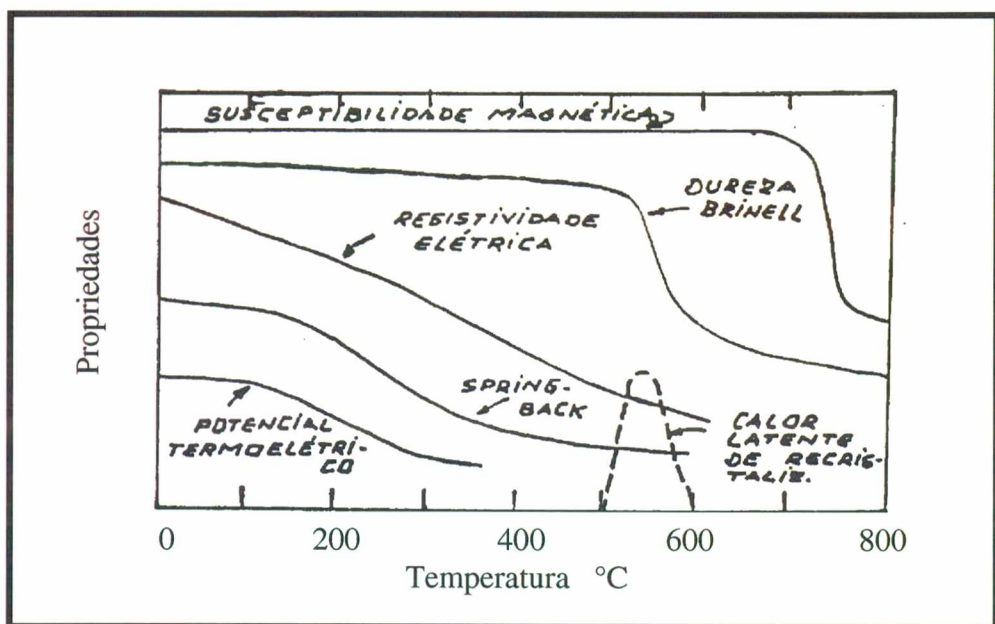


Figura 7—Variação das propriedades do ferro encruado devido ao aquecimento. [Metals Handbook, 1981]

2.5.2 Recuperação

O processo de recuperação ocorre numa faixa de temperatura abaixo de 500°C. Nesta temperatura as seguintes alterações microestruturais ocorrem [Padilha, 1995 / Metal Handbook, 1981]:

- Aniquilamento das discordâncias de sinais opostos.
- Rearranjo das discordâncias de modo a formar uma configuração de menor energia.
- Formação de contornos de pequeno ângulo.

Esta restauração pode ser avaliada pelas variações das propriedades mecânicas, resistividade elétrica, densidade e tensões residuais. A recuperação é o resultado da eliminação parcial das tensões internas causadas pela deformação plástica. Do ponto de vista metalúrgico, a recuperação é importante pois corresponde ao tratamento de alívio de tensões.

2.5.3 Recristalização

A recristalização, ou também chamada de recristalização primária, pode ser definida como a eliminação de defeitos cristalinos através da migração de contornos de pequeno ângulo. Em certas condições isotérmicas, há a formação de uma região livre de defeitos circundada por um contorno de pequeno ângulo. A recristalização prossegue por crescimento desse núcleo sob a matriz encruada (não recristalizada). Na Figura 8, pode-se observar esquematicamente o crescimento das regiões recristalizadas até que os grãos recristalizados se toquem mutuamente eliminando, assim, grande parte dos defeitos cristalinos.

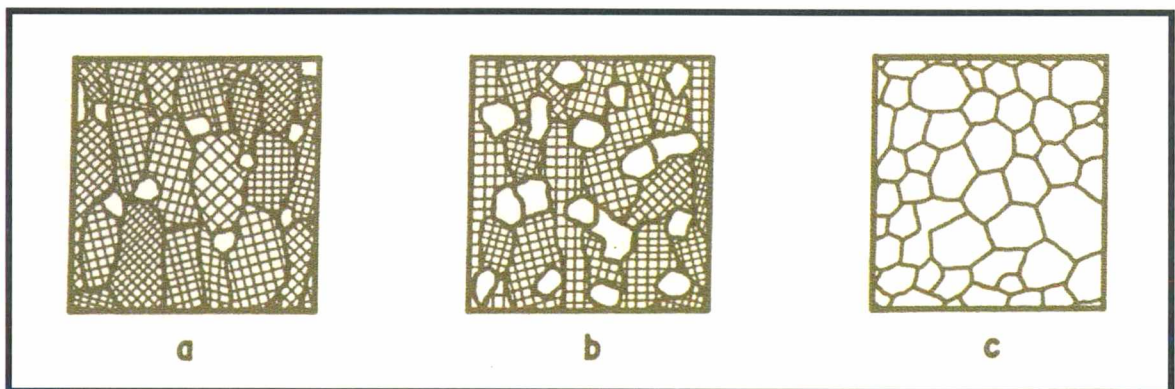


Figura 8 – Representação esquemática da recristalização primária.[Padilha, 1995]

(a) início da recristalização (b) 50% de recristalização (c) recristalização completa.

2.5.4 Crescimento de grão e recristalização secundária

Quando a recristalização se completa, a microestrutura de grãos recristalizados ainda não é a mais estável. A quantidade de contornos passa a atuar como potencial termodinâmico para crescimento de grãos, de modo a diminuir o número de grãos por unidade de volume, ou seja, diminuir a área total destes contornos.

Quando o aumento do tamanho de grãos ocorre de modo a manter o perfil de distribuição, isto é, com aumento contínuo do tamanho médio, denomina-se *crescimento normal*. Quando o aumento do tamanho de grãos ocorre de modo a alterar o perfil de distribuição, ou seja, com o crescimento acentuado de apenas alguns grãos, o processo é denominado *recristalização secundária* ou *crescimento anormal* [Padilha, 1995 / Metal Handbook, 1981].

Alguns fatores podem restringir o crescimento normal de grãos, que são: impurezas em solução sólida, presença de partículas, presença de textura forte e limitações devido à espessura da amostra. Somente os últimos três fatores podem promover a recristalização secundária. O efeito retardador devido a impurezas em solução sólida não é suficiente para permitir recristalização secundária.

2.6 OXIDAÇÃO

Oxidação Interna ou Subsuperficial – Ocorre sobre certas condições de recozimento em atmosfera úmida, nos aços que contêm em solução elementos que apresentam grande afinidade pelo oxigênio, tais como Al, Si e Mn. Este tipo de oxidação acarretará um aumento das perdas por histerese [Lyudkovsky et al, 1982 / Stratton et al, 1999 / Geiger, 1979].

A nitretação tem efeito semelhante à oxidação interna, mas pode-se tornar bem mais danosa devido à grande profundidade que pode alcançar. Temperaturas elevadas e longo tempo de encharque, em atmosfera contendo N_2 , favorecem a ocorrência de nitretação.

O efeito danoso da nitretação e da oxidação interna sobre as propriedades magnéticas é provavelmente devido ao efeito destas partículas sobre o movimento das paredes dos domínios magnéticos. Partículas mais finas e mais distribuídas têm efeito mais negativo sobre as propriedades magnéticas [Günther & Bölling, 1989].

Oxidação Externa (Azulamento) – A função principal desta fase do processamento dos aços elétricos é criar uma camada de óxido Fe_3O_4 (magnetita). Este óxido apresenta as características ideais para aplicação em motores, pois além de possuir uma excelente aderência e proteger contra a corrosão atmosférica, é um bom isolante elétrico, permitindo assim reduzir as perdas parasíticas (correntes de Foucault) geradas quando do empilhamento das lâminas na formação do pacote do estator [Stratton & Staneuscu, 1999].

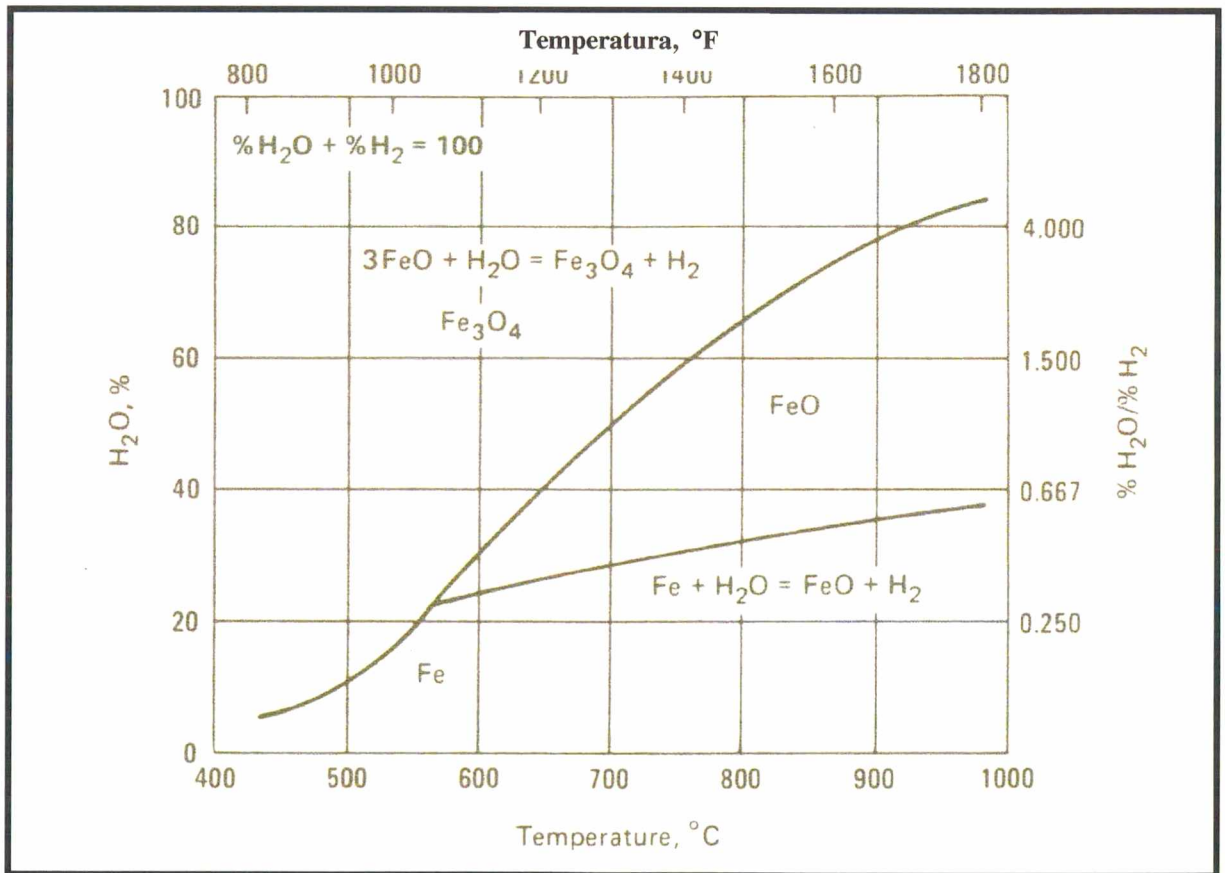


Figura 9 – Curvas de equilíbrio da formação dos FeO e Fe_3O_4 quando um aço é aquecido em atmosfera de $\text{H}_2 - \text{H}_2\text{O}$. [Metals Handbook, 1981]

Na Figura 9, pode-se observar que o composto Fe_3O_4 (magnetita) só existe dependendo da relação $p_{\text{H}_2\text{O}} / p_{\text{H}_2}$ e da temperatura. Para garantir que não se forme FeO (wustita), que para o motor é extremamente prejudicial pois é pouco aderente à superfície do aço, é mais seguro trabalhar com temperatura máxima de 550°C . Nesta condição, para garantir a formação de uma camada homogênea de Fe_3O_4 em baixa temperatura segundo a reação (4), deve-se trabalhar com uma relação de $p_{\text{H}_2\text{O}} / p_{\text{H}_2}$ entre 5 e 6. Esta relação de pressões, em uma atmosfera contendo 10% de H_2 , representa um ponto de orvalho próximo de 80°C .



Se a temperatura e a atmosfera não forem corretas, podem ocorrer as seguintes interferências [Binder, 1996]:

- a) Se a temperatura estiver abaixo de 100°C , a água líquida pode reagir com o Fe e formar o hidróxido $\text{Fe}(\text{OH})_3$, segundo a reação (5). Este hidróxido pode então se decompor em hematita Fe_2O_3 segundo reação (6).



- b) Se o ar presente estiver acima de 315°C outra reação concorrente (7) leva à formação de hematita. A hidroxila (OH) reage com o Fe dando o hidróxido $2\text{Fe}(\text{OH})_3$ que vai formar hematita (Fe_2O_3) conforme equação (6).



- c) No início do processo, quando o forno é purgado e não há a presença de ar acima de 315°C, o vapor reage de acordo com uma rota preferencial intermediária. Desta forma o O₂ estará disponível para reagir com Fe e formar Fe₃O₄ segundo reação (8).



A oxidação em ar ocorre quando o oxigênio livre reage com o ferro formando um filme de Fe₃O₄. Nesta condição a reação (8) é rápida e incontrolável, em função de não se ter o controle do ponto de orvalho do ar [Stratton & Staneuscu, 1999]. Quando se exige garantia e aderência de espessura de camada de óxido no produto final, não é recomendável o uso deste processo apesar de ser de baixo custo.

Até a temperatura de 570°C a camada de óxido consiste principalmente de Fe₃O₄ (magnetita). Acima desta temperatura pode ser produzido o FeO que cresce mais rapidamente do que outros óxidos, devido a sua estrutura cristalina defeituosa. Este óxido se decompõe euteticamente durante o resfriamento em uma estrutura dupla de Fe₃O₄ e Fe. A proporção dos dois óxidos na camada resultante depende da taxa de resfriamento, que sendo alta gera maior retenção de FeO, resultando em uma camada tripla de Fe₃O₄, FeO e Fe. Esta estrutura não é desejada por apresentar uma baixa resistência à corrosão se comparada à camada de óxido formada abaixo de 570°C.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para estudar os efeitos da aplicação de diferentes ciclos de recozimento, em condições industriais, sobre as propriedades de um aço de grão não orientado totalmente processado para fins elétricos e no rendimento de motores fabricados para aplicação em compressores herméticos, procedeu-se uma série de experimentos divididos em três grandes grupos:

- Grupo I – material conforme recebido da siderúrgica;
- Grupo II – material submetido a um recozimento em temperatura de 760°C durante 3,5 horas, sob atmosfera descarbonetante e após oxidação em 540°C por 2,3 horas.
- Grupo III – material submetido a um recozimento em temperatura entre 460 e 480°C durante 2,0 horas, sob atmosfera oxidante.

De cada grupo de experimentos foram fabricados estatores para avaliar de forma sistemática o efeito do tratamento térmico no desempenho de motores; foram realizados ensaios para caracterização das propriedades elétricas e magnéticas, composição química e análise metalográfica (microscopia ótica e eletrônica de varredura associada com microsonda), difração de raios-X e por fim a avaliação do desempenho dos motores elétricos fabricados com as lâminas de estatores de cada grupo dos experimentos.

Exceto no caso da determinação de propriedades elétricas e magnéticas, cujos ensaios normalizados exigem corpos de prova com geometria e dimensões definidas, as demais análises foram também realizadas em amostras com geometria de uma lâmina de estator típica da Embraco, confeccionada pelo processo produtivo normal da empresa. Este procedimento visou avaliar a efetiva influência da deformação plástica localizada oriunda da estampagem, bem como o efeito dos diferentes ciclos de tratamento térmico efetuados sobre a mesma. Cabe ressaltar que,

em uma lâmina de estator, as maiores deformações plásticas encontram-se exatamente nas regiões onde se requer as melhores propriedades magnéticas.

3.1 SELEÇÃO DAS AMOSTRAS

De uma mesma bobina de aço totalmente processado do tipo E185-C4 com espessura 0,5mm foram cortadas duas bobinas de menor largura para a estampagem das amostras com geometria de lâminas de estatores e 5 tiras de 1,0m x 1,02m, para obtenção de amostras para ensaio de perdas magnéticas. A seleção da bobina a ser usada nos experimentos, realizou-se através do critério estatístico da aleatoriedade, visto que todo material fornecido pela usina tem garantia de qualidade assegurada. A utilização deste critério faz supor que se tenha representatividade nas características do material em avaliação.

A composição química e as perdas magnéticas reais do material fornecidas fabricante do aço são mostradas nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Composição química do material E185-C4 obtida junto ao fabricante (% peso).

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V	Ti	Sn	Zr
0,002	0,140	2,0	0,009	0,009	0,093	0,038	0,006	0,250	0,023	0,002	0,002	0,004	0,002

Conforme catálogo do fabricante, o aço E185 deve fornecer perdas magnéticas máximas de 1,85 W/Kg a 1,0T/50 Hz para uma espessura de 0,5mm após tratamento térmico. A tabela 4 mostra os valores especificados em catálogos e os valores reais fornecidos pela usina siderúrgica.

Tabela 4 – Perdas magnéticas máximas para aço E185 obtidas junto ao fabricante.

		Perda Magnética Máxima			
		1,0 T		1,5 T	
		50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
Catálogo	0,5 mm	1,85	2,34	4,10	5,19
Valores Reais	0,5 mm	1,64 e 1,58	2,08 e 2,02	3,7 e 3,59	4,72 e 4,56

As lâminas de estatores foram obtidas pelo processo usual de estampagem, utilizando-se para tal uma ferramenta com insertos em metal duro. Esta ferramenta é a utilizada no processo produtivo da Embraco. De uma bobina de menor largura foram obtidas aproximadamente 15.000 lâminas estampadas.

Das placas selecionadas, foram estampadas as lâminas para ensaio Epstein nas dimensões de 30mm x 280mm. No total foram estampados 6 conjuntos, formados por 20 lâminas transversais ao sentido de laminação e 20 lâminas longitudinais ao sentido de laminação. As amostras obtidas foram suficientes para permitir o teste de desempenho em 30 motores para cada uma das condições do estudo, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Número de amostras para execução do experimento e o tipo de processamento.

AMOSTRAS	LÂMINAS ESTATOR	LÂMINAS EPSTEIN	TIPO DO PROCESSAMENTO
Grupo 1	30 motores (2.910 lâminas)	1 conjunto	Sem Tratamento Térmico Conforme fornecido pela Usina
Grupo 2	30 motores (2.910 lâminas)	1 conjunto	Com Tratamento Térmico Forno Brasimet (760°C)
Grupo 3	30 motores (2.910 lâminas)	1 conjunto	Com Tratamento Térmico Forno Mebsa (460 a 480°C)

Inicialmente foi avaliado o rendimento de 10 estatores. Para determinar se estes 10 estatores representavam o conjunto de amostras foi adotado o seguinte critério: se o desvio padrão obtido da média destes 10 estatores fosse $\leq 0,5\%$, quando comparado ao rendimento do padrão especificado, o valor obtido seria representativo e não haveria necessidade de medir o restante das amostras de estatores. A definição de avaliar inicialmente somente dez estatores de cada grupo é um critério empregado atualmente no laboratório elétrico da Embraco para minimizar o tempo dos experimentos, já que é uma prática abalizada estatisticamente.

3.2 REALIZAÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Para a realização dos tratamentos térmicos foram utilizados dois fornos durante sua operação normal na fábrica. No decorrer do procedimento, foram verificados periodicamente a temperatura e o ponto de orvalho das diferentes câmaras de cada um dos equipamentos.

Para as amostras do grupo 2, foi utilizado um forno da marca Brasimet (Figura 10) daqui por diante referenciado como forno Brasimet, cujo ciclo de tratamento térmico consistiu em:

- (1) Elevar a temperatura até 760°C em atmosfera de exo-gás com ponto de orvalho de aproximadamente 25°C ;
- (2) Manter nestas condições por 3,5 horas;
- (3) Resfriar lentamente para valores próximos a 470°C ;
- (4) Elevar a temperatura para 540°C e o ponto de orvalho para 75°C e manter nestas condições por 150 min e finalmente;
- (5) Resfriar até a temperatura ambiente.



Figura 10 – Forno de tratamento térmico das amostras do grupo 2 – Brasimet

As amostras do grupo 3 foram tratadas em um forno da marca Mebsa/Eurotherm (figura 11), daqui por diante referenciado como forno Mebsa, sob as seguintes condições:

- (1) Elevação da temperatura e queima do óleo de estampagem em 406°C;
- (2) Contínua elevação da temperatura para uma faixa que variou de 460°C até 480°C entre a entrada e saída da câmara de oxidação. Nesta zona o material ficou sob uma atmosfera de nitrogênio com ponto de orvalho de 71°C;
- (3) Manutenção destas condições por aproximadamente 2,0 horas;
- (4) Resfriamento até a temperatura ambiente.

Embora as amostras do grupo 1 não tenham sido submetidas a qualquer tratamento térmico durante este estudo, elas precisaram ser desengraxadas a fim de eliminar o óleo proveniente da estampagem e assim evitar uma provável contaminação dos equipamentos da linha de fabricação dos estatores.

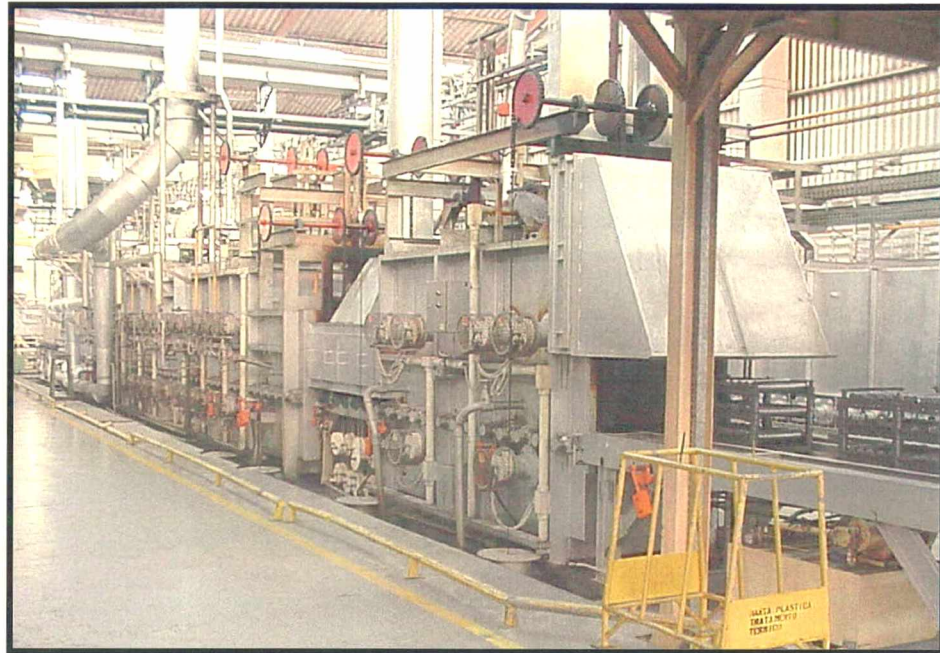


Figura 11 - Forno de tratamento térmico das amostras do grupo 3 - Mebsa

3.3 FABRICAÇÃO DE ESTADORES

Utilizando as lâminas de estatores processadas para este estudo (Figura2), foram produzidos trinta estatores de cada grupo de amostras com as mesmas características, ou seja: mesmo tipo de fio de cobre, mesmos equipamentos e mesmo tipo de isolamento. Para uma avaliação mais real do efeito do processamento dos aços utilizados nos estatores alguns testes têm sido desenvolvidos para determinar as características construtivas específicas dos motores. Aspectos como geometria (altura, empilhamento e simetria do pacote) e características do cobre nas bobinas (fator de enchimento, tipo de fio e espessura) dentre outros fatores, são extremamente importantes para determinação da boa qualidade do produto final. Mantendo-se estas variáveis constantes na avaliação de desempenho do motor elétrico, é possível determinar o efeito do processamento do aço elétrico empregado nos estatores.

Estes estatores foram fabricados simultaneamente em uma das linhas de produção da Embraco, com o objetivo de manter constantes as variáveis provenientes deste processo.

Os estatores produzidos são semelhantes aos de maior rendimento atualmente em produção. Suas características são descritas abaixo:

Modelo: EGS 80HLP

Código Embraco: 21.371.300.1

Tensão e frequência de Aplicação: 115V / 60 Hz

Altura Pacote: 48,5mm

Lâmina: Tipo V

Aço: E185-C4

Rendimento Padrão: 85,9% (com capacitor de resistência de partida, protetor térmico de 5 Ω e capacitor permanente 20 μ F).

3.4 AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DOS MOTORES

Para a medição do desempenho dos motores fabricados com os estatores deste estudo foi utilizado o teste não normalizado “Dinamômetro”, desenvolvido pela Embraco e descrito no Anexo 1. Ressalta-se que este é o teste de desempenho usado pela Embraco para avaliação de todos os seus motores, e é aceito sem restrições por todos os institutos internacionais que aprovam seus produtos.

O uso do “Dinamômetro”, representado na Figura 12, teve por objetivos determinar o torque em regime de operação (Mk) e o rendimento dos motores elétricos, simulando o funcionamento do motor em um sistema da refrigeração. Foi o teste fundamental na avaliação dos efeitos dos ciclos térmicos realizados. O valor médio das características de desempenho de dez motores de cada grupo de amostras foi comparado com o valor padrão do modelo escolhido.

O valor padrão é definido como a média dos valores históricos dos estatores fabricados normalmente em produção.

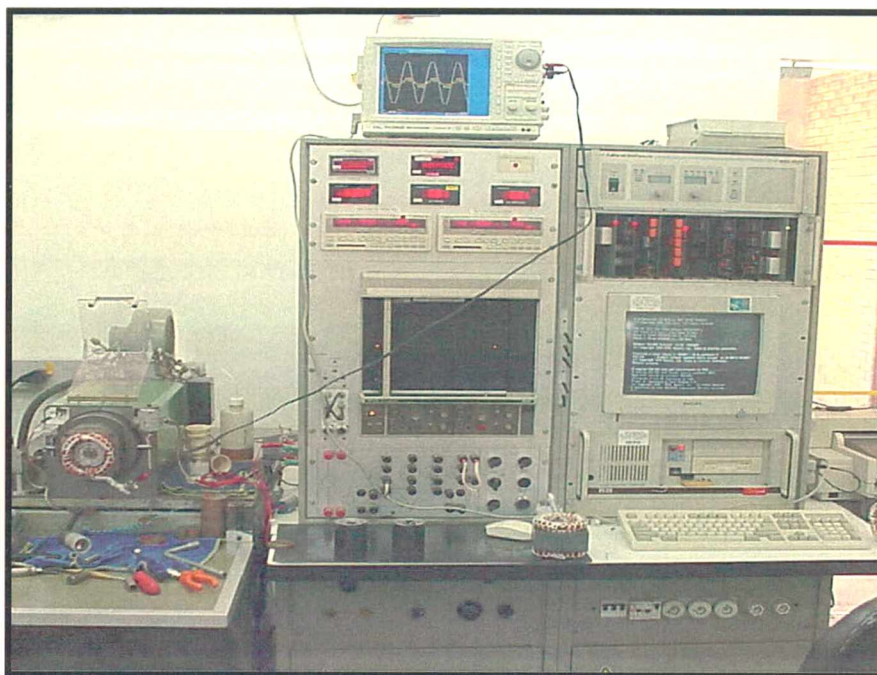


Figura 12 - Dinamômetro - Bancada para avaliação do desempenho de motores elétricos.

3.5 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Foram realizadas análises químicas para identificar possíveis mudanças na composição de alguns elementos durante o recozimento que poderiam influenciar na microestrutura e/ou no desempenho magnético do material. Em cada condição do experimento foram realizadas três análises de cada elemento para minimizar possíveis erros ou interferências nas medições.

Utilizou-se espectrometria de emissão atômica por plasma de argônio induzido (Plasma) para os elementos manganês, silício, nitrogênio e alumínio. Para carbono e enxôfre realizou-se a análise por combustão/detecção por infravermelho não dispersivo (Ndir).

3.6 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS

Os ensaios utilizados para quantificar as propriedades dos materiais magnéticos normalmente são realizados em amostras com geometria definida. Nos ensaios, as amostras são submetidas a magnetizações específicas, o que fornece valores típicos. Muitas vezes estes valores não correspondem ao valor real encontrado no produto final, devido às condições específicas na aplicação do produto, como tensões mecânicas e geometria complexas. No entanto, estes ensaios normalizados pela ABNT, ASTM e DIN são amplamente utilizados como indicativo da qualidade do material e servem como comparativo entre consumidores e fornecedores.

3.6.1 Resistência de isolamento – Frankling

A determinação da resistência de isolamento foi realizada utilizando o Medidor Frankling Modelo - Embraco, representado na Figura 13. O procedimento experimental é descrito no Anexo 2.

O teste determina o coeficiente de resistência de isolamento superficial das lâminas, visto que durante os ciclos de tratamentos térmicos executados existe uma etapa de formação do óxido Fe_3O_4 , responsável pela redução das perdas por correntes de Foucault, quando do empilhamento das lâminas no pacote do estator. Este teste determina a qualidade de isolamento de uma superfície entre condutor perfeito e isolante perfeito.

Inicialmente foi realizado um primeiro teste com a medição de cinco amostras de cada grupo do experimento. Os resultados iniciais obtidos a princípio não eram esperados. Com o objetivo de comprovar os resultados da primeira medição, resolveu-se executar um segundo teste em mais dez amostras de cada grupo do experimento.

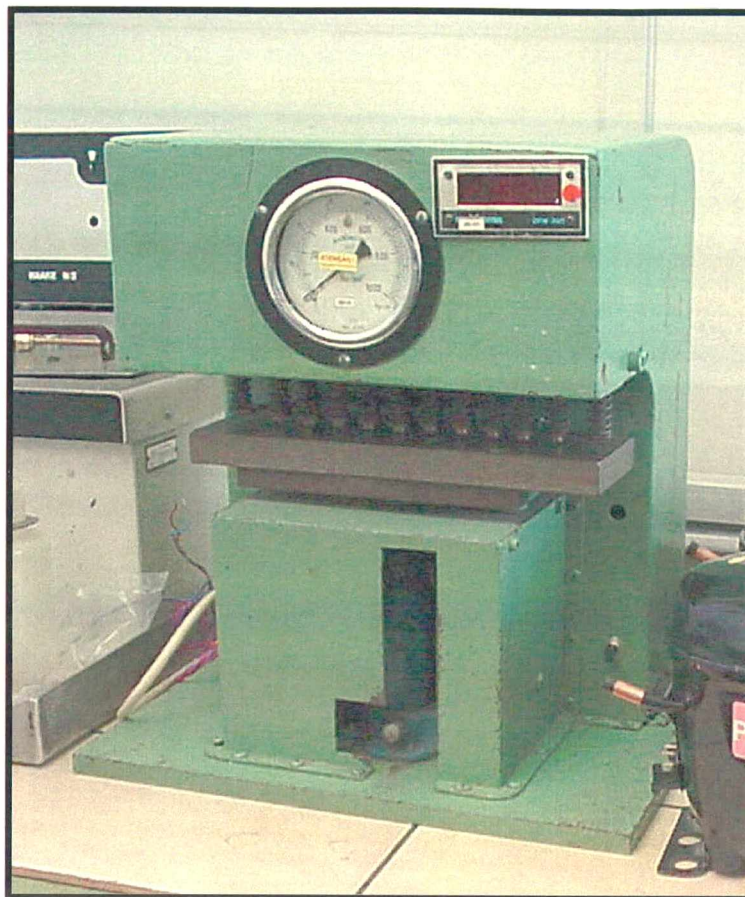


Figura 13 – Equipamento de teste Frankling.

3.6.2 Perdas magnéticas – Epstein

A determinação das perdas magnéticas totais em diversas frequências dos grupos de amostras do experimento foi realizada utilizando-se o Quadro Epstein Yokogawa - Mod.-3265 (2Kg-50/60Hz). Como um conjunto de teste é formado por lâminas longitudinais e transversais, foram realizadas cinco curvas de medição com o objetivo de conhecer melhor o comportamento do material, da seguinte forma:

- Uma curva com lâminas longitudinais a 60Hz.
- Uma curva com lâminas transversais a 60Hz.
- Uma curva com lâminas longitudinais e transversais a 60Hz (valor referência).

- Uma curva com lâminas longitudinais e transversais a 50Hz.
- Uma curva com lâminas longitudinais/ transversais e laminas envelhecidas a 60Hz.

O valor de referência das perdas histeréticas de cada amostra do experimento é representado pela unidade W/Kg na indução de 10 Kgauss (1T) e frequência de 60Hz. O procedimento para execução do ensaio está descrito no Anexo 3.

3.6.3 Envelhecimento

Com objetivo de identificar mudanças nos valores de perdas magnéticas das amostras do experimento, realizou-se um envelhecimento das lâminas do conjunto Epstein tratadas em cada ciclo térmico do experimento. Em um forno tipo mufla, sem controle de atmosfera, as amostras foram aquecidas a 225°C por 25h, sendo resfriadas no próprio forno. Foram submetidas ao ensaio Epstein com o objetivo de quantificar qualquer variação decorrente de um possível envelhecimento.

3.6.4 Resistividade elétrica

A medição da resistividade elétrica das amostras indica se os ciclos térmicos aplicados modificam a capacidade de oposição à passagem de corrente elétrica. Esta propriedade está bastante relacionada com possíveis variações de composição química das amostras decorrente da realização dos tratamentos. As medições são realizadas em um sistema composto por um voltímetro, uma fonte de corrente e terminais de contato, muito semelhante ao equipamento de ensaio Frankling (item 3.8.1). O procedimento empregado para o ensaio encontra-se descrito no Anexo 4.

3.7 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO MATERIAL

3.7.1 Preparação dos corpos de prova

Com o objetivo de caracterizar as variações microestruturais do material após a estampagem e subsequentes ciclos térmicos, foram preparadas amostras em uma bancada metalográfica no laboratório de materiais da Embraco. Dos três grupos de lâminas, conforme especificadas no item 3.1, foram preparadas amostras de material da coroa e da extremidade da ranhura das lâminas de estator (dente). Todas as amostras foram atacadas com Nital 2%.

3.7.2 Microscopia ótica

Foram realizadas análises micrográficas procurando identificar as variações dos diferentes processos de tratamento térmico nas regiões da coroa e do dente da ranhura, tais como: granulometria, deformação da estrutura e espessura da camada de óxido na superfície. A determinação do tamanho de grão ferrítico foi realizada pelo método planimétrico, segundo a norma ASTM E112-96.

Foi utilizado um microscópio ótico da Olympus Mod. Vanox, com aumentos de 100X, 400X e 1000X.

3.7.3 Microscopia eletrônica de varredura

Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Philips Mod. XL`30 com uma microsonda de energia dispersiva de raios-X (EDAX) acoplada ao microscópio, com a qual foi possível avaliar qualitativamente a composição química do material, bem como identificar os

elementos presentes na camada superficial formada durante o processamento do material. A identificação das camadas superficiais de óxidos foi realizada nas amostras como tratadas, ou seja; sem lixamento e polimento.

3.7.4 Difração de raios-X

A difração de raios-X foi realizada na superfície das amostras de cada grupo do experimento, com o objetivo de auxiliar na caracterização da camada superficial das amostras do experimento. As amostras não sofreram nenhuma preparação e utilizou-se o difratômetro Philips X' Pert-MPD da UFSC. No ensaio foi utilizado a radiação $K\alpha$ do Cu monocromador, voltagem de 40 KV e uma intensidade de corrente no tubo de 30 mA.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente são apresentados os resultados referentes à caracterização das amostras em relação ao desempenho elétrico e magnético. Os resultados referentes ao rendimento dos motores fabricados com os estatores de cada grupo de experimento, como já salientado no item 3.5, é o principal teste de validação das alterações sofridas pelas amostras.

Os resultados do desempenho elétrico e magnético do material e a posterior interpretação das análises metalográficas permitiu um entendimento mais específico da influência das variáveis metalúrgicas no rendimento dos motores e nas características da matéria-prima conforme fornecida, para aplicação na fabricação de estatores de alta eficiência.

4.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Os resultados da composição química do material nas três condições do experimento são mostrados na Tabela 6. Estes indicam que houve uma carbonetação das amostras do grupo 2. O teor de carbono das amostras como recebidas (grupo 1 – Sem Tratamento) aumentou de 0,002 para 0,0033% quando submetidas ao ciclo térmico do grupo 2 – Brasimet. Este aumento de teor de carbono no material estudado (aço E185) está associado ao desbalanço estequiométrico entre os diferentes teores de carbono dos aços que formam a carga do forno e o tipo de atmosfera utilizada [Shapiro, 197?]. As características de processamento do atual forno Brasimet influenciaram este resultado basicamente por dois fatores, quais sejam:

- No mesmo equipamento são tratados simultaneamente aços semi processados com maiores níveis de carbono (de até 400 ppm);

- As condições de temperatura e composição do gás são específicas para que ocorra o processo de descarbonetação nos aços semi processados, onde o teor de carbono é reduzido dos níveis de 400 ppm para níveis de 50 ppm [Stephenson, 1990].

Tabela 6 – Composição química das amostras do experimento (% em peso).

Elemento Químico	Valores Especificados	Valores do Fabricante	Grupo 1 Sem Tratamento	Grupo 2 Brasimet	Grupo 3 Mebsa
C	0,0013 – 0,003	0,002	0,002	0,0033	0,002
S	0,008 máx.	0,009	0,001	0,001	0,001
Mn	0,15 máx.	0,14	0,15	0,15	0,15
Si	1,90 – 2,10	2,0	2,06	2,06	2,05
Al	0,15 – 0,35	0,25	0,28	0,27	0,27
N	-	-	0,0035	0,0026	0,0032

4.2 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA E MAGNÉTICA

4.2.1 Avaliação do rendimento dos motores

Na Tabela 7 e na figura 14 são mostrados os valores de rendimento dos motores fabricados com estatores de cada grupo de amostras proposto no experimento.

Tabela 7 – Valores do rendimento dos motores para cada grupo de amostras do experimento.

Número da Amostra	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
	Sem Tratamento $\eta(\%)$	Brasimet $\eta(\%)$	Mebsa $\eta(\%)$
1	84,57	85,97	84,87
2	84,89	86,19	85,13
3	84,89	86,04	85,21
4	84,32	86,16	84,57
5	84,42	85,86	85,27
6	85,14	86,19	85,10
7	84,57	86,10	84,99
8	85,20	86,26	85,15
9	84,71	86,19	85,02
10	84,72	86,14	85,09
Média da Amostra	84,74	86,11	85,04
Especificado	85,90	85,90	85,90
Desvio Padrão (%)	0,29	0,12	0,20
Critério de Validação $\leq 0,5\%$	0,33 Aprovado	0,13 Aprovado	0,23 Aprovado

O melhor rendimento médio dos motores foi obtido com os estatores ao grupo 2 - Brasimet, seguidos pelas amostras do grupo 3 - Mebsa e, com desempenho inferior, os motores com estatores do grupo 1 - Sem Tratamento Térmico. Conforme critério de aprovação do número de amostras de estatores a serem medidos, definido no item 3.1, pode-se verificar pela Tabela 7 que dez motores foram representativos na determinação do rendimento para cada grupo de amostras.

Os resultados mostram que o rendimento foi muito melhor para o grupo 2 - Brasimet, apresentando inclusive um desempenho melhor que o especificado (+0,21% de eficiência). O grupo 1 - Sem Tratamento e o grupo 3 - Mebsa apresentaram valores médios inferiores ao especificado, com eficiência de -1,16% para o grupo 1 e de -0,86% para o grupo 3. Estes resultados comprovam que a prática atualmente adotada em produção (grupo-2), apesar de não ser a ideal e não estar otimizada para este tipo de material, é melhor que a não realização de qualquer tratamento (grupo1). A realização do alívio de tensão em um ciclo térmico como o do grupo 3, mostrou não ser suficiente para atingir o valor especificado.

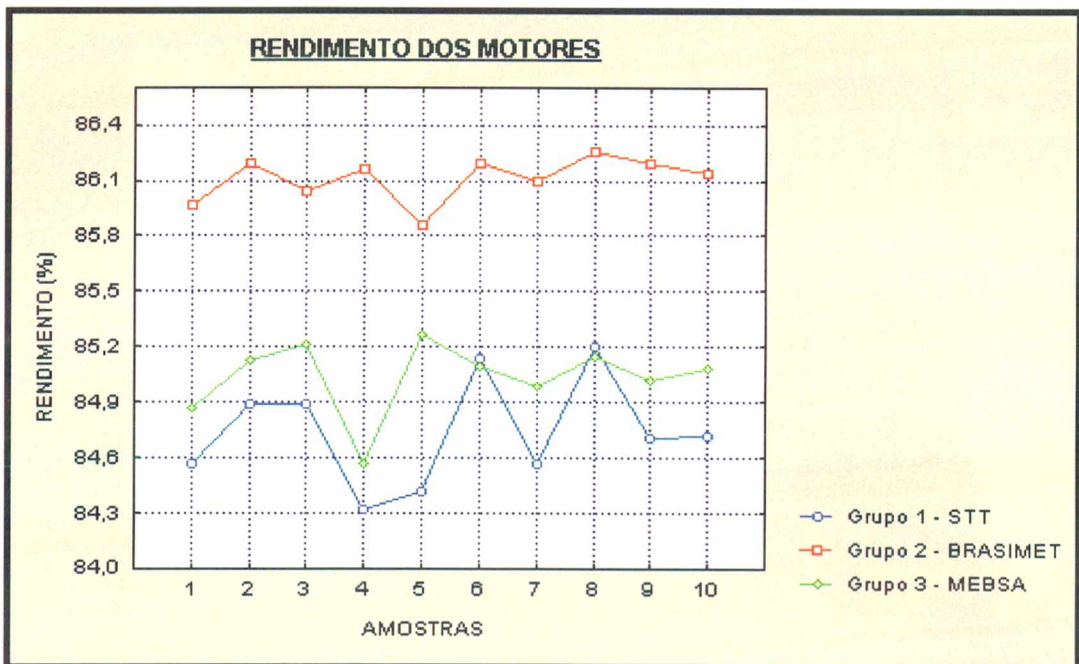


Figura 14– Comparativo dos resultados de rendimento dos motores para cada grupo de amostras.

Observa-se na Figura 14 que as medidas referentes aos grupos 1 e 3 se mantêm defasadas de um valor médio de rendimento de aproximadamente 0,3%. Pode-se concluir que a aplicação de um ciclo térmico conforme o aplicado ao grupo 3 - Mebsa, não se justifica pois pouco traz de ganho ao rendimento do motor se comparado ao uso das lâminas do grupo 1 - Sem Tratamento. Estas variações estão relacionadas com o encruamento ou recristalização na região dos dentes de ranhuras [Werner & Jaffee, 1992] como será visto mais detalhadamente no item 4.3.

Os valores do torque M_k mostrados na Figura 15 representam o torque máximo quando somente a bobina principal está em funcionamento. Esta condição de torque dimensiona o esforço máximo que o motor do compressor deve exercer para vencer os diferenciais máximos de pressão entre a sucção e a descarga (tombamento), quando em operação em um sistema de refrigeração. O valor especificado para este tipo de estator é um torque M_k de 11 Kgf.cm.

Como podem ser observados na Figura 15, os valores médios das amostras estão bastante próximos, visto que o torque é influenciado pela variação da tensão de alimentação, diâmetro de fio, número de espiras e comprimento da bobina [Veinott & Martin, 1986]. A medição do torque M_k nas amostras do experimento foi realizado com o objetivo de verificar se estes parâmetros foram mantidos constantes. Estes resultados indicam que o torque máximo não foi influenciado pelo tratamento térmico do estator.

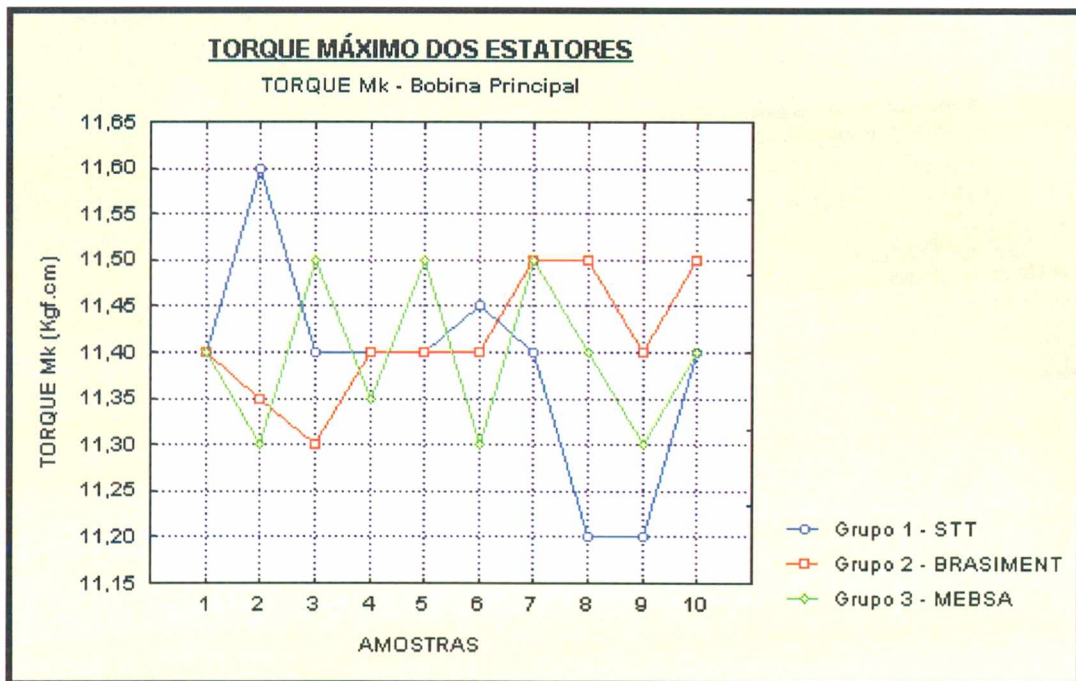


Figura 15 – Resultados do torque máximo (M_k) de cada grupo de amostras.

4.2.2 Avaliação das perdas magnéticas

Inicialmente foram comparados os valores das perdas magnéticas obtidos nas amostras do grupo 1 com os valores informados pelo fornecedor da matéria-prima. A Tabela 8 mostra estes resultados. Estes resultados referem-se ao mesmo material e certificam que os resultados de Epstein estão aceitáveis sob o critério da especificação de recebimento.

Tabela 8 – Comparativo dos valores de perdas entre fornecedor e medições do experimento.

	Perda Magnética Máxima			
	1,0 T		1,5 T	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
Catálogo	1,85	2,34	4,10	5,19
Valor do Fornecedor	1,64 e 1,58	2,08 e 2,02	3,7 e 3,59	4,72 e 4,56
Valor Real Experimento	1,62	2,08	3,58	4,56

O comportamento das perdas magnéticas de cada grupo de amostras do experimento nas condições descritas no item 3.6.2, obtidas através do ensaio de Epstein, pode ser observado nas figuras 16 a 18.

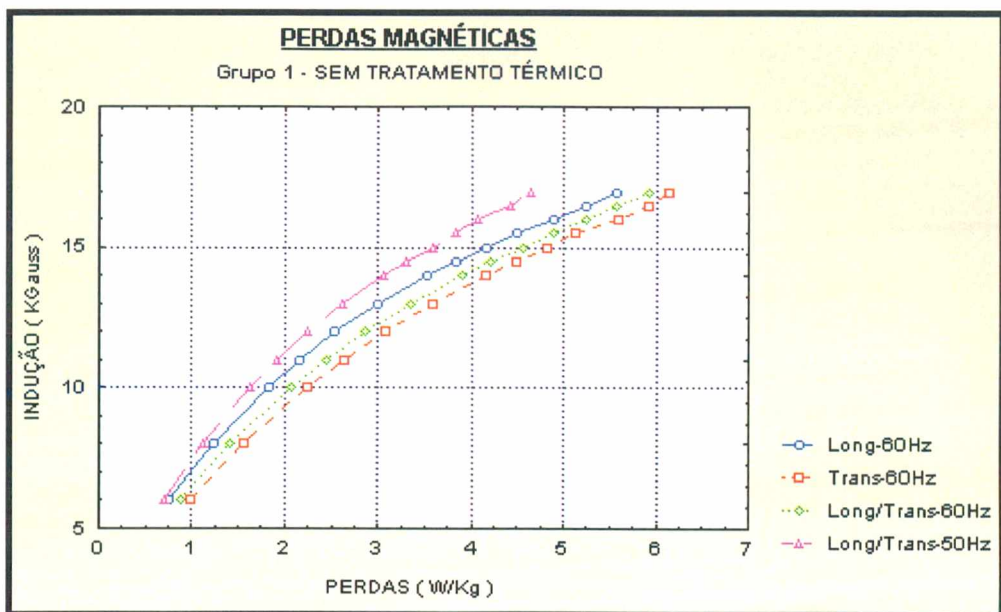


Figura 16 – Perdas magnéticas das amostras do grupo 1 – Sem Tratamento Térmico.

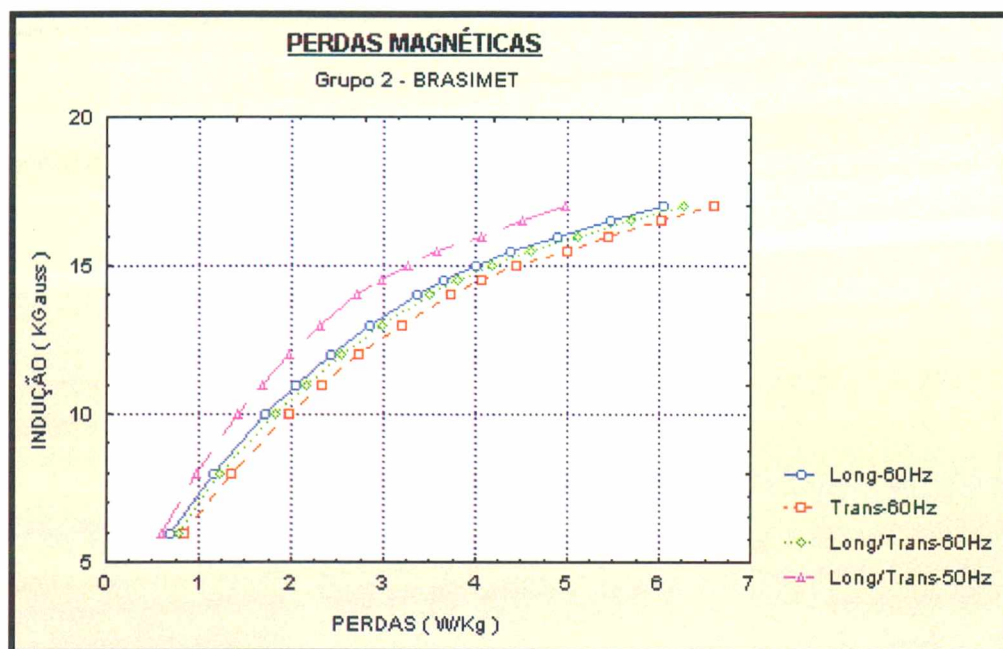


Figura 17 – Perdas magnéticas das amostras do grupo 2 – Forno Brasimet.

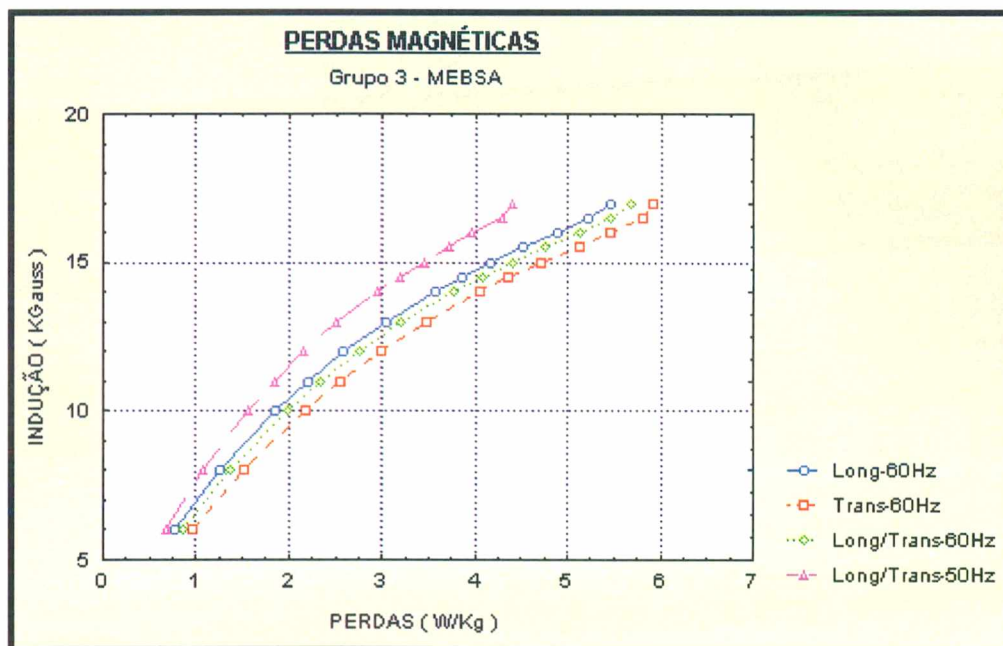


Figura 18 – Perdas magnéticas das amostras do grupo 3 – Forno Mebsa.

Os resultados das perdas magnéticas e os valores de rendimento dos motores conforme apresentados na Figura 14, mostram que há correlação entre perdas magnéticas e o rendimento dos estatores, ou seja, menores perdas no material indicam maior rendimento nos motores.

Tomando como base a curva de perdas determinada com amostras Epstein longitudinais e transversais em 60Hz na indução 10 KGauss, pode-se observar que os resultados médios das amostras do grupo 2 – Brasimet, apresentam uma perda magnética de 1,82 W/Kg, inferior às perdas do grupo 3 - Mebsa, onde os valores ficaram em torno de 1,98 W/Kg. Os piores resultados são apresentados pelas amostras do grupo 1 – Sem Tratamento, com valores de perdas em torno de 2,08 W/Kg. Estes resultados mostram que o ensaio Epstein é um bom indicativo da correlação com o desempenho do rendimento dos motores (Figura 14), apesar de não avaliar o efeito da geometria da lâmina e também as deformações geradas na estampagem.

4.2.3 Análise do envelhecimento

A Figura 19 representa os resultados de perdas magnéticas das amostras Epstein de cada ciclo do experimento após terem sido submetidas a um envelhecimento acelerado (225°C durante 25 horas). Variações de até 5% nos valores das perdas são admissíveis neste ensaio em função das incertezas de medição do equipamento. Observando-se a Figura 19 e os resultados da Tabela 9, verifica-se que as variações das perdas magnéticas em relação às amostras antes e após o envelhecimento não são significativas. Mesmo com o aumento do teor de carbono das amostras do grupo 2 - Brasimet (ver Tabela 8), o incremento de 0,0013% do teor de carbono não foi suficiente para prejudicar os resultados das perdas magnéticas. Note-se também que os valores de perdas para amostras do grupo 2 antes do envelhecimento já eram inferiores aos das amostras envelhecidas dos grupos 1 e 3.

Segundo Emura (1998), as perdas totais e a permeabilidade de amostras de aços elétricos com teores de carbono final próximos a 0,003% são pouco significativas, sendo a correlação com o tamanho de grão um fator mais importante.

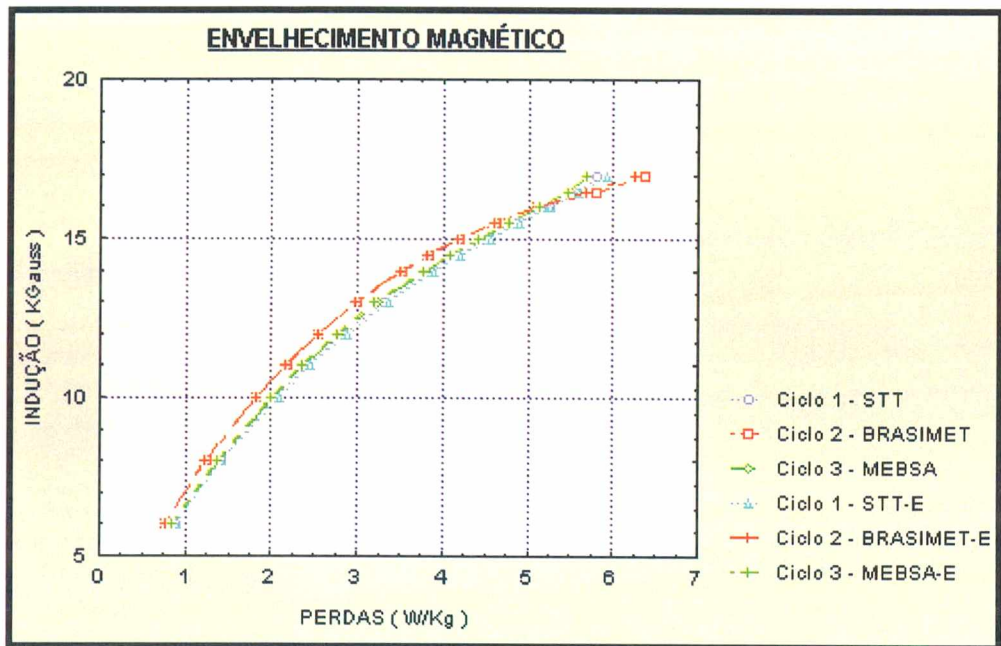


Figura 19 – Comparativo dos resultados de perdas magnéticas antes e após envelhecimento.

Tabela 9 – Comparação dos resultados típicos de perdas magnéticas antes e após aplicação do ciclo de envelhecimento para induções de 1T/60Hz e 1,5T/60Hz.

	Grupo 1			Grupo 2			Grupo 3		
	Sem Tratamento			Brasimet			Mebsa		
	Antes	Após	Δ (%)	Antes	Após	Δ (%)	Antes	Após	Δ (%)
1,0T / 60 Hz	2,08	2,04	-1,92	1,82	1,83	+0,54	1,98	2,01	+1,50
1,5T / 60 Hz	4,56	4,51	-1,09	4,18	4,19	+0,23	4,40	4,44	+0,90

4.2.4 Avaliação da resistência de isolamento

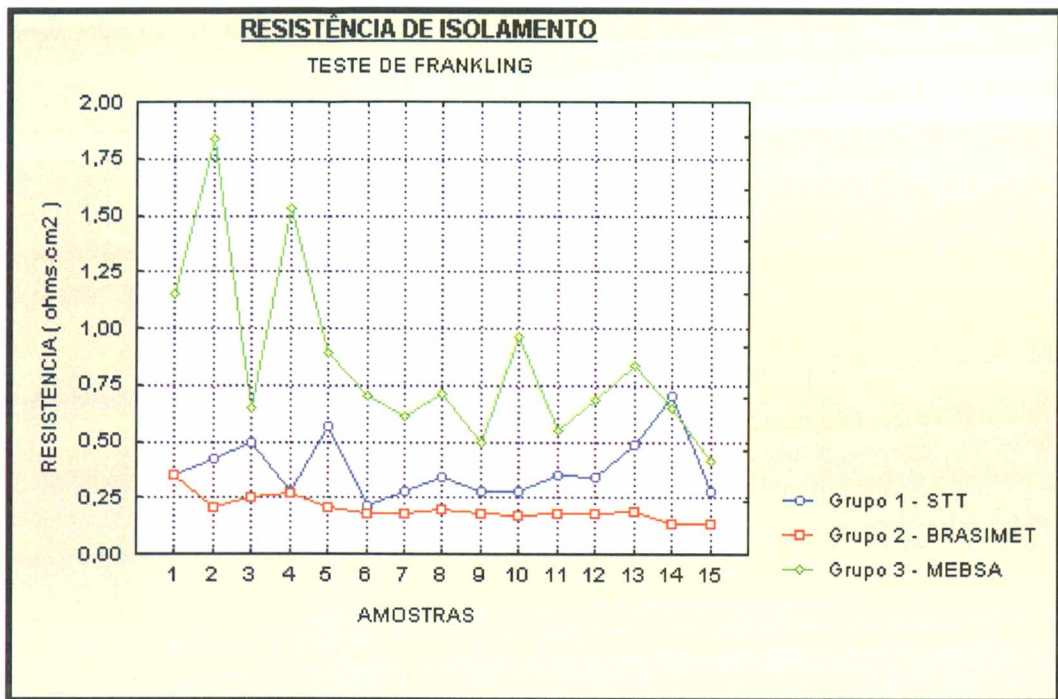


Figura 20 – Comparativo dos resultados do ensaio de Frankling.

Analisando os cinco primeiros resultados da figura 20 (teste 1), pode-se verificar que o melhor isolamento é o obtido no grupo 3 – Mebsa, com média de resistência de isolamento de $1,21 \Omega \cdot \text{cm}^2$, seguido pelas amostras do grupo 1 – Sem Tratamento, com média de resistência de isolamento de $0,42 \Omega \cdot \text{cm}^2$. O pior resultado ficou com as amostras do grupo 2 - Brasimet, com média de resistência de isolamento de $0,26 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

A isolação obtida pelas amostras do grupo 3 – Mebsa melhora sensivelmente em relação à condição da matéria-prima no estado inicial, porém os resultados do grupo 2 – Brasimet ficaram abaixo das expectativas, visto que pioram em relação à condição inicial e piores em relação aos dados históricos de produção. O resultado para o grupo 2 – Brasimet foi inesperado,

comprovando uma deficiência dos parâmetros do processo no ciclo atual.

Como pode-se observar na Figura 20, os resultados das amostras de 6 a 15 (teste 2) mantiveram a mesma correlação, somente havendo mudanças nos valores médios.

Grupo 1 - Sem Tratamento: Resistência de isolamento média de $0,35 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Grupo 2 - Brasimet: Resistência de isolamento média de $0,17 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Grupo 3 – Mebsa: Resistência de isolamento média de $0,66 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Analisando-se os valores reais de temperatura e ponto de orvalho dos ciclos térmicos aplicados às amostras do experimento (item 3.2), pode-se correlacionar que o mau desempenho da resistência de isolamento deve-se aos seguintes aspectos:

- Nas amostras do grupo 2 – Brasimet houve uma variação do ponto de orvalho durante o processo de oxidação em relação a composição da atmosfera, que ficou em torno de 75°C , quando o valor teórico ideal era de um ponto de orvalho de 80°C para temperatura próxima de 540°C [Shapiro, 197?].
- Nas análises das amostras do grupo 3 – Mebsa, verificou-se que o ponto de orvalho da atmosfera utilizada foi de 71°C , com a temperatura variando entre 458 e 477°C . Uma vez que o valor de ponto de orvalho está abaixo do ideal [Shapiro, 197?], é de se inferir que a resistência de isolamento, neste caso, poderia também ter sido superior ao valor obtido.

Pode-se concluir que o controle dos parâmetros de processo como temperatura, tempo e ponto de orvalho na zona de formação do óxido são de extrema importância para redução das correntes parasíticas, necessitando a formação de uma camada de óxido com boas características de isolamento superficiais (Fe_3O_4) de espessura média de $2 \mu\text{m}$ [Stratton & Stanescu, 1999].

4.2.5 Avaliação da resistividade elétrica

A resistividade elétrica é a propriedade associada com a oposição à passagem de corrente elétrica e está intimamente relacionada com alterações da composição química do material, principalmente teores de Si e Al [Werner & Jaffee, 1992].

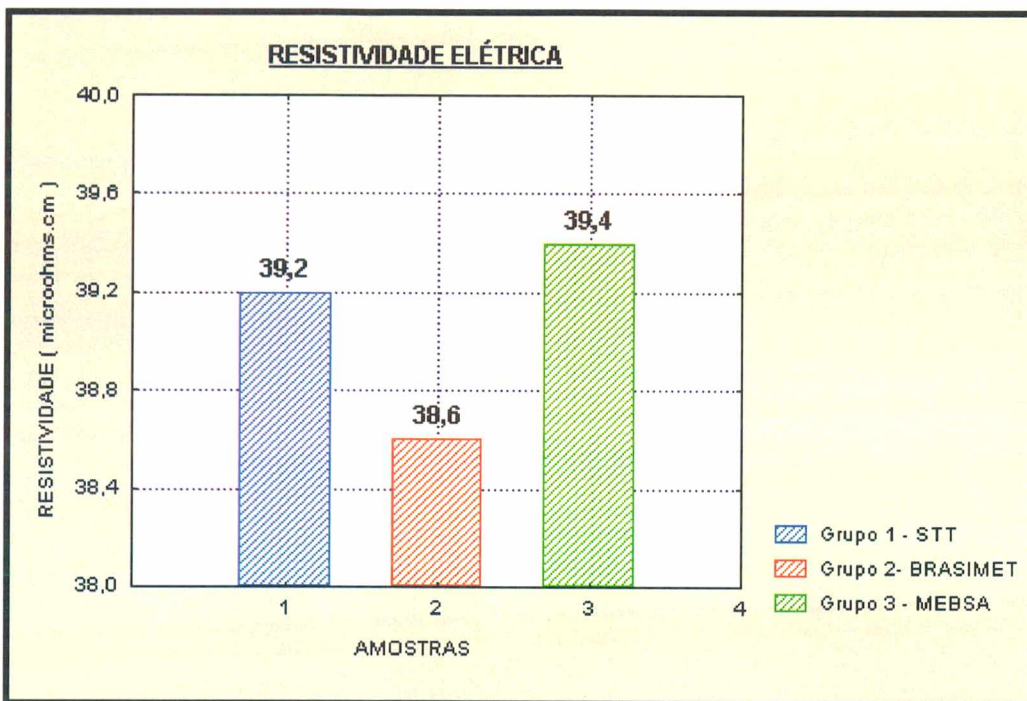


Figura 21 – Comparativo dos resultados do ensaio de resistividade elétrica.

As diferenças nos resultados não são significativas apesar de uma pequena redução para as amostras do grupo 2 – Brasimet (38,6 $\mu\Omega$.cm), conforme pode ser observado na Figura 21. Os demais valores estão bastante próximos, sendo que as amostras do grupo 1 - Sem Tratamento apresentaram um valor médio de 39,2 $\mu\Omega$.cm (1,55% maior que o grupo 2) e as amostras do grupo 3 – Mebsa, um valor médio de 39,4 $\mu\Omega$.cm. (2,07% maior que o grupo 2).

A análise química, item 4.1, mostra que o teor de Si e Al não sofreram alterações durante o processamento térmico do experimento. A possível causa na diferença nos resultados esta relacionada com a variação da resistência das amostras. Nas amostras do grupo 2, a diferença pode estar relacionada com a variação da espessura das amostras, visto que a resistência é diretamente proporcional a espessura. Analisando a equação da resistividade (Anexo 4), verifica-se que uma variação de $\pm 0,020$ mm na espessura das lâminas, representa um incremento de até 2% nos valores de resistividade calculados. Como para efeito de cálculo foi utilizada a espessura média das amostras e não a variação real da espessura, as diferenças encontradas no experimento estão relacionadas com o desvio da espessura e não com as características do material.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

4.3.1 Caracterização das regiões

Na análise metalográfica foram caracterizadas as regiões da lâmina do estator conhecidas por “dente” e “coroa”. Estas regiões, durante o processo de indução do estator possuem densidades de fluxo magnéticos distintos, conforme mostrado na Figura 22.

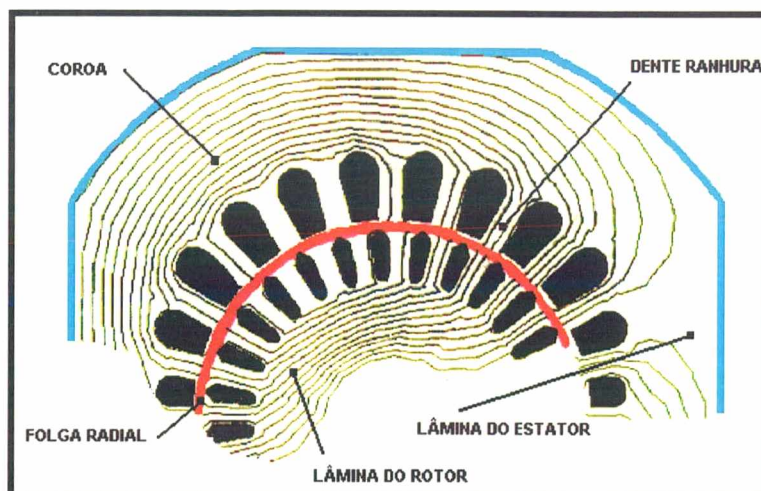


Figura 22 – Representação do fluxo magnético entre lâminas do estator e do rotor.

Utilizando-se de um microscópio ótico, foram analisadas as lâminas dos três grupos de amostras do experimento, segundo a seqüência de fotografias abaixo:

- Conjunto da lâmina na região do dente e na região da coroa – ampliação de 100X;
- Detalhe da região do dente na parte superior e inferior – ampliação de 400X;
- Detalhe da região da coroa – ampliação de 400X;

A microscopia eletrônica permitiu análises complementares e suplementares.

4.3.2 Caracterização das amostras do grupo 1 – Sem Tratamento

As Figuras 23 e 24 mostram as regiões do dente e da coroa das amostras do grupo 1 – Sem Tratamento. Verifica-se a existência de uma camada deformada na região do dente da ranhura proveniente da estampagem. A região da coroa não apresenta deformação e notam-se grãos de tamanho uniforme e equiaxiais com tamanho médio de 3,5 a 4,0 ASTM. Na região do dente o tamanho médio do grão variou de 3,0 a 3,5 ASTM. Com a ampliação de 100X não se percebe a camada de revestimento à base de fosfato (C4) na superfície do material.

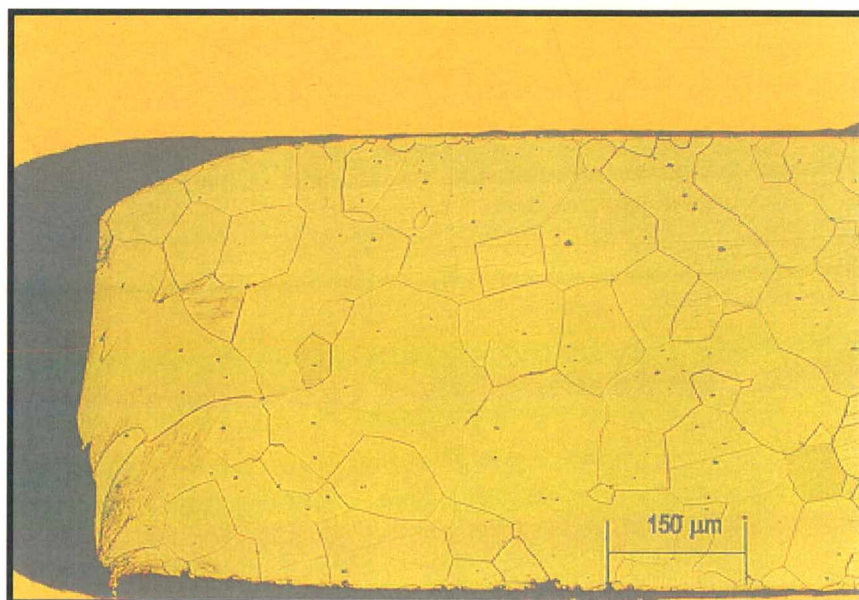


Figura 23 – Microestrutura da região do dente da ranhura
Grupo 1 - Sem Tratamento Térmico – Ataque Nital 2%

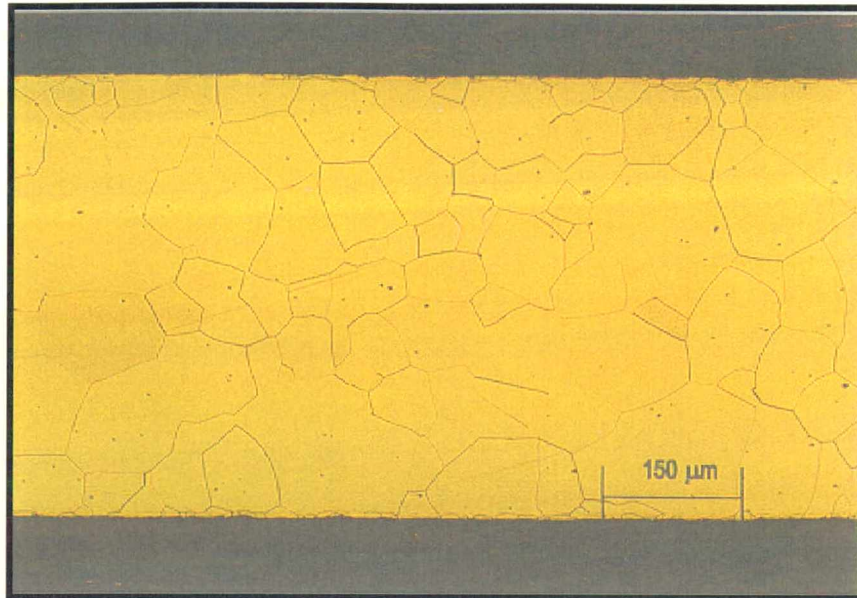


Figura 24 – Microestrutura da região da coroa
Grupo 1 - Sem Tratamento Térmico – Ataque Nital 2%

As Figuras 25 e 26 das amostras do grupo 1 – Sem Tratamento mostram a vista superior e inferior do dente da ranhura. Observam-se as linhas de deformação no interior do grão provenientes da estampagem da lâmina. Estas linhas de deformação se estendem da região puncionada até aproximadamente 0,1mm no interior do material. Segundo Takanohashi et al (1998), estas linhas de deformação também são conhecidas por bandas de deformação, bandas de transição ou bandas matriz.

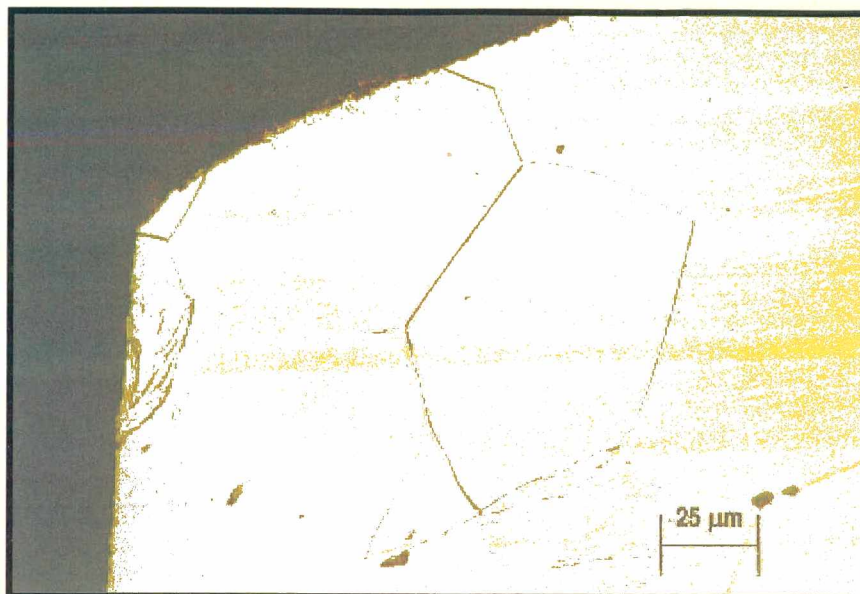


Figura 25 – Microestrutura da região do dente – parte superior
Grupo 1 - Sem tratamento – Ataque Nital 2%

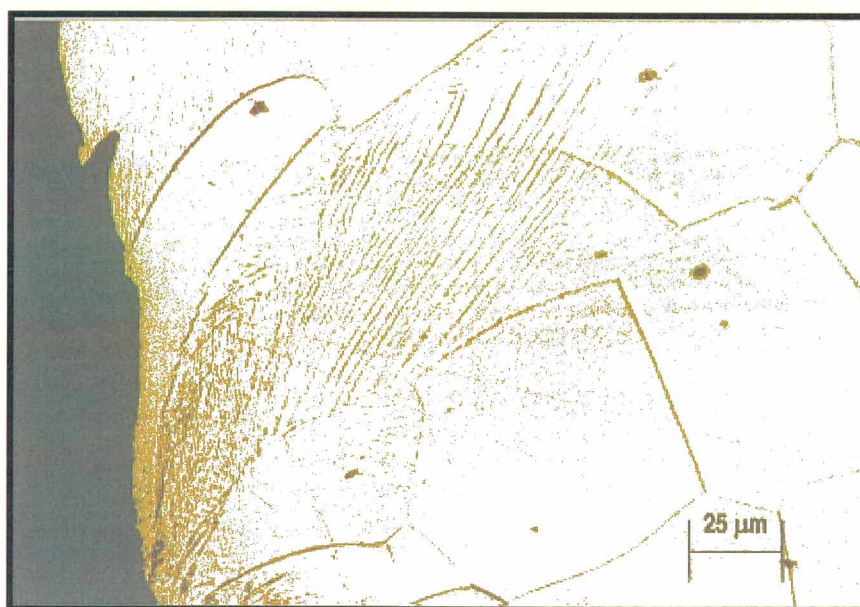


Figura 26 – Microestrutura da região do dente – parte inferior
Grupo 1 - Sem tratamento – Ataque Nital 2%

A camada superficial de revestimento à base de fosfato (C4), que a princípio deveria estar depositada sobre o material, mesmo com maiores aumentos (400X) não foi observada ao longo da superfície analisada. O revestimento foi observado apenas em regiões isoladas com espessura de camada fina e não uniforme em sua extensão, conforme representado na Figura 27.

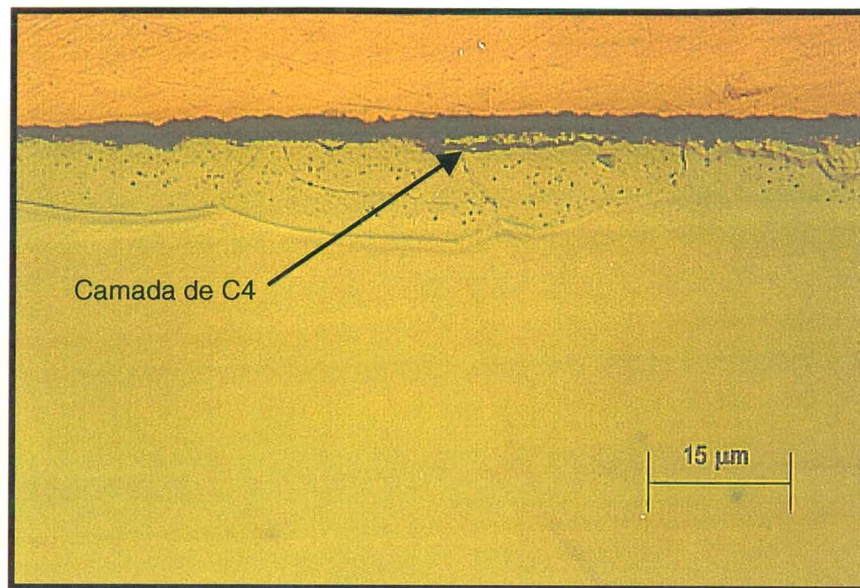


Figura 27 – Microestrutura da superfície na região do dente
Grupo 1 - Sem Tratamento – Ataque Nital 2%

4.3.3 Caracterização das amostras do grupo 2 – Brasimet

Na região do dente da ranhura (Figura 28) da amostra do grupo 2 – Brasimet, observa-se que ocorreu o processo de recristalização com o surgimento de novos grãos na região periférica. Estes grãos recristalizados têm tamanho menor do que os do resto da amostra que não sofreu recristalização em função da própria cinética de processo de recristalização e do grau de deformação resultante da estampagem [Padilha, 1995].

Na região da coroa os grãos não se alteram em relação à amostra sem tratamento térmico (Figura 29). Com a ampliação utilizada, observa-se a formação de uma camada de óxido sobre a superfície do material. O tamanho médio dos grãos na região do dente ficou entre 3,5 e 4,0 ASTM devido a medida englobar as regiões encruada e sem encruamento. Na região da coroa o tamanho médio apresenta-se em 3,5 ASTM.

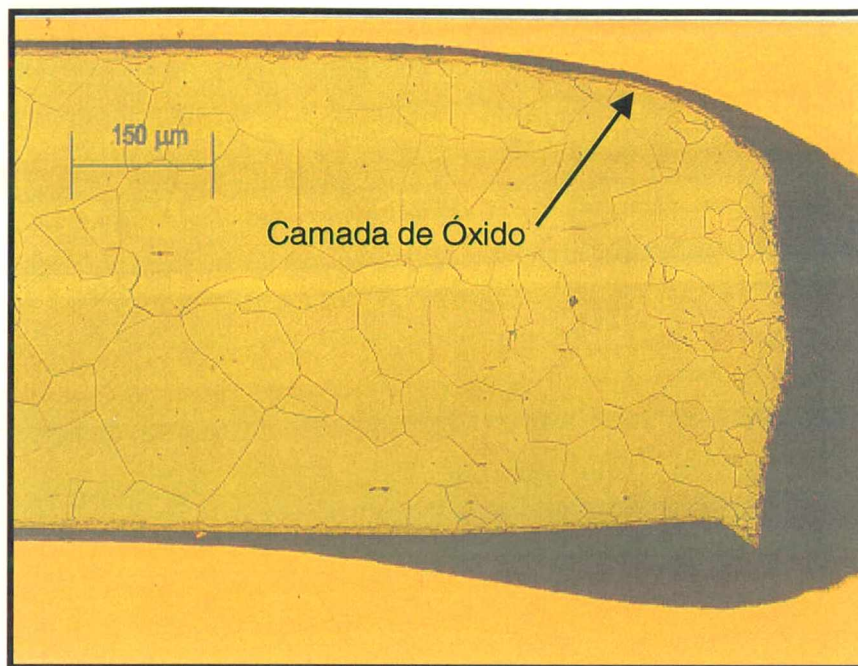


Figura 28 – Microestrutura da região do dente da ranhura
Grupo 2 - Brasimet – Ataque Nital 2%



Figura 29 – Microestrutura da região da coroa
Grupo 2 - Brasimet – Ataque Nital 2%

As Figuras 30 e 31 das amostras do ciclo 2 – Brasimet mostram a vista superior e inferior do dente da ranhura. Na região puncionada notam-se nitidamente os novos grãos formados durante o processo de recristalização. Observa-se além da região recristalizada, o aumento da espessura da camada de óxido com o aspecto uniforme ao longo de toda a espessura da lâmina. Observa-se também na Figura 32 uma fina camada de óxido interna, indicação de oxidação sub-superficial. Esta reação ocorre quando um componente da atmosfera do tratamento difunde-se para o interior do material e reage com átomos do soluto precipitando a segunda fase do composto abaixo da superfície do material [Geiger, 1979]. A morfologia e a espessura desta camada são geralmente dependes da concentração do soluto, potencial de oxigênio, atmosfera do forno, tempo e temperatura de tratamento [Lyudkovsky et al, 1982].

Esta oxidação freqüentemente ocorre em aços elétricos que são tratados em atmosferas de elevado potencial de oxigênio e tempo excessivamente longos, resultando na degradação das propriedades magnéticas [Lyudkovsky et al, 1982]. Este seu efeito foi confirmado pelos menores valores de resistência ao isolamento das amostras do ciclo 2 - Brasimet (Figura 20).

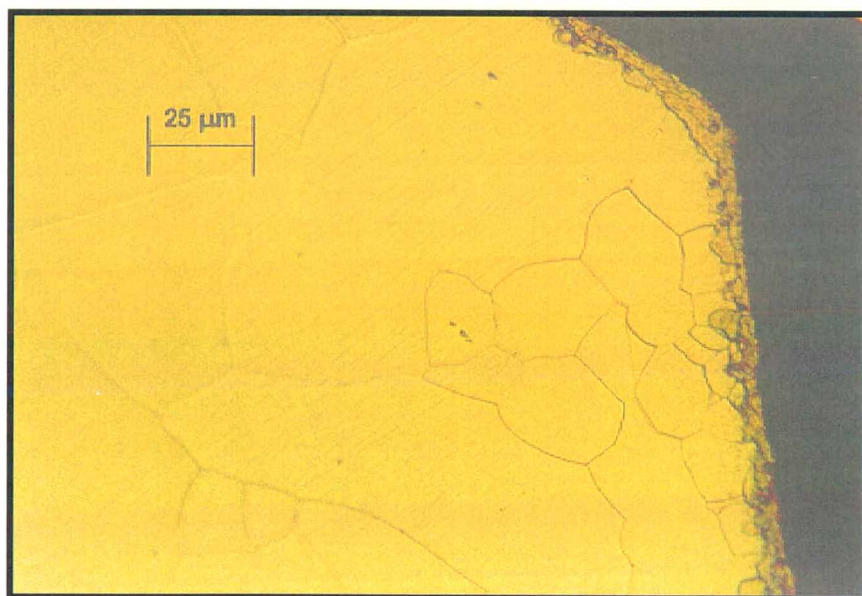


Figura 30 – Microestrutura da região do dente – parte superior
Grupo 2 - Brasimet – Ataque Nital 2%



Figura 31 – Microestrutura da região do dente – parte inferior
Grupo 2 - Brasimet – Ataque Nital 2%

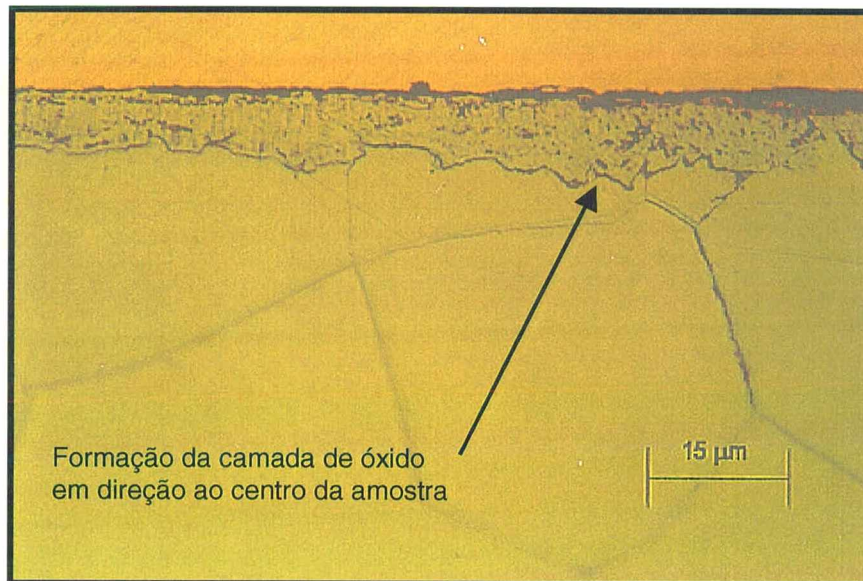


Figura 32 – Microestrutura da superfície na região do dente
Grupo 2 - Brasimet – Ataque Nital 2%

4.3.4 Caracterização das amostras do grupo 3 – Mebsa

As Figuras 33 e 34 mostram as regiões do dente e da coroa das amostras do grupo 3 – Mebsa. Na região do dente da ranhura nota-se a existência de grãos deformados semelhantemente à microestrutura do material sem tratamento. A permanência da deformação na microestrutura, apesar do material ter sido tratado em uma temperatura próxima aos 480°C, indica que esta temperatura não foi suficiente para iniciar o processo de recristalização, ocorrendo possivelmente recuperação. A recuperação acarreta a restauração parcial das propriedades do material e considerável redução da energia interna, sem contudo ocorrerem modificações visíveis ao microscópio óptico [Padilha, 1995].

Na região da coroa a microestrutura mais uma vez não se alterou, permanecendo com as mesmas características das amostras sem tratamento. O tamanho médio dos grãos na região da coroa ficou entre 3,5 e 4,0 ASTM, enquanto que na região do dente a média variou entre 3,0 e 3,5 ASTM.



Figura 33 – Microestrutura da região do dente da ranhura
Grupo 3 - Mebsa – Ataque Nital 2%

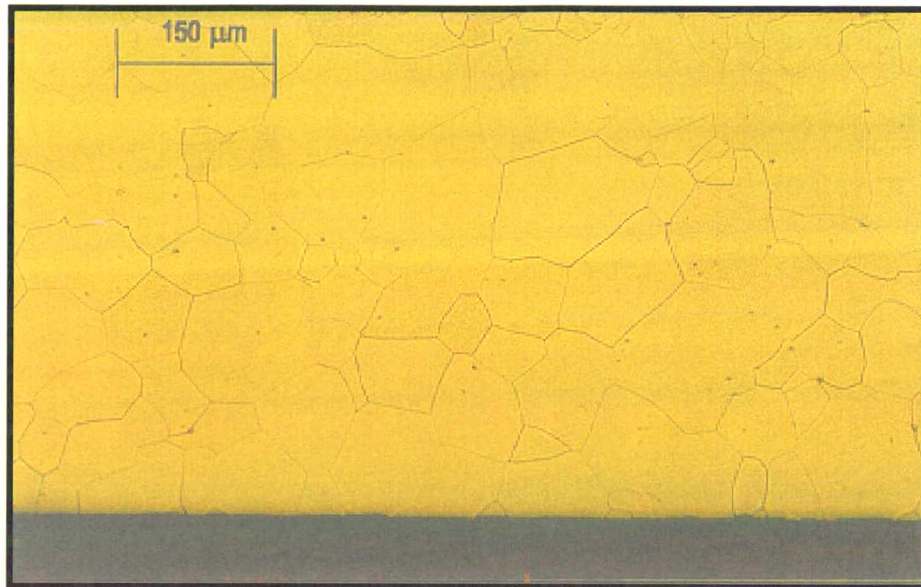


Figura 34 – Microestrutura da região da coroa
Grupo 3 - Mebsa – Ataque Nital 2%

O mesmo comportamento em relação às linhas de deformação na região estampada foi observado nas Figuras 35 e 36, referentes às amostras tratadas no grupo 3 – Mebsa.

Com maior ampliação, a Figura 37 mostra a existência de uma camada superficial de óxido resultante do processo de ferroxidação. Esta camada se mostra bastante uniforme ao longo do material, inclusive sobre a região puncionada como era esperado. Correlacionando-se aos resultados da camada de óxido obtida das amostras do forno Brasimet (Figuras 30 a 31), nota-se que é de menor espessura nas amostras Mebsa e não apresenta a oxidação sub superficial [Lyudkovsky et al, 1982]. Como visto nos resultados de resistência de isolamento (item 4.2.4), esta camada apresentou o melhor resultado dentre as amostras do experimento.

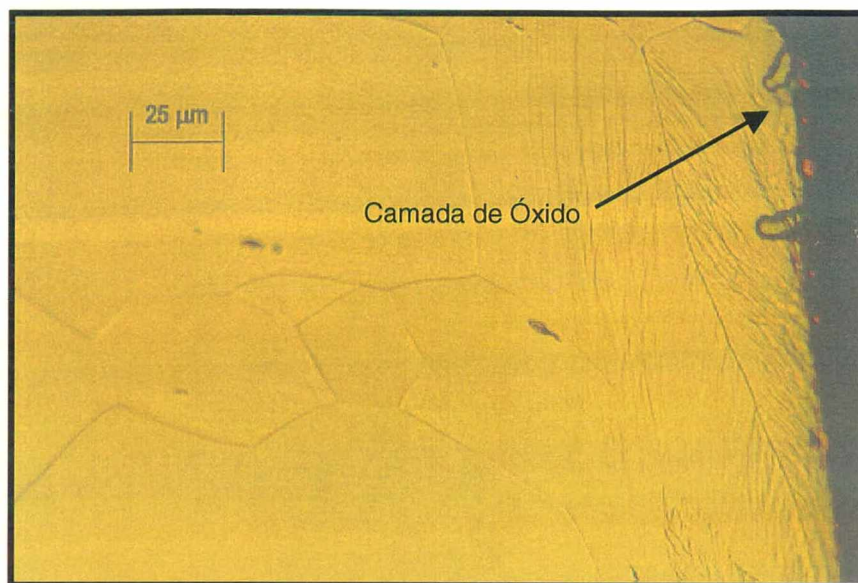


Figura 35 – Microestrutura da região do dente – parte superior
Grupo 3 - Mebsa – Ataque Nital 2%

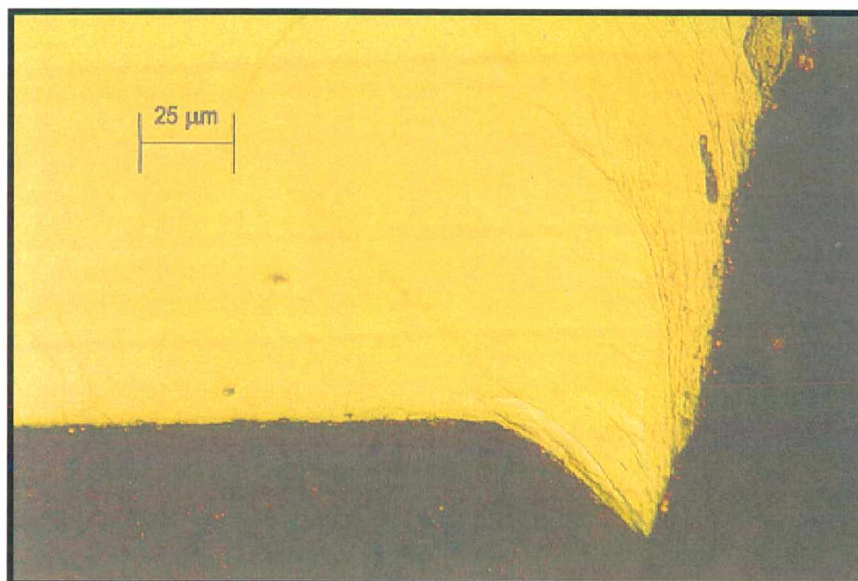


Figura 36 – Microestrutura da região do dente – parte inferior
Grupo 3 - Mebsa – Ataque Nital 2%

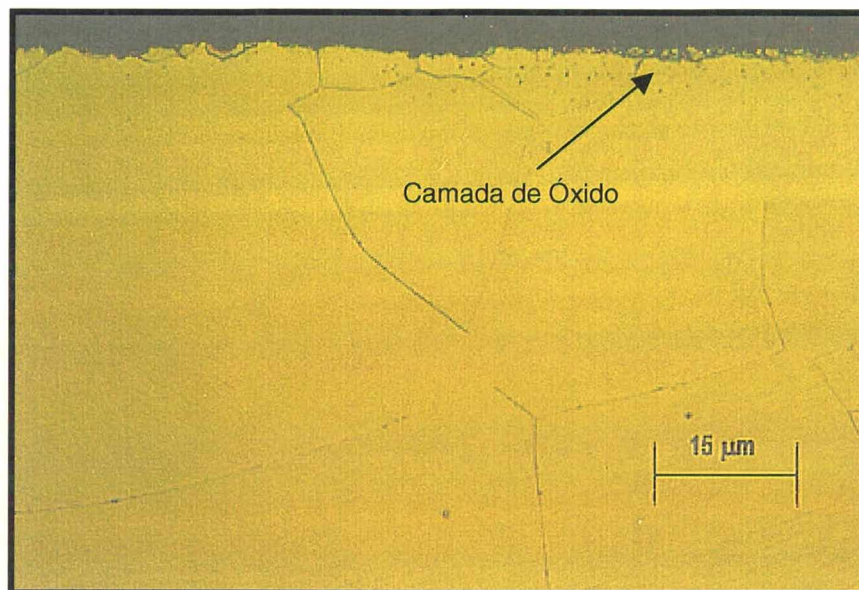


Figura 37 – Microestrutura da região da superfície na coroa Grupo 3 - Mebsa – Ataque Nital 2%

4.3.5 Caracterização do grão nas regiões da coroa e do dente de ranhura

A comparação entre as Figuras 38, 39 e 40 das amostras de cada grupo do experimento na região da coroa da lâmina, observam-se as mesmas características de microestrutura. A diferença entre as amostras está na camada de óxido na região superficial.

Conforme mostrado anteriormente nas análises da microestrutura com as diversas ampliações utilizadas (100X, 400X e 1000X), verifica-se que não houve variação significativa na microestrutura na região da coroa das amostras do experimento.

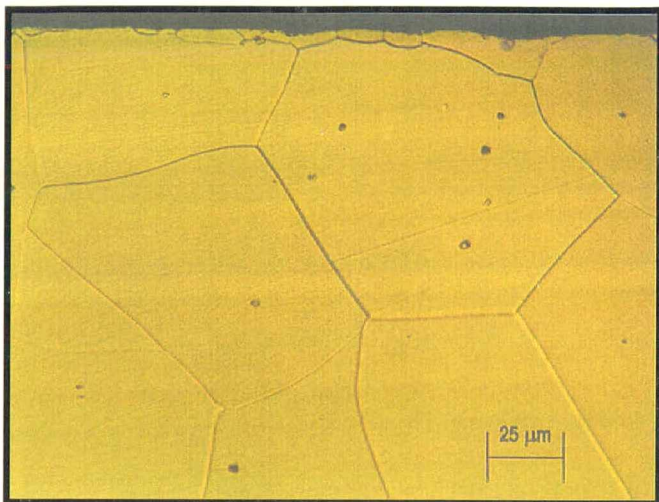


Figura 38
Microestrutura da região da coroa
Grupo 1 - Sem Tratamento
Ataque Nital 2%

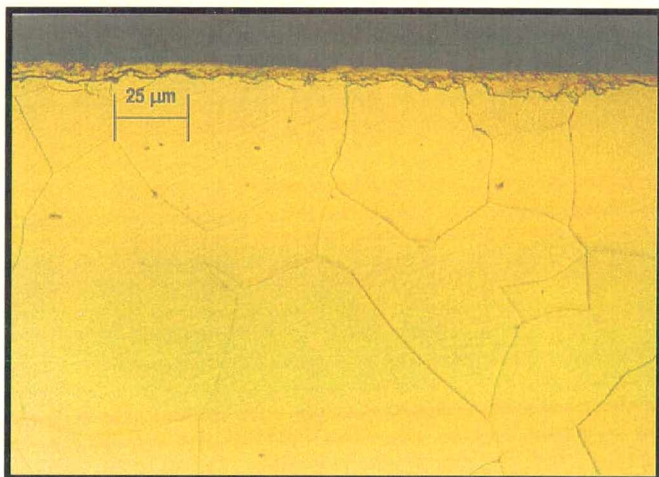


Figura 39
Microestrutura da região da coroa
Grupo 2 - Brasimet
Ataque Nital 2%

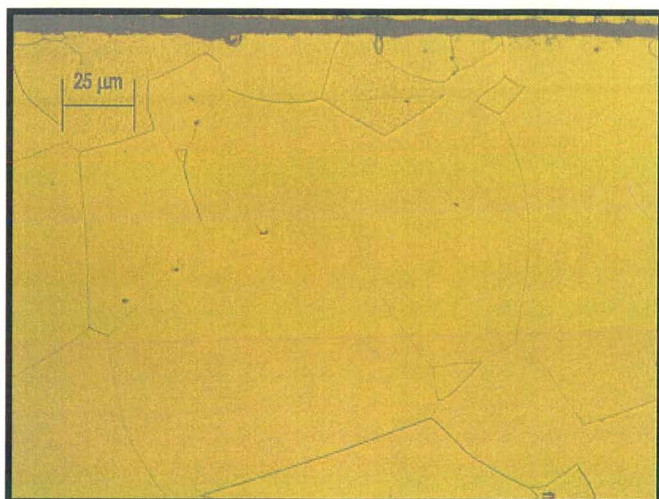


Figura 40
Microestrutura da região da coroa
Grupo 3 - Mebsa
Ataque Nital 2%

Com relação ao tipo de estrutura cristalina formada na região do dente da ranhura em cada amostra do experimento, podem-se verificar os seguintes aspectos:

Nas amostras do grupo 1 – Sem Tratamento (Figura 41) observa-se a ocorrência de uma grande deformação plástica. A permanência desta deformação nas lâminas durante a fabricação dos motores influi diretamente no desempenho do rendimento dos motores, conforme mostrado na Figura 14. O mau desempenho dos motores está basicamente relacionado à dificuldade de passagem do fluxo magnético quando encontra este tipo de estrutura cristalina, pois contém um nível elevado de discordâncias, que dificulta o processo de magnetização do material [Werner et al, 1992].

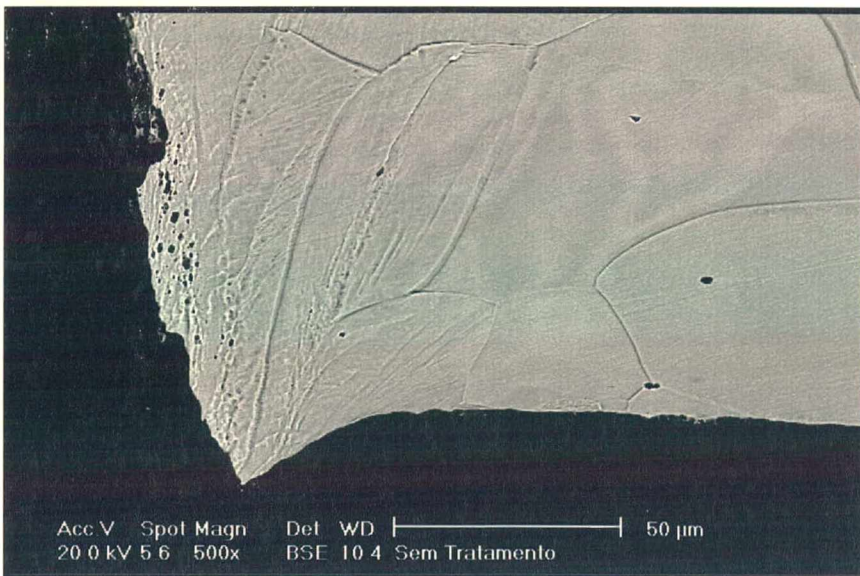


Figura 41
Microestrutura da região do
dente de ranhura
Grupo 1 – Sem Tratamento

Nas amostras do grupo 2 – Brasimet (Figura 42), observa-se que o ciclo térmico aplicado promoveu a recristalização da microestrutura, formando novos grãos com menores níveis de tensões internas e densidade de discordâncias. A modificação da estrutura cristalina é indicativo de que ocorreu o processo de recristalização e conseqüentemente melhoria do desempenho dos motores.

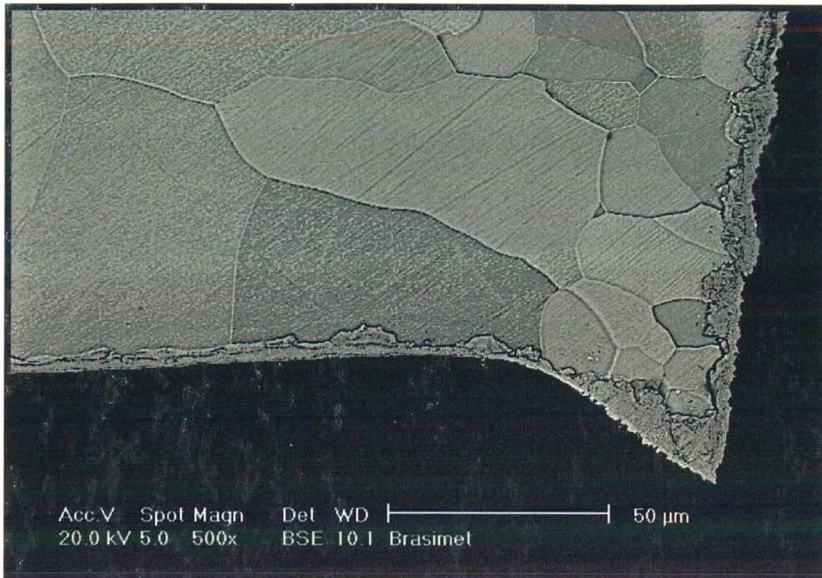


Figura 42
Microestrutura da região do
dente de ranhura
Grupo 2 - Brasimet

Nas amostras do grupo 3 – Mebsa (Figura 43), não se observam modificações na microestrutura, em função da temperatura de tratamento ser baixa para a formação de novos grãos. Conforme observado durante o processamento térmico, a temperatura média deste ciclo ficou em torno de 460 a 480°C, indicativo de que ocorreu somente a recuperação. A ocorrência do processo de recuperação na região do dente da ranhura fica constatada pela análise metalográfica. Com relação aos resultados do rendimento dos motores, mostravam um rendimento médio superior ao das amostras do grupo 1 – Sem Tratamento (ver Figura 14).

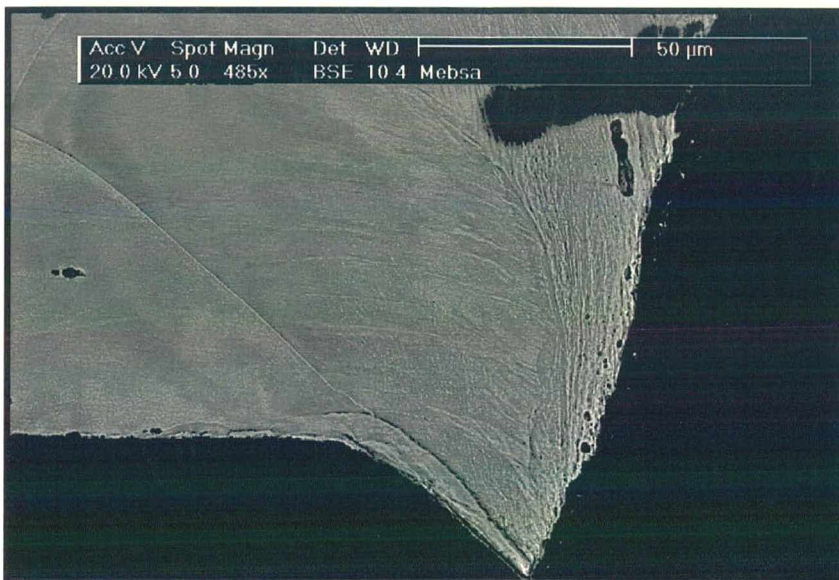


Figura 43
Microestrutura da região do
dente de ranhura
Grupo 3 - Mebsa

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO SUPERFICIAL

Utilizando-se uma microsonda de energia dispersiva de raios-X acoplada ao microscópio eletrônico de varredura pôde-se avaliar a composição química qualitativa da camada de óxido das amostras.

Com a intenção de melhor identificar as diferenças, analisou-se a camada de óxido superficial e transversalmente.

4.4.1 Caracterização em corte transversal

A Figura 44 representa de forma genérica o perfil de concentração dos elementos encontrados nas análises de dispersão de raios-X realizadas nos três grupos do experimento em região transversal da coroa.

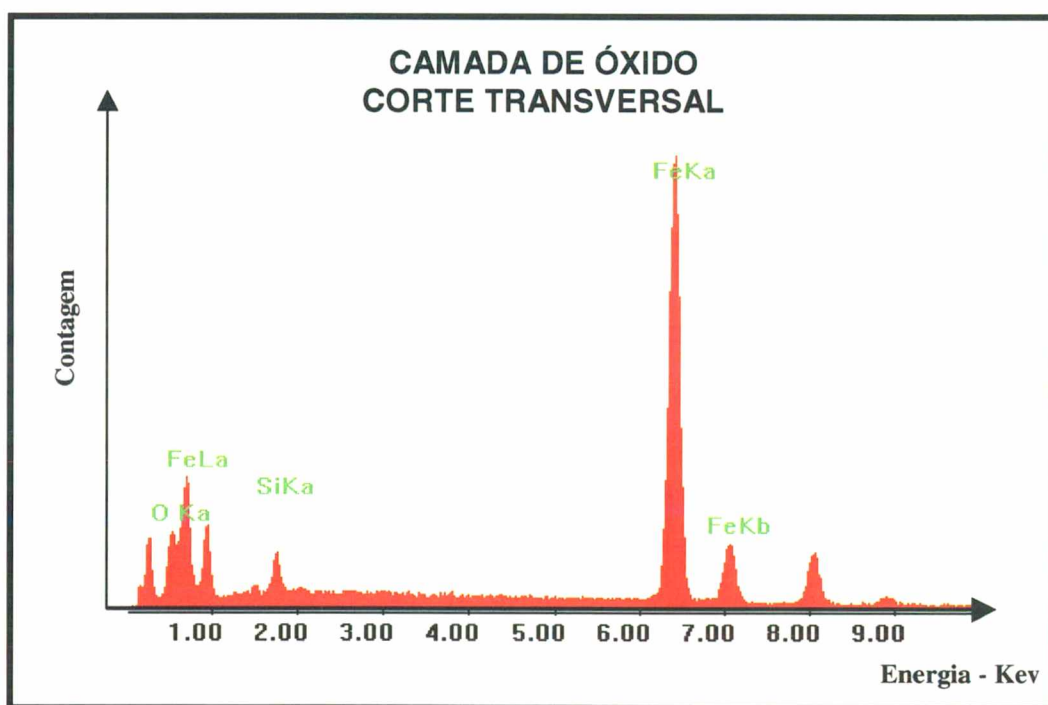


Figura 44 - Espectro de concentração representativo da camada de óxido na região da espessura para todas as amostras do experimento.

Na Tabela 10, pode-se identificar a variação dos elementos químicos encontrados nas regiões analisadas.

Observa-se que na amostra do grupo 3 – Mebsa ocorreu um incremento sensível dos valores de oxigênio. Este incremento é justificado pela formação de uma camada de óxido durante o processamento de recozimento que melhora as características de isolamento superficial, conforme mostrado no comparativo de resistência de isolamento (ver item 4.24) apesar de não ter apresentado o melhor rendimento na avaliação dos motores (ver Figura 14).

O recozimento contínuo em atmosfera oxidante, resulta na formação de uma camada superficial de SiO_2 e principalmente Al_2O_3 protegendo contra a difusão do O e N. Este tipo de atmosfera causa danos as propriedades e se pronuncia em lâminas de motores com espessuras acima de 0,35mm (Bölling & Günter, 1988).

Tabela 10 – Comparativo da composição química obtida através de energia dispersiva de raios-X para a região da espessura das amostras do experimento.

Elemento Químico	Grupo 1 Sem Tratamento (% peso)	Grupo 2 Brasimet (% peso)	Grupo 3 Mebsa (% peso)
O	2,14	4,30	10,89
Si	0,88	2,49	3,13
Fe	96,97	93,21	85,97

Observa-se nas Figuras 45 a 47 que a camada de óxido formada durante o processamento térmico apresenta-se com espessura bastante distinta em cada uma das amostras do experimento. Os valores medidos da camada de óxido apresentaram os seguintes resultados:

Amostras do grupo 1 – Sem Tratamento (Figura 45) apresentaram camada de óxido com média de 1,96 μm de espessura. A camada apresenta-se não uniforme em sua extensão.

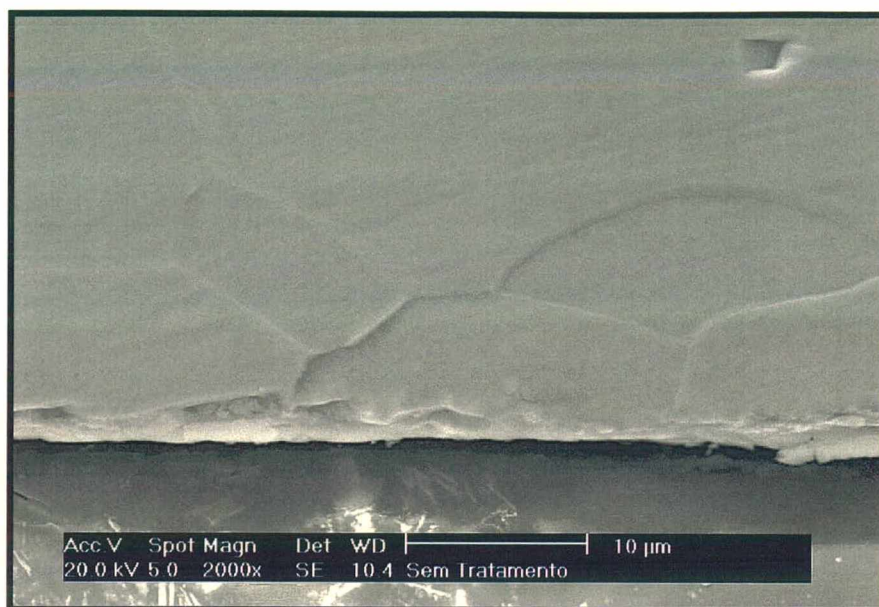


Figura 45 – Microestrutura da região da coroa - grupo 1 – STT

Amostras do grupo 2 – Brasimet (Figura 46): camada de óxido com espessura média de 6,0 μm . A camada apresenta-se uniforme ao longo de toda a extensão do material. Apesar de apresentar uma espessura maior se comparada às outras amostras do experimento, não apresentou boas características de isolamento superficiais conforme já mencionado (item 4.3.3).



Figura 46 – Microestrutura da região da coroa - grupo 2 - Brasimet

Amostra do grupo 3 – Mebsa (Figura 47): camada de óxido com espessura média de 3,0 μm . A camada apresenta-se com uniformidade regular ao longo da extensão do material.



Figura 47 – Microestrutura da região da coroa - grupo 3 - Mebsa

4.4.2 Caracterização superficial

Da mesma forma que na região transversal, executou-se medidas em regiões de pequenas áreas da superfície de cada grupo das amostras do experimento com o objetivo de identificar possíveis diferenças entre as amostras. As diferenças de percentagem encontradas nas amostras são sistemáticas e podemos confirmar que os resultados encontrados são significativos.

Observando-se as Figuras 48 a 56, notou-se que a camada de isolamento superficial apresentava duas fases bastante distintas: uma clara e outra escura. As figuras a seguir mostram com detalhes a morfologia de cada fase observada de acordo com o grupo do experimento realizado.

➤ Detalhes da superfície da amostra – grupo 1 - Sem Tratamento

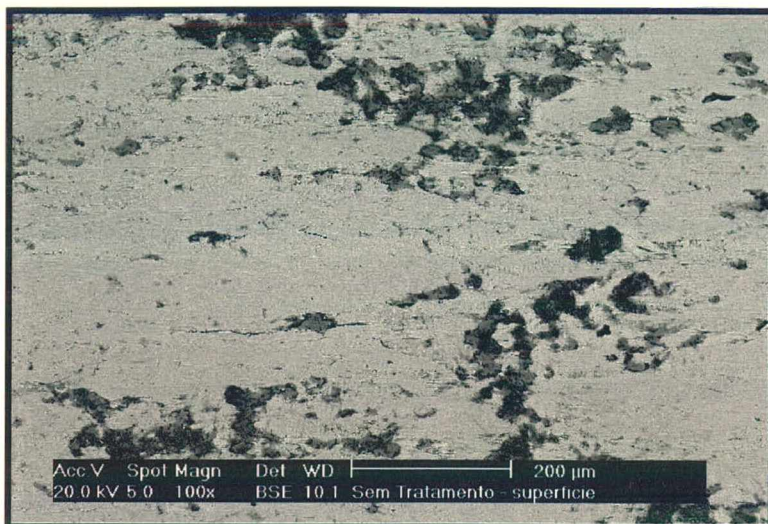


Figura 48
Microestrutura da região da superfície da amostra Grupo 1 – Sem Tratamento

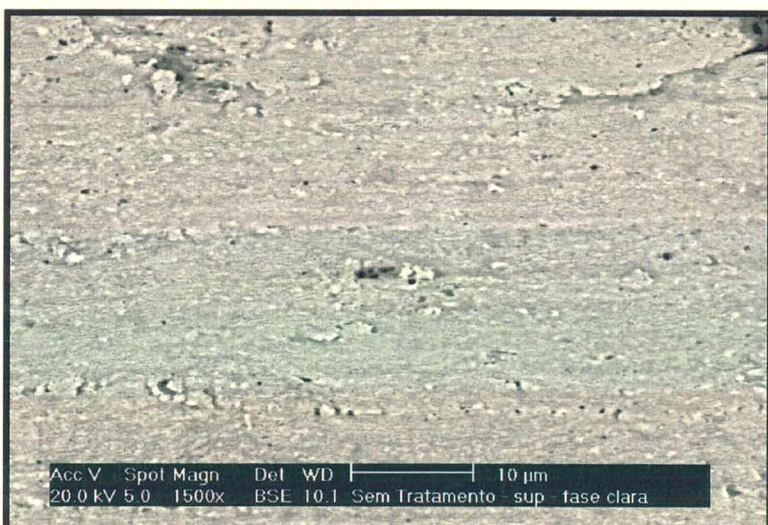


Figura 49
Microestrutura da região da superfície – fase clara Grupo 1 – Sem Tratamento

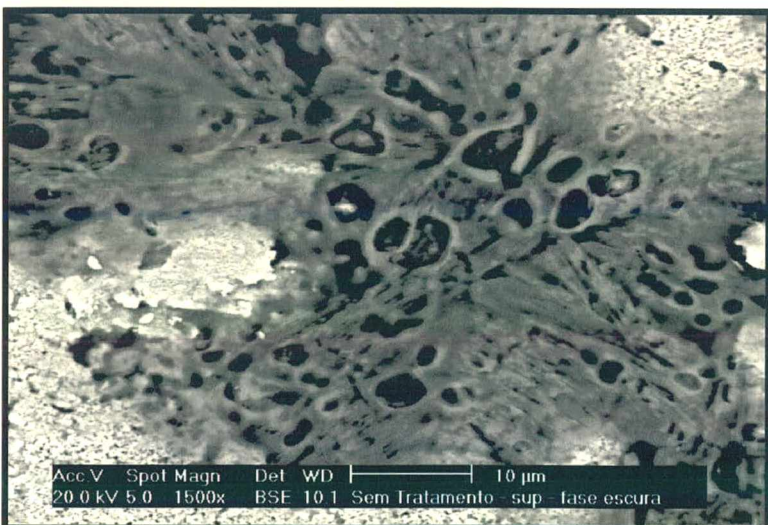


Figura 50
Microestrutura da região da superfície – fase escura Grupo 1 – Sem Tratamento

➤ Detalhes da superfície da amostra – grupo 2 - Brasimet

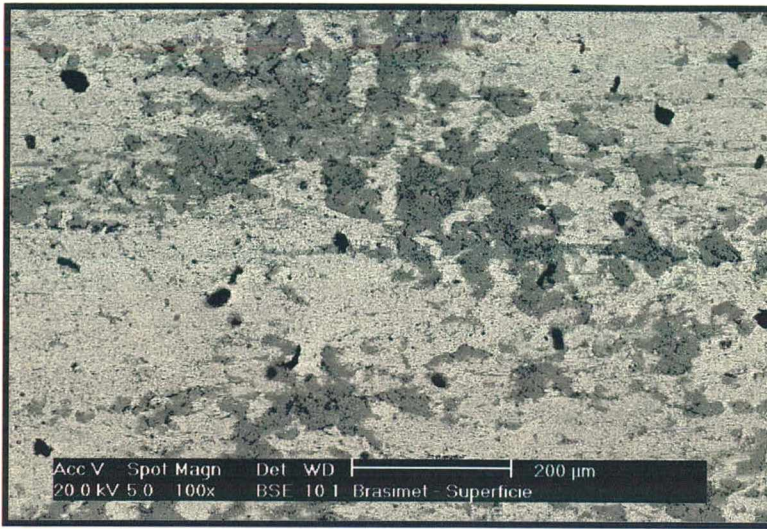


Figura 51
Microestrutura da região
da superfície da amostra
Grupo 2 - Brasimet

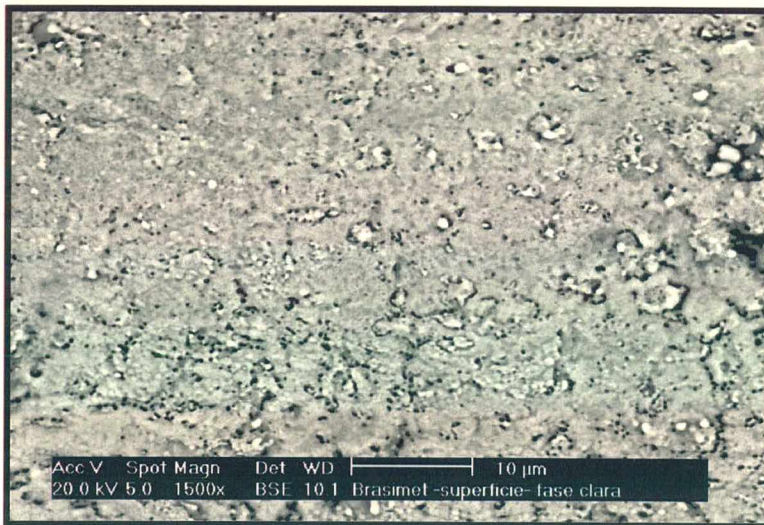


Figura 52
Microestrutura da região
da superfície – fase clara
Grupo 2 - Brasimet

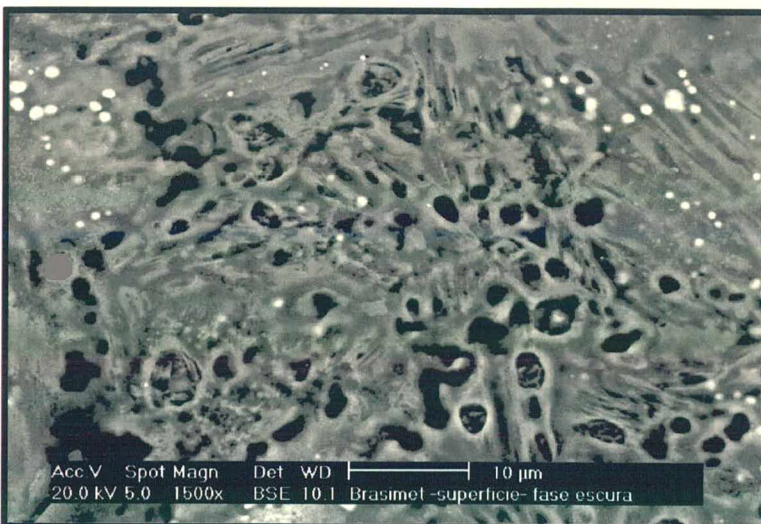


Figura 53
Microestrutura da região
da superfície – fase escura
Grupo 2 - Brasimet

➤ Detalhes da superfície da amostra – Grupo 3 - Mebsa

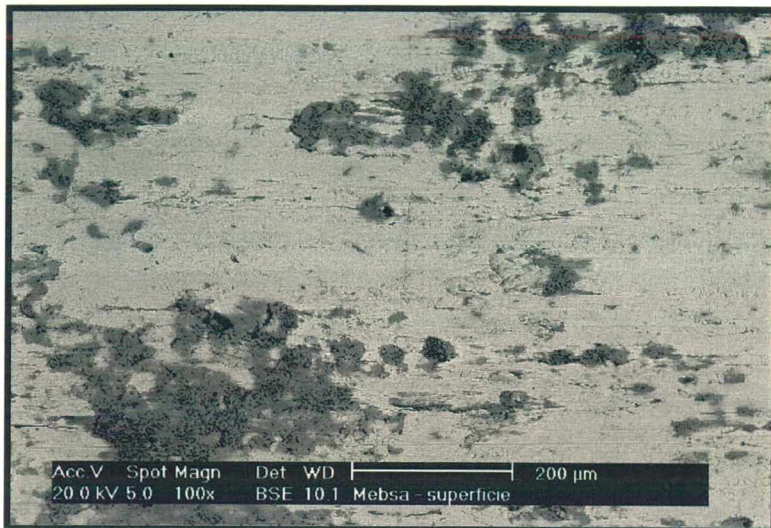


Figura 54
Microestrutura da região
da superfície da amostra
Grupo 3 - Mebsa

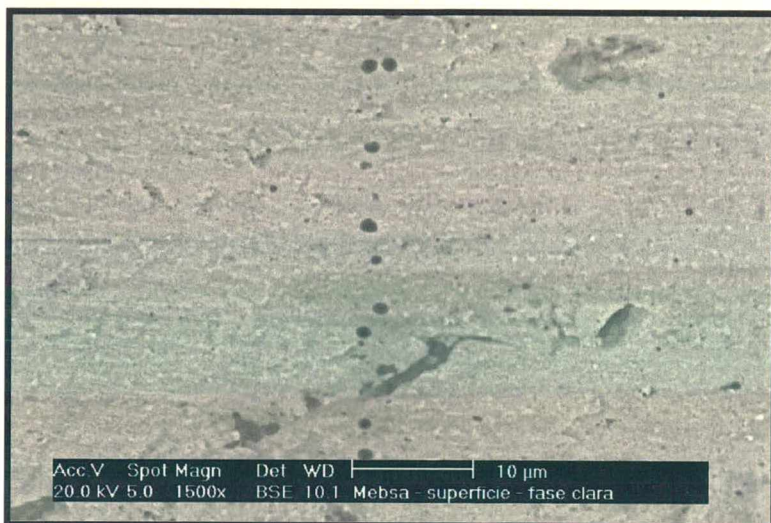


Figura 55
Microestrutura da região
da superfície – fase clara
Grupo 3 - Mebsa

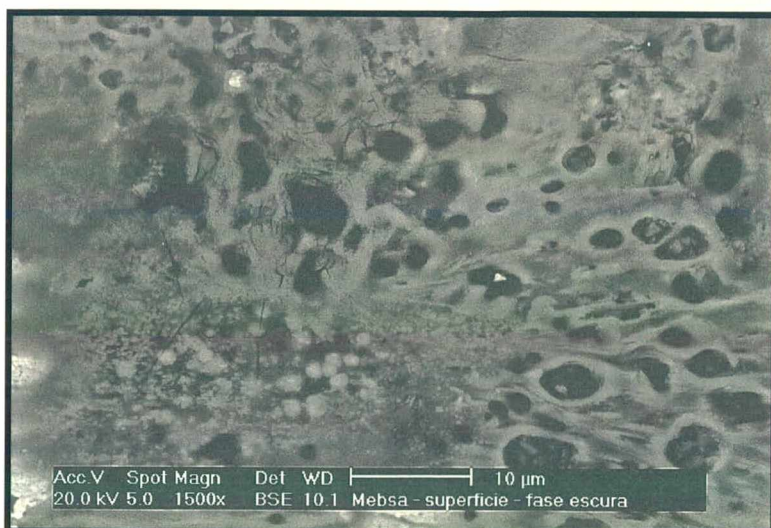


Figura 56
Microestrutura da região
da superfície – fase escura
Grupo 3 - Mebsa

A Tabela 11 mostra a variação da composição química das fases presentes na superfície de cada grupo de amostra do experimento.

Tabela 11 – Comparativo da composição química obtida através de energia dispersiva de raios-X para a região da superfície das amostras do experimento.

Elemento Químico	Grupo 1 Sem Tratamento (% peso)		Grupo 2 Brasimet (% peso)		Grupo 3 Mebsa (% peso)	
	Fase Clara	Fase Escura	Fase Clara	Fase Escura	Fase Clara	Fase Escura
O	5,58	23,32	3,03	20,63	6,56	26,76
Si	4,18	2,45	3,67	1,20	4,12	2,22
Fe	89,78	56,30	90,32	39,64	87,79	47,53
P	0,45	17,93	1,13	9,62	1,53	23,49
C	-	-	1,85	28,1	-	-
Mn	-	-	-	0,81	-	-

A tabela 11 mostra que a fase clara (Figuras 49, 52 e 55) apresenta-se distribuída na mesma proporção nos três grupos de amostras. Nota-se também a presença do fósforo proveniente da camada de isolamento (C4) em todas as amostras analisadas.

A grande variação qualitativa dos elementos químicos ocorre na fase escura (Figuras 50, 53 e 56), onde observa-se nas amostras do grupo 2 – Brasimet o aparecimento de carbono e manganês (Figura 57). Constata-se que o aumento do teor de carbono verificado nas análises químicas das amostras do grupo 2- Brasimet (ver Tabela 6) ocorre devido ao depósito do carbono na camada superficial e não em contornos de grãos ou interstícios onde poderia vir a prejudicar o desempenho magnético do material [Shapiro, 197?].

O carbono presente na superfície da amostra pode ser justificado por três razões principais: a) falta de um sistema de exaustão para queima do óleo de estampagem; b)

desbalanceamento dos teores de carbono entre os diferentes tipos de carga; c) aplicação de uma atmosfera não ideal para este tipo de material, visto que não necessita descarbonetar.

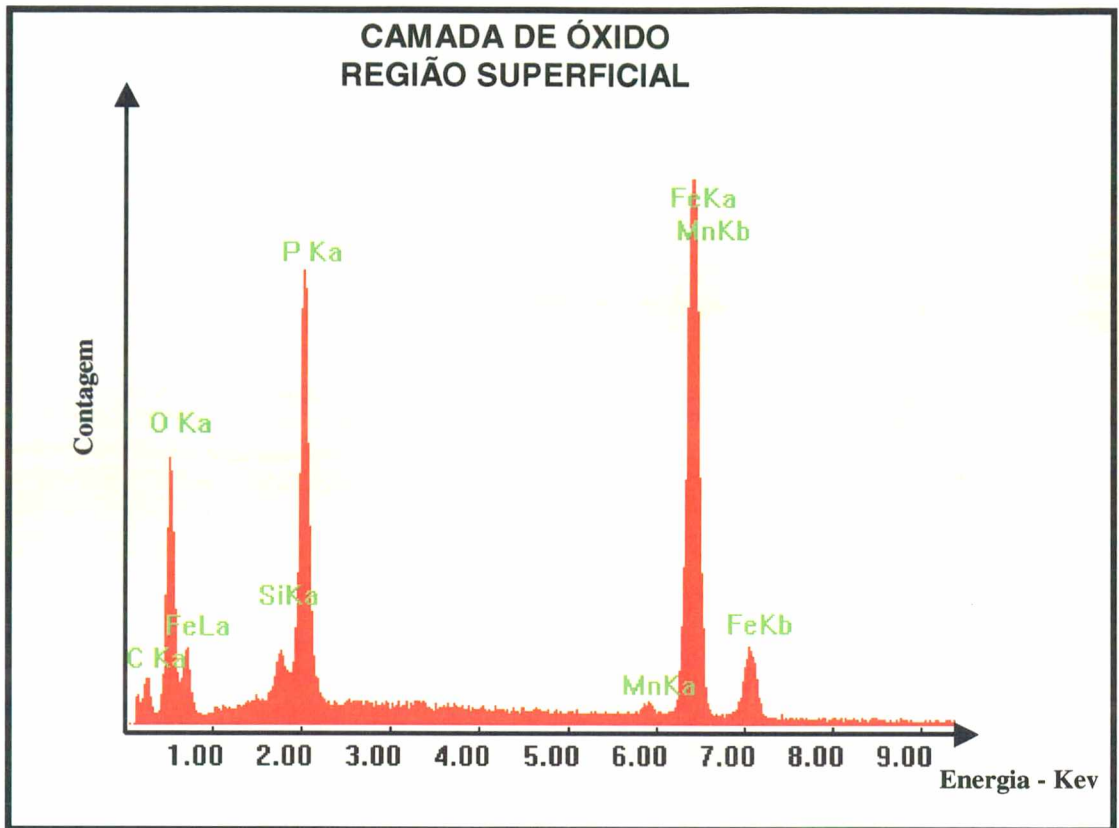


Figura 57 - Espectro de concentração representativo da camada de óxido na região da superfície das amostras do grupo 2 - Brasimet

O processo de oxidação do grupo 3 – Mebsa, apesar de não produzir uma camada uniforme sobre o material, forma um óxido que apresenta boas características de isolamento (ver item 42.4). O incremento nas características de isolamento superficial, se comparado às outras amostras do experimento, justifica-se pelos elevados teores de P e O presentes na fase escura [Block, 1986].

Analisando a superfície das amostras do grupo 1 – Sem Tratamento, pode-se confirmar que a camada de C4 apresenta-se não uniforme conforme anteriormente observado nas análises realizadas na região transversal.

Nas análises de difração de raios-X realizadas nas amostras do experimento, observa-se a existência de três picos da ferrita (ferro- α): a $44,75^\circ$, 65° e a $82,35^\circ$. Além deste picos, o difratograma da amostra do grupo 2 – Brasimet mostra que a aplicação deste ciclo térmico sobre o material dá origem a novos picos de difração em 25° , 78° e $30,6^\circ$. Estes picos estão associados à ocorrência de fosfatos e trifosfatos. A Figura 58 representa o espectro das amostras do experimento. Nela pode-se observar os três picos da ferrita comuns às três amostras do experimento. Somente nas amostras do grupo 2 – Brasimet é que observaram-se os picos de difração referentes aos fosfatos e trifosfatos.

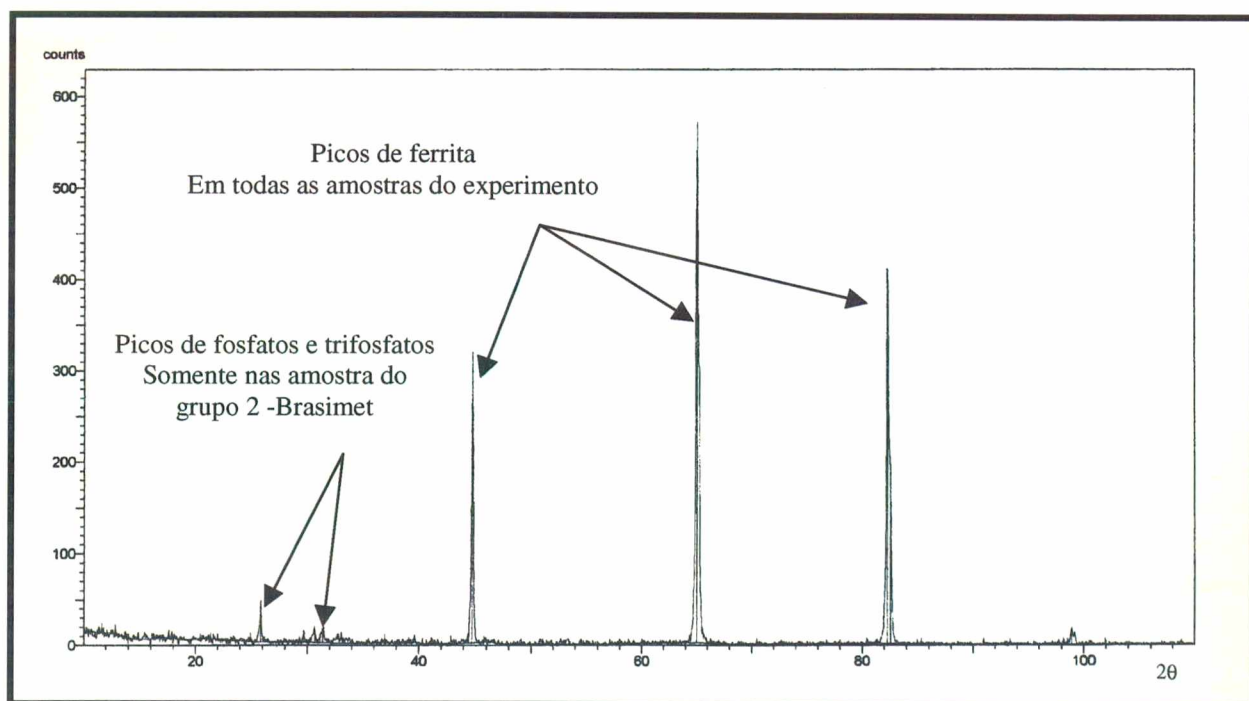


Figura 58 – Difratograma genérico das três amostras do experimento em escala linear.

Pode-se notar que a técnica de difração de raios-X não foi capaz de detectar a camada superficial de óxido, apesar da metalografia indicar a presença na amostras dos grupos 2 e 3. Isto pode ser associado a baixa fração volumétrica da camada de óxido ou a penetração dos raios-X nas amostras que dilui tanto a difração que somente o metal é detectado.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Baseado nos resultados experimentais obtidos, bem como na literatura sobre o tema, é possível concluir o seguinte:

- A aplicação do ciclo térmico do forno Brasimet em lâminas de estator com material totalmente processado melhora o rendimento médio dos estatores em 1,37% em relação a estatores fabricados sem tratamento.
- A aplicação do ciclo térmico do forno Mebsa em lâminas de estator com material totalmente processado melhora o rendimento médio dos estatores em 0,3% em relação a estatores fabricados sem tratamento.
- A camada de isolamento superficial C4 fornecida sobre o material apresenta baixos valores de resistência de isolamento em relação ao histórico do fornecimento.
- O processo de ferroxidação do ciclo térmico do forno Brasimet produz uma camada de óxido sobre a superfície bastante uniforme mas com baixa resistência de isolamento e comparativamente pior que a condição de fornecimento.
- O melhor desempenho do isolamento superficial das amostras do ciclo Mebsa está associado ao incremento dos teores de oxigênio no óxido presente na superfície mais a não degradação do fosfato durante a aplicação do ciclo térmico.
- Tanto o ciclo do forno Brasimet como o ciclo do forno Mebsa não alteram a resistividade elétrica do material.
- Dos elementos químicos analisados, somente o teor do carbono do ciclo Brasimet sofreu alterações, saindo de um valor inicial de 20 ppm para um valor de 33 ppm. O ciclo Brasimet carboneta o material, todavia este fato não influencia no envelhecimento.

-
- Este aumento do teor de carbono das amostras do ciclo Brasimet está localizado na superfície do material, basicamente na camada oxidada e não nos interstícios ou em contorno de grão onde poderia vir a prejudicar o desempenho magnético do material.
 - A microestrutura da região da coroa não sofreu alterações e o tamanho de grão apresenta-se com variação entre 3,5 a 4,0 ASTM para qualquer condição do experimento.
 - A estampagem introduz uma grande deformação na microestrutura do dente da ranhura alcançando uma profundidade de aproximadamente 0,1 mm no interior do material.
 - A temperatura do forno Brasimet (760°C) é suficiente para recristalização a microestrutura do dente da ranhura, sendo este o efeito preponderante sobre o aumento do rendimento dos motores.
 - A temperatura do forno Mebsa (460°C) não é suficiente para formação de novos grãos na estrutura, mas é suficiente para ocorrer o processo de recuperação, reduzindo as tensões internas provocadas pela estampagem. Além da recuperação, o incremento na resistência de isolamento induzem a melhoria do rendimento dos estatores em 0,3% se comparado às amostras sem tratamento.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento deste trabalho alguns assuntos mostraram-se interessantes de serem mais detalhadamente estudados a fim de melhor conhecer os mecanismos envolvidos no processo de recozimento de aços elétricos totalmente processados, a correlação entre microestrutura e propriedades magnéticas e o próprio processo em si. Infelizmente, estes estudos não puderam ser realizados, ficando como sugestão para os próximos trabalhos.

As sugestões para os próximos trabalhos são:

- Otimizar as variáveis tempo e temperatura do ciclo térmico utilizando técnicas estatísticas (DOE), com o objetivo de definir os parâmetros ideais de tratamento de aços elétricos totalmente processados. O conhecimento destas variáveis permitirá a elaboração de propostas de alteração do atual processo industrial reduzindo possivelmente o tempo de processamento e ou temperatura, gerando com isto redução do custo de processo.
- Estudar as variáveis do processo de ferroxidação para formação de uma camada de isolamento superficial de modo a incrementar as propriedades de resistência de isolamento. A melhoria da qualidade deste isolamento permitirá identificar a real influência no rendimento dos motores.
- Estudar a aplicação de diferentes atmosferas gasosas no tratamento de aços elétricos totalmente processados e a sua influência no desempenho magnético do material e no rendimento dos estatores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Produtos laminados planos de aço para fins elétricos: classificação e propriedades**. NTB No. MB450, Rio de Janeiro, 1997.
2. AISI - AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, **Electrical Steels Manual - Classes of Electrical Steels**. Washington D.C, January, 1983.
3. ANDERSON, E. , MILLER, R. , **Electric Motors**. Audel, New York, 1996.
4. ANDRADE, P. R. , **Aços Silício para Núcleos Magnéticos**. Acesita - Aços Especiais Itabira, 1990.
5. ANDREAS, J. C. , **Energy-Efficient Electric Motors**. Marcel Dekker, New York, 1982.
6. BINDER, R. ,**Influência do processo de ferroxidação nas propriedades do ferro sinterizado**. Florianópolis, 1996. 118 p. Dissertação. Curso de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina.
7. BLOCK, W.F. , JAYARAMAN, N. , **Reaction During Decarburization Annealing of Electrical Steel**, *Material Science and Technology*, Vol. 2, 1986, 22-27.

8. BÖLLING, F. , GÜNTHER, K. , **Magnetic Properties of Low Loss Non-Oriented Electrical Steel Sheet of Thin Gauge and at High Frequencies**, Physica Scripta., Vol. 39, 1989, 764-766.
9. CULLITY, B.D., **Introduction to Magnetic Materials**. Addison Wesley, Menlon Park, 1972.
10. ELETROBRAS - CENTRAIS ELÉTRICAS DO BRASIL S.A.. Procel - Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica. **Uso Final**. disponível na internet. <http://www.elektrobras.gov.br/procel/cons.htm>. 23 Dezembro de 1999.
11. EMURA, M., LANDGRAF, F.J.G., FILIPINI, M.A, **Efeito do envelhecimento nas propriedades magnéticas de um aço elétrico**, VI SEMEL, Curitiba, Dezembro 1998.
12. FITZGERALD, A.E., KINGSLEY, C., KUSKO, A., **Máquinas Elétricas**. Mc Graw-Hill, New York,1995.
13. GEBLER, S. R. & KÜHN A., I., **Efeito dos Parâmetros do Ciclo de Recozimento sobre as Propriedades Magnéticas de Aços para a Fabricação de Motores**, 2º Cong. Int. de Tecnol. Metalúrgica e de Materiais da ABM, São Paulo, Novembro 1997.
14. GEIGER, A.L. , **Effects of Internal Oxidation and Nitridation on the Magnetic Properties of Non-Oriented Electrical Steel**, J. Appl. Phys., 50 No.3, 1979, 2366-2368.

-
15. GÜNTHER, K. & BÖLLING, F., **Detrimental Effect of Oxidation on Magnetic Properties of Nonoriented Electrical Steel Sheet**, J. Appl. Phys., Vol. 64 n^o 10, 1988, 5347-5349.
 16. HOU, C-K., **Effect of Hot Band Annealing Temperature on the Magnetic Properties of Low-carbon Electrical Steels**, ISIJ International, Vol. 36 n^o 5, 1996, 563-571.
 17. JUDD, R.R , et al. , **Effect and Importance of Controlled Annealing Atmosphere on Magnetic Properties of Lamination Steels**, Heat Treatment of Metals, No.4, 1995, 83-88.
 18. KUMANO, T., KUBOTA, T., TAKAHASHI, N., **Texture of Primary Recrystallization on Nonoriented Electrical Steel with Phase Transformation**, J. of Materials Engineering and Performance, Vol. 4 n^o 4, 1995, 401-412.
 19. LANDGRAF, F.J.G., TEIXEIRA, J., EMURA, M., et. al., **Aços para Fins Elétricos**, IPT, São Paulo, Dezembro 1997.
 20. LYUDKOSKY, G. , BARNETT, J.B. , **Effect of Lowering Content of Motor Lamination on Processing Optimization and Motor Performance**, Proc. Mech. Working and Steel Processing Congress, , 1983, 113-129.
 21. LYUDKOVSKY, G., PREBAN, A.G., SHAPIRO, J.M., **Influence of Annealing Conditions on the Internal Oxidation and Magnetic Properties of Silicon-Aluminium Heating Electrical Steels**, J. Appl. Phys., 53 No.3, 1982, 2419-2421.

-
22. METALS HANDBOOK VOL.4, **Heat Treating**, American Society of Metals, Ed. 1981.
 23. MICHAL, G.M. , SLANE, J.A. , **Carbide Precipitation in Electrical Steels**, Journal of Metals, , 1986, 32-36.
 24. NIKULIN, N., **Materiais de Montagem Elétrica**. Mir, Moscou, 1987.
 25. PADILHA, A.F., SICILIANO, F.JR., **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, São Paulo, 1995.
 26. PARETO, L., **Tecnologia Mecânica**. Emus, São Paulo, 1892.
 27. SCHMIDT, W., **Materiais Elétricos**. Edgard Blücher, São Paulo, 1979.
 28. SHAPIRO, J.M. , **Optimizing the Decarburization of Punched Electrical Steel Lamination**, Inland Steel Research Laboratories, Internal Report, 197?, 57-71.
 29. STEAPHENSON, E.T. , MARDER, A.R. , **Effects of Grain Size on the Core Loss and Permeability of Motor Lamination Steel**, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag.22 No.2, 1986, 101-106.
 30. STEPHENSON, E.T., **The Effects of Decarburization Anneling on the Microstruture and Magnetic Properties of Semiprocessed Motor Lamination Steels**, Jornal Materials Engineering, Vol.12 No. 1, 1990, 69-83.

-
31. STRATTON, P.F., STANEUSCU, M.S., **Atmospheres for Anneling Electrical Steels**, *Advanced Material and Process*, No.10, 1999, 224-227.
 32. TAKANOHASHI, R. , et al. , **Avaliação da Microestrutura após Laminação a Frio em Aços Elétricos**, 53º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, Dezembro 1998.
 33. USIMINAS - USINA SIDERURGICA MINAS GERAIS, **Catálogo Técnico do Centro de Pesquisa**, Ipatinga , 1996.
 34. VEINOTT, C.G. , MARTIN, J.E., **Fractional and Subfractional Horsepower Electric Motors**. Mc Graw-Hill, New York, 1986.
 35. WERNER, F. E. & JAFFEE, R. I., **Energy-Efficient Steels for Motor Laminations**, *J. of Materials Engineering and Performance*, Vol. 1 nº 2, 1992, 227-234.

ANEXO 1:

DETERMINAÇÃO DE TORQUES E RENDIMENTO DOS MOTORES

➤ Objetivo:

Medir o rendimento e torques de motores elétricos. A rotina é aplicável a qualquer tipo de motor monofásico de indução de corrente alternada (CA).

➤ Equipamento.

Banco de Provas (Dinamômetro)

➤ Execução do ensaio de rendimento:

Monta-se o motor no banco de provas, observando-se a folga radial entre estator e rotor. Instala-se um termopar entre as bobinas principal e auxiliar. Algumas condições são padronizadas, sendo estas:

- Tensão nominal ($U_n = 100V, 115V$ ou $220 V$)
- Os motores com especificação para $220-240V$ serão testados em $220V$.
- Frequência nominal do motor (quando for $50 / 60 Hz$) deve-se testar em ambas.
- A impedância da rede deve ser de $1V/A$ para $220V$ e $0.6 V/A$ para $115 V$.
- O motor deverá ser pré aquecido em estufa a $85 \pm 5^\circ C$, pelo menos $1,5$ horas antes do teste ou aquecê-lo eletricamente.

Liga-se o motor, na tensão e frequência especificadas, e ajusta-se a temperatura de controle de bobina para a temperatura de $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, ajusta-se no ponto de carga (ML) conforme especificação do projeto e registram-se os valores: $I(\text{A})$, $P1(\text{W})$ e $n(\text{RPM})$.

Para obter os valores de eficiência máxima ou uma curva de eficiência, varia-se o ponto de carga e registram-se os valores $I(\text{A})$, $P1(\text{W})$ e $n(\text{RPM})$ até passar pelo ponto de rendimento máximo ou desejado.

➤ Resultados de rendimento:

$$N = (P2/P1) * 100 \quad (10)$$

$$P2 = ML \cdot n \cdot 0,01027 \quad (11)$$

$$\text{Cos } \phi: P1 / (Un \cdot I) \quad (12)$$

onde:

$P1$ - Potência ativa que o motor absorve da rede (Watts)

$P2$ - Potência mecânica fornecida pelo motor (Watts)

ML - Ponto de carga nominal do motor

I - Corrente do motor (Ampères)

n - Rotação desenvolvida do motor (RPM)

N - Rendimento do motor (%);

$\text{Cos } \phi$ - Fator de potência

0.01027 = constante de transformação de valores, aplicado para o SI.

Un - Tensão nominal do motor (V)

➤ Execução do ensaio de torques:

O motor (rotor e estator) é previamente aquecido em estufa, a $85 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ por um período mínimo de 1,5 horas. Também poderá ser aquecido no próprio dinamômetro se necessário, através de sobrecarga no motor até que a temperatura esteja relativamente uniforme.

A impedância da rede deve estar de acordo com os seguintes valores: $1 \text{ V/A} \pm 0.1$ para 220V e $0.6 \text{ V/A} \pm 0.1$ para 115V.

O motor é montado no banco de provas, mantendo a folga radial entre rotor e estator.

Instala-se o termopar entre as bobinas principal e auxiliar.

Conecta-se o cabo de ligação do motor.

Para definir o torque máximo do motor com a bobina principal energizada (MK) dos motores com partida direta a relé faz-se a ligação somente na bobina principal.

Os torques são medidos com temperatura de bobina de $80^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, em 0,9 da U_n .

As medições de torque requerem que a bomba de óleo do dinamômetro esteja ligada a pelo menos uma (1) hora antes do teste.

As tensões são reguladas na mesma temperatura prevista para execução do teste.

Antes de obter-se os gráficos de torque, a célula de carga deverá ser aferida, através do programa de aquisição de dados do dinamômetro, utilizando pesos padrões.

Após prender o rotor no eixo e o estator no mancal do dinamômetro, com ajuda do saiote para manter a folga radial, estando o motor em (0 rpm), regula-se a tensão com a bobina principal e auxiliar energizadas.

Energiza-se o motor com as bobinas principal e auxiliar, acelera-se até a rotação síncrona (3000 para 50 Hz - 3600 Para 60 Hz) com um incremento de $\cong 1000 \text{ rpm / segundo}$. É registrada então a curva de torque x rotação, da qual se obtém o Mst, M3 e MKS.

Para a curva de tombamento (Mk), regula-se a tensão a 20% de escorregamento, ou seja :
2880 ± 10 RPM para 60 Hz, ou 2400 ± 10 RPM para 50 Hz.

Liga-se a bobina principal próximo da rotação síncrona e traça-se o gráfico torque x rotação, com um incremento de $\cong 1000$ rpm / segundo, registrando o Mk.

Definições:

Torque (kgfcm) - Força medida através da reação entre o estator e o rotor, ou ação entregue no eixo do motor.

MST - Torque de partida do motor com rotação zero (0 rpm), quando as bobinas principal e auxiliar estão energizadas.

M3 - Torque mínimo do motor entre 1/3 e 2/3 da rotação síncrona, quando as bobinas principal e auxiliar estão energizadas.

MKS - Torque máximo do motor, quando as bobinas principal e auxiliar estão energizadas.

MK - Torque máximo do motor com a bobina principal energizada

n - Rotação do motor (rpm).

CR - Capacitor permanente.

CS - Capacitor de partida.

RF - Resistor fixo, substitui o PTC (Positive Temperature Coefficient), portanto tem o valor nominal do PTC, dimensionado para uso na máxima potência a que o PTC pode ser submetido.

RSIR - Resistance Start Inductive Run.

RSCR - Resistance Start Capacitor Run.

CSIR - Capacitor Start Inductive Run.

PSC - Permanent Start Capacitor.

ANEXO 2:

TESTE DE FRANKLING - RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

➤ Objetivo:

Definir o coeficiente de resistência de isolamento superficial de produtos laminados para fins elétricos.

➤ Equipamento:

O circuito de medição deve ser alimentado por uma fonte de tensão constante, capaz de assegurar $0,5V \pm 0,5\%$ sobre o circuito de teste para correntes variando de 0A a 1,0 A.

Os contatos consistem em dez hastes metálicas montadas verticalmente em um suporte, o qual se move axialmente sob ação de molas. As dez hastes de contato são normalmente dispostas em uma só fileira. Cada haste é equipada com uma base de contato de bronze (ou outro metal como, por exemplo, aço inoxidável) e deve ser isolada eletricamente do suporte. A área total das dez base dos contatos deve ser de 645mm^2 .

O contato elétrico no corpo de prova deve ser feito através de duas pontas cônicas de aço com alta resistência mecânica (que perfurem o revestimento) sob pressão de molas, com cerca de 3mm de diâmetro.

Um resistor de 5Ω é ligado em série com cada contato. A medida da eficácia do isolamento superficial tende a limitar a circulação de corrente através da superfície. É fornecida pela soma das correntes dos dez contatos conforme esquema de ligação mostrado na Figura 59.

O amperímetro que vai medir a corrente entre as pontas cônicas e os dez contatos deve ter faixa de 0 a 1A DC com classe 1% ou melhor.

O Manômetro que vai estar monitorando a força exercida pela prensa hidráulica deve ter faixa de 0 a 70 kgf/cm², classe 5% ou melhor.

A prensa pode ser um macaco hidráulico de 10.000 N, onde sobre o mesmo está uma base plana para apoio do corpo de prova.

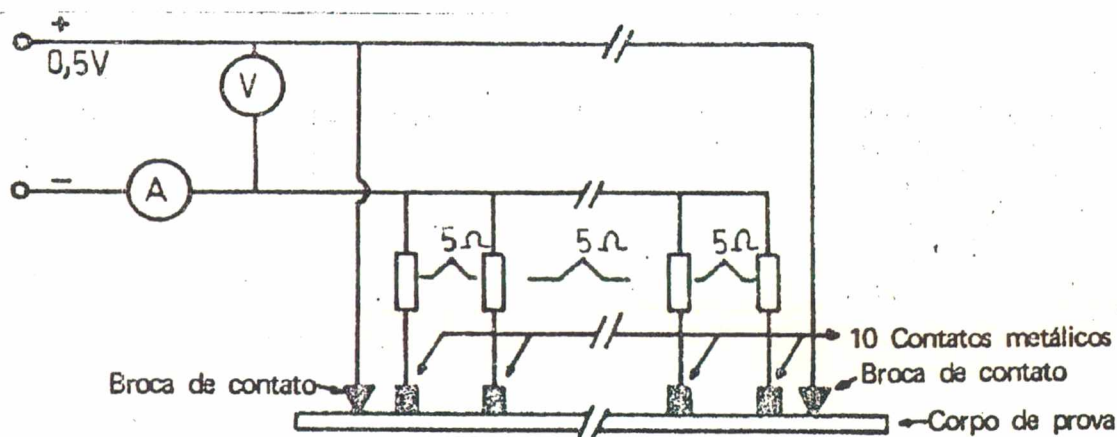


Figura 59 – Esquema elétrico para medição da resistência de isolamento. [Embraco]

➤ Execução do Ensaio:

O corpo de prova pode ser o mesmo do teste de Epstein, porém, para que o teste tenha validade, é necessário fazer medições no mínimo em cinco lâminas para cada tipo de material, sendo executado antes do teste de Epstein, evitando danificar a camada de isolante.

Após a colocação das lâminas entre a placa e os contatos, aplica-se força específica de 1290N.

$$F = P \cdot A \quad (13)$$

$$F = 2 \text{ N/mm}^2 \cdot 645 \text{ mm}^2$$

$$F = 1290 \text{ N}$$

onde:

F = Força específica aplicada aos contatos

P = Pressão específica de cada contato

A = Área de 10 contatos = 645 mm^2

Ajusta-se a tensão indicada pelo voltímetro em 0,5 V, mede-se a corrente. A corrente pode variar entre 0 A (Isolamento Perfeito) até 1A (Condutor Perfeito).

➤ Resultados:

Determinação da pressão aplicada ao manômetro do equipamento para dez contatos:

$$F = 1290 \text{ N} / 9,81 = 131,5 \text{ Kgf}$$

$$Fm = 23 \text{ kgf}$$

$$R = F + Fm \quad (14)$$

$$R = 131,5 + 23 = 154,5 \text{ Kgf}$$

$$Pa = R / S \quad (15)$$

$$Pa = 154,5 \text{ Kgf} / 3,4636 \text{ cm}^2$$

$$Pa = 44,6 \text{ Kgf/cm}^2$$

onde:

F = Força específica aplicada aos contatos

R = Força resultante igual para as duas molas de retorno mais as doze molas do teste.

Fm = Pressão das duas molas de retorno, que são usadas para baixar a base de teste

suspensa pelo hidráulico. Valor medido para a condição do teste.

S = Área do pistão do macaco hidráulico em cm^2 para um diâmetro de 21 mm.

Pa = Pressão aplicada no manômetro [kgf/cm^2].

Cálculo da Resistência de Isolamento:

$$I = V / Req$$

$$Req = 5 + Rc / 10$$

$$I = V / (5 + Rc / 10)$$

$$Rc = (10 \cdot V / I) - 5$$

$$Ri = Rc \cdot A$$

$$Ri = ((10 \cdot V / I) - 5) \cdot A$$

$$Ri = ((10 \cdot 0,5 / I) - 5) \cdot 6,45$$

$$Ri = (6,45 / I) - 6,45 \text{ [} \Omega \cdot \text{cm}^2 \text{]} \quad (16)$$

onde:

I = Corrente lida no amperímetro [A].

5 = Resistência em Ohms dos resistores em série a cada contato.

Req = Resistência equivalente dos dez resistores em paralelo.

Rc = Resistência dos contatos em Ohms.

V = tensão aplicada [0,5 Volts].

10 = números de contatos.

2 = Dois lados da amostra.

A = Área de cada contato [$6,45\text{cm}^2$].

Ri = Resistência superficial de isolamento da amostra em [Ohms.cm^2].

ANEXO 3:

TESTE DE EPSTEIN - PERDAS MAGNÉTICAS TOTAIS

➤ Objetivo:

O objetivo deste teste é medir a potência dissipada por um material magnético quando submetido a um campo magnético variável. Esta medida é apresentada em Watts/Kg, e está associada à área de histerese, dependendo portanto da indução máxima em que é realizada a medida. A potência dissipada depende também da velocidade em que a curva de histerese é percorrida, sendo função crescente da frequência (Corrente de Foucault).

➤ Equipamento:

O emprego do Quadro Epstein abrange todos os tipos de produtos laminados planos de aço para fins elétricos.

Para este ensaio são especificados os limites de indução que asseguram sua validade. Aços de especificação GO utilizam induções de até cerca 1,8T e em produtos GNO até cerca de 1,5T. A faixa de frequência deve preferencialmente variar entre 15Hz e 100Hz. Normalmente utiliza-se frequência de 50Hz, indução de 1.0T e 1,5T.

O Quadro Epstein (Figura 60) consiste de dois enrolamentos (primário e secundário) constituído cada um de quatro segmentos de bobinas ligados em série que, juntamente com o corpo de prova, formam o circuito magnético. As bobinas são montadas em quatro carretéis, cada um dos quais suportando duas bobinas concêntricas. A bobina externa faz parte do

enrolamento primário (excitação) e a interna do enrolamento secundário (tensão). Cada bobina possui um quarto do número total de espiras do enrolamento ao qual pertencem.

As amostras devem ser extraídas sem rebarbas. O número de tiras que compõe o corpo de prova não deve ser inferior a 12 (deve ser múltiplo de 4) e possuir as seguintes dimensões:

Largura: $30 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$

Comprimento: 280 mm

Devem ser coletadas amostras no sentido longitudinal e transversal do material a ser analisado.

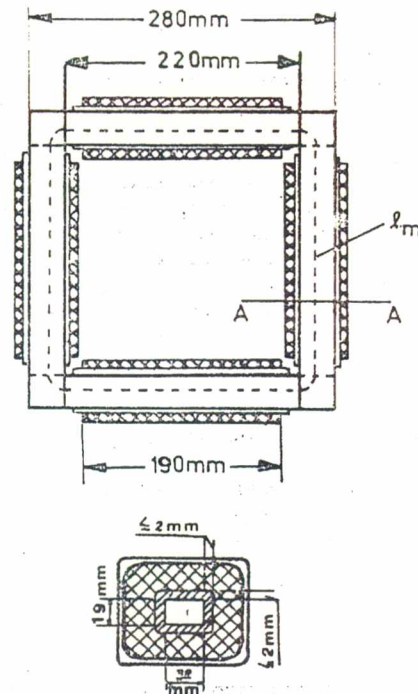


Figura 60 – Esquema das bobinas no quadro Epstein. [AISI]

➤ Execução do Ensaio:

A massa do corpo de prova deve ser medida com precisão de mais ou menos 0,1%. Após, as tiras devem ser colocadas dentro dos carretéis do quadro Epstein de tal modo que sejam formadas juntas duplamente sobrepostas nos cantos (Figura 61).

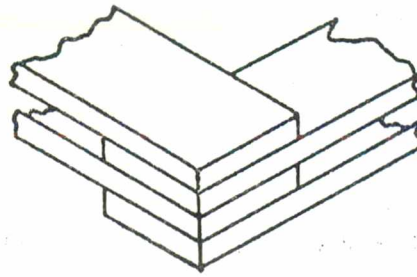


Figura 61 – Posicionamento das lâminas no quadro Epstein. [AISI]

Metade das tiras da mesma direção de laminação devem ser colocadas em braços paralelos no quadro Epstein e o restante na outra direção. Todos os braços devem conter o mesmo número de tiras e as lâminas devem ser desmagnetizadas antes do início do teste.

➤ Resultados:

Fluxo Magnético:

O valor é obtido pela seguinte equação:

$$B = \frac{V_f \cdot 10^3}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_2 \cdot A \cdot 10^3} \quad (\text{kG}) \quad (17)$$

onde:

B = valor máximo da densidade de fluxo na qual se efetua a medição (kGAUSS).

V_f = valor a ser ajustado no voltímetro de fluxo (V).

f = frequência (Hz).

N_2 = número de espiras da bobina secundária (700 espiras).

A = área transversal da amostra.

10^3 = fator de conversão de GAUSS para kGAUSS.

$$A = \frac{m}{4 \cdot L \cdot D} \quad (\text{cm}^2) \quad (18)$$

onde:

m = massa das amostras (g).

L = comprimento das amostras (28cm).

D = densidade das amostras (g/cm^3).

Substituindo a expressão (17) na expressão (18) tem-se:

$$\begin{aligned} V_f &= \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N_2 \cdot 10^3 \cdot 10^{-8} \cdot A \cdot B \\ V_f &= \sqrt{2} \cdot \pi \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot N_2 \cdot A \cdot B \\ V_f &= \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 10^{-5} \cdot 700}{4 \cdot 28 \cdot 7,85} \cdot f \cdot m \cdot B \\ V_f &= 3,535 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot m \cdot B \quad (\text{V}) \quad (19) \end{aligned}$$

Densidade:

Normalmente assume-se como valor de densidade:

$$D = 7,85 \text{ g}/\text{cm}^3$$

Forças magnéticas:

As forças magnéticas são calculadas a partir da equação:

$$I = \frac{V_{mag}}{k} \quad (\text{A}) \quad (20)$$

onde:

V_{mag} = tensão de magnetização

k = constante

$k = 68,080$	p/ indutor de 1A em 60Hz
$k = 5,075$	p/ indutor de 10A em 60Hz
$k = 55,000$	p/ indutor de 1A em 50Hz
$k = 4,100$	p/ indutor de 10A em 50Hz

Campo Magnético:

Obtem-se o valor de H através da fórmula:

$$H = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot N_1 \cdot I}{l'}$$

$$H = \left[\frac{0,4 \cdot \pi \cdot 700}{96} \right] \cdot I$$

$$H = 9,163 \cdot I \quad (\text{Oe}) \quad (21)$$

onde:

H = valor máximo da força magnética procurada (Oersted).

N_1 = número de espiras da bobina primária (700 espiras).

L' = comprimento efetivo do circuito magnético (96 cm).

I = corrente no enrolamento primário do quadro Epstein.

Quando a corrente do indutor ultrapassar 1A, muda-se o indutor para 10A e as respectivas constantes k .

Permeabilidade Magnética:

Determina-se a permeabilidade magnética através da seguinte equação:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (22)$$

Perdas no Ferro:

A perda total no ferro das amostras será:

$$W_c = \left[P - \frac{V_{ef}^2}{R} \right] \cdot \frac{100}{h + \left[\frac{V_{ef}}{V_f} \right]^2 \cdot \varepsilon} \quad (\text{W}) \quad (23)$$

onde:

W_c = perda total das amostras em teste (W)

R = resistência combinada no circuito de tensão do watímetro, voltímetro de fluxo e voltímetro.

V_{ef} = tensão eficaz medida (V)

V_f = tensão de fluxo ajustada (V)

P = potência medida no watímetro, corrigida conforme a escala em que foi lida (W)

h, ε = Percentagem das perdas totais por histerese (h) e por corrente parasitas (ε), para fluxo senoidal.

O cálculo da potência (W_c) só é válido se o termo compensador de distorção (V_{ef}/V_f) não se afastar mais do que 10% de 1. No caso do termo compensado de distorção não se afastar mais de 1 %, o mesmo pode ser negligenciado nos cálculos de perdas, sendo a potência calculada como mostrado a seguir:

$$W_c = P - \frac{V_{ef}^2}{R} \quad (24)$$

ANEXO 4:

TESTE DE RESISTIVIDADE

➤ Objetivo:

O ensaio consiste na medição de tensão resultante quando da passagem de uma corrente elétrica de 1A por um corpo de prova semelhante ao do teste Epstein no sentido de laminação.

A resistividade é a propriedade relacionada à capacidade de oposição à passagem de corrente elétrica.

➤ Equipamento:

O equipamento consiste em agrupar os seguintes aparelhos em uma configuração semelhante ao equipamento Frankling, onde existem somente os terminais de contato da extremidade.

- Voltímetro utilizado para medir tensão aplicada aos terminais. O instrumento deve ter leitura para a faixa de 0 a 10 milivolts com classe de 0,5.

- Fonte deve ser de corrente contínua ajustada em 1A com precisão de 0,5%, 2VA.

Os terminais de contatos devem ser de aço com pontas cônicas com 45° ou mais, de alta resistência mecânica, para não haver desgaste ou amassamento das mesmas, que são usadas para penetrar e fazer bom contato elétrico na amostra a ser testada.

➤ Execução do Ensaio:

O comprimento mínimo de cada amostra é 25cm e largura mínima de 3cm. A largura deve ser uniforme. Neste caso pode-se usar a mesma lâmina do teste de Epstein.

Superfície da amostra deve ser limpa antes do ensaio. Não deve apresentar defeitos visíveis de óleo e graxa (quando presentes, devem ser removidos por meio de solvente adequado). Não é necessário remover óxido superficial normal, salvo para estabelecer contato elétrico adequado com os terminais de contato e a amostra do material.

A medição da resistividade deve ser executada na direção da laminação.

Os terminais de tensão devem ficar entre os terminais de corrente e espaçados de pelo menos 12cm. A distância entre cada terminal de tensão e o terminal correspondente de corrente não deve ser inferior a duas vezes a largura da amostra. A dimensão na direção de cada terminal de tensão, paralela ao comprimento da amostra, não deve ser superior a 0,1 vezes a distância entre os terminais de tensão. Os contatos com o corpo de prova devem estar localizados em posição central relativamente à largura deste. O contato dos terminais com a amostra deve ser perfeito. Durante o ensaio a temperatura deve situar-se entre 18°C e 28°C.

Nota: O comprimento entre os contatos de tensão usados neste teste foi de 12,9 cm .

➤ Resultados:

A resistividade é calculada a partir da relação a seguir:

$$\rho = \frac{V}{A} \cdot \frac{e \cdot L}{le} \quad (25)$$

onde:

ρ = resistividade material ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)

V = tensão lida no voltímetro (mV)

A = corrente constante (1A)

e = espessura da amostra (cm)

L = largura da amostra (cm)

le = comprimento percurso elétrico (cm)

O valor de resistividade deve ser resultado da medição de 5 ou mais corpos de prova, calculando-se o valor médio e desvio padrão.