

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JÚLIA ROCHA DE CASTRO

**ESTUDO DA PROPRIEDADE MAGNÉTICA E DO ARRANJO
MICROESTRUTURAL ASSUMIDOS PELO AÇO GNO PARA DIFERENTES
CONDIÇÕES DE CORTE DE CHAPA**

BELO HORIZONTE

2015

JÚLIA ROCHA DE CASTRO

**ESTUDO DA PROPRIEDADE MAGNÉTICA E DO ARRANJO
MICROESTRUTURAL ASSUMIDOS PELO AÇO GNO PARA DIFERENTES
CONDIÇÕES DE CORTE DE CHAPA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Wellington Lopes

Co-orientador: Elaine Carballo Siqueira Corrêa

BELO HORIZONTE

2015

JÚLIA ROCHA DE CASTRO

**ESTUDO DA PROPRIEDADE MAGNÉTICA E DO ARRANJO MICROESTRUTURAL ASSUMIDOS
PELO AÇO GNO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CORTE DE CHAPA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Wellington Lopes- Orientador

Prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. Dr. João Paulo Machado

Prof. Dr. Leonardo Neves

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Prof. Wellington Lopes por todo o conhecimento transmitido e por me guiar não somente nesse trabalho de conclusão mas em toda minha graduação com invejável dedicação e paciência.

Á APERAM South America S.A pela disponibilidade dos laboratórios e maquinário para a realização dos ensaios magnéticos e tratamentos térmicos.

Á Engenheira de Materiais Carolina Cesconetto Silveira por todo aconselhamento e direcionamento desde a montagem do escopo do projeto e durante toda a sua execução.

RESUMO

Dentre os diversos materiais usados na fabricação de componentes das indústrias de eletroeletrônicos se destacam os aços silício ou aços Fe-Si, sendo os mesmos divididos em duas famílias: os aços com grão orientado (GO) e os aços com grão não-orientado (GNO). O segundo tipo apresenta como diferencial isotropia de propriedade ao longo do plano da chapa. As características magnéticas do aço GNO estão associadas com aspectos microestruturais do material, como composição química, tamanho de grão, deformações plásticas entre outras.

Ao serem submetidas às sollicitação mecânicas impostas por um método de corte, como a guilhotina, cria-se um estado de deformação heterogêneo observado na região do cisalhamento que se alastra no material a partir da borda. Essa deformação infere significativamente nas características magnéticas do material: quanto maior a zona de deformação, maior a perda magnética.

O objetivo desse trabalho é associar aspectos microestruturais com propriedades magnéticas. Para isso, sequência de cortes com diferentes folgas na guilhotina foram realizados par amostras do aço GNO 2% de Silício e essas mesmas amostras serão submetidas ao ensaio magnético BROCKHAUS e ao tratamento térmico do recozimento em progressivas temperaturas que juntamente com ensaios metalográficos.

A amostra cortada com a folga de 0.1mm, recozida a 800°C apresentou uma considerável melhora na propriedade de perda magnética. A microestrutura apresentada foi mais regular, homogênea com grãos maiores quando comparada com amostra antes do tratamento térmico. A condição que apresentou a piora mais acentuada na perda magnética foi para a amostra cortada com a folga de 0.05mm recozida a 650°C. A microestrutura indicava ainda uma estrutura heterogênea, irregular, quando comparada ao estado inicial.

Palavras-chaves: aço GNO, método de corte; condição microestrutural; recozimento; propriedades magnética

ABSTRACT

Among the diversity of all components manufactured for the electronics industry, it has to be taken into consideration the potential of the Silicon steel alloys, Fe-Si, which are divided in two different grades: the oriented grain steel alloys (GO) and the non-oriented grain alloys (GNO). Differently from GO steel, the GNO presents isotropy along the plate plane and its magnetic characteristics can be associated with the microstructure aspects of the material such as chemical composition, grain size and plastic zone deformation.

Upon being submitted to mechanical stresses imposed by a cutting method such as the guillotine, it is created a heterogeneous state of deformation observed in the shear region that spread in the GNO material from the edge. This deformation significantly infers in the magnetic proprieties: the higher the deformation zone, the greater the magnetic loss.

The aim of this project is to associate microstructure aspects of the material with the magnetic proprieties.

Sequence of cuts were conducted in the guillotine in different clearances for the GNO 2% silicon steel samples then those samples were submitted in the BROCKHAUS magnetic testing and thermal annealing treatment on progressive temperatures. Metallographic tests were used to evaluate the microstructure condition.

The 0.1mm clearance annealed at 800°C sample was the one that presented a considerable improve in the magnetic core loss property. The metallographic exposed that the microstructure was more regular, homogeneous with larger grains compared to the non-thermal treated sample. In the other hand the condition that showed the sharpest deterioration in core loss was for the sample cut at 0.05mm clearance, annealed at 650 ° C. The microstructure of it indicated a heterogeneous, irregular structure compared to the initial state.

Key words: GNO steel, cut method, microstructural condition, aneling, magnetic properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Características dos ensaios de dureza em função do método de medição.....	12
Figura 2- Bordas das amostras em diferentes métodos de corte.....	14
Figura 3- Esquema dos eventos do corte de uma guilhotina.....	15
Figura 4- Elementos físicos da guilhotina	16
Figura 5- Curva de magnetização típica de material magnético.....	18
Figura 6- Exemplo de um quadro Epstein em a) vista superior e b) vista lateral.....	22
Figura 7- Representação esquemática do ciclo encruamento-recristalização.....	25
Figura 8- Fluxograma do processo experimental do trabalho.....	27
Figura 9- Composição química percentual GNO como recebido	27
Figura 10- Equipamento utilizado para microdureza.....	28
Figura 11- Guilhotina utilizada no trabalho.....	29
Figura 12- Exemplo de um quadro Epstein em a) vista superior e b) vista lateral.....	31
Figura 13- Máquina utilizada para ensaio Brockhaus.....	32
Figura 14- Software Mpg Expert.....	33
Figura 15- a) Região utilizada para análise estrutural do material como recebido e seu b) embutimento.....	34
Figura 16- a) região retirada para corte, b) amostra cortada e dobrada e c) embutimento da amostra cortada	34
Figura 17- Lixas utilizadas durante processo metalográfico.....	35
Figura 18- Politrizes usadas para metalografia com granulometria de (a) 3 μm e (b) 9 μm	36
Figura 19- Ataque químico para revelação da microestrutura.....	36
Figura 20- Microscópio ótico usado para análise metalográfica.....	37
Figura 21- Fotomicrografia GNO 2% de Silício ampliação de 200X.....	39
Figura 22- Folga da guilhotina X Perda Magnética.....	36
Figura 23- Micrografia do perfil das arestas submetidas ao corte para 200X de ampliação par as folgas a) F1= 0.025mm b) F2= 0.05mm c) F3=0.75mm ed) F4= 0.1mm.....	38
Figura 24- Percentagem da perda magnética X Temperatura de recozimento para a) Folga 1= 0.025mm, b) folga 2= 0.05mm, c) folga 3= 0.075mm e d)folga 4= 0.1m.....	42
Figura 25- Temperatura de recozimento X Porcentagem de perda magnética X Folga de corte.....	43
Figura 26- Micrografia para a amostra F.4.8 para um aumento de a) 200 X e b)400X...44	
Figura 27- Micrografia para a amostra F.2.1 para um aumento de a) 200 X e b)400X...45	

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO.....	7
2- OBJETIVOS.....	9
2.1-Objetivos gerais.....	9
2.2-Objetivos específicos.....	9
3-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1-Aço de grão não orientado (GNO).....	10
3.2-Ensaio mecânicos.....	11
3.2.1-Ensaio de microdureza.....	11
3.3-Método de corte.....	13
3.3.1- Guilhotina.....	15
3.4-Propriedades magnéticas.....	16
3.4.1- Perda histerética.....	17
3.4.2- Perda por corrente parasita.....	19
3.4.3- Perdas de excesso.....	20
3.4.4 Fatores que favorecem as propriedades magnéticas de ligas de Fe-Si.....	20
3.4.5 Quadro Epstein.....	21
3.5-Característica microestrutural.....	23
3.6-Tratamento térmico de recozimento.....	24
4- METODOLOGIA.....	27
4.1- Fluxograma do processo.....	25
4.2- Material.....	27
4.3-Caracterização mecânica.....	28
4.3.1-Microdureza.....	28
4.4-Método de corte.....	29
4.5- Tratamento térmico no aço GNO.....	30
4.6-Caracterização magnética.....	31
4.7- Caracterização estrutural.....	34
5- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5.1- Caracterização mecânica: estado como recebido	38
5.2- Caracterização estrutural do material como recebido.....	38
5.3-Caracterização magnética do estado como recebido.....	39

5.4- Caracterização estrutural após os cortes	40
5.5- Caracterização magnética em função do tratamento térmico	42
5.6- Caracterização estrutural em função do tratamento térmico.....	44
6- CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Materiais magnéticos têm grande importância na indústria automobilística por serem usados em motores, alternadores, entre outras aplicações. Esses materiais são importantes devido a sua propriedade magnética. Tem a capacidade de amplificar o campo magnético criado pelas correntes elétricas ao qual foram submetidos (LANDGRAF, 2015). São agrupados em duas classes: os materiais "magneticamente moles", materiais de fácil magnetização e desmagnetização e os "magneticamente duros", mais conhecidos como ímãs, pois são naturalmente magnetizados.

Dentre esses materiais, alguns estudos foram feitos em relação ao aço GNO, aço de grãos não orientados. Estes aços possuem propriedades magnéticas importantes. De acordo com Landgraf (2015), estes aços são responsáveis por 90% das aplicações de aços elétricos. A preferência por estes aços se dá devido a sua propriedade magnética ocorrer com bons resultados em qualquer direção cristalográfica.

As propriedades dos aços magnéticos estão relacionadas, principalmente, a sua microestrutura. O comportamento magnético destes materiais pode sofrer mudanças de acordo com variações na sua estrutura e microestrutura, como por exemplo: tamanho do grão, deformações plásticas, textura e grau de impurezas (BACALTCHUK et al., 2005).

As placas de aço de grão não orientado são submetidas à solicitação mecânica quando são cortadas em tamanhos pré-estabelecidos. Uma das formas largamente utilizadas para tal procedimento é o corte com a guilhotina. Porém, um estado de deformação heterogêneo é observado na região do cisalhamento quando se submete as placas de aço a esse método de corte. A zona deformada pode se alastrar no material a partir da borda de cisalhamento. Tem-se, então uma forte influencia dessa deformação nas características magnéticas do material: quanto maior a zona de deformação, maior a perda magnética.

A variável folga do método de corte assim como a composição química da liga estão relacionadas com a deterioração das propriedades magnéticas causadas por tal deformação, por exemplo, aumento na perda magnética quando se mantém as placas submetidas a uma frequência constante 50 Hz, diminuição da permeabilidade magnética entre outras(BOUDOUIN et al., 2003).

Esse presente trabalho visa esclarecer a relação entre folga da guilhotina e tratamento térmico com as propriedades magnéticas do produto final a fim de encontrar uma situação em que o aproveitamento do material seja máximo dentro dos custos esperados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Tem-se uma procura constante do mercado por materiais magnéticos com uma maior eficiência, representado por uma maior permeabilidade magnética e menor perda magnética durante aplicação. Essas propriedades, porém, devem estar aliadas a um menor custo da produção, processabilidade e comportamento mecânico adequado e garantia na forma do material em tempo de exercício.

Aliado a essa demanda de mercado, esse trabalho, em linhas gerais visa encontrar o ponto de aproveitamento máximo do aço GNO, que pode ser traduzido como uma perda magnética minimizada, microestrutura regular e um tratamento térmico de recozimento favorável ao desempenho magnético.

2.2 Objetivos específicos

O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades magnéticas do aço de grão não orientado (GNO) em função de diferentes valores de deformações plásticas inseridas no material após método de corte da guilhotina em diferentes folgas e em diferentes condições de tratamentos térmicos de recozimento.

Sequência de cortes com diferentes folgas na guilhotina foram realizados e essas mesmas amostras foram submetidas ao ensaio magnético Brockhaus e ao tratamento térmico de recozimento em progressivas temperaturas.

Para uma análise comparativa mais profunda e segura foram feitas também análises metalográficas ao longo da seção longitudinal de algumas amostras.

Com isso, dentre as variáveis estudadas decidiremos quais foram as mais efetivas pela mudança das propriedades magnéticas do aço e quais as condições de melhor aproveitamento do aço elétrico de grão não orientado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços de grão não orientado (GNO)

Os aços elétricos são aqueles materiais que possuem a capacidade de amplificar milhares de vezes um campo magnético externamente aplicado, em outras palavras, magneticamente macio. Os principais tipos de aços elétricos são os aços baixo teor carbono; aços silícios de grão orientado (GO) e aços silícios de grão não orientado (GNO). (LANDGRAF, 2015).

Segundo LANDGRAF (2015), a principal diferença entre o aço GO e o GNO é a presença de uma direção cristalográfica preferencial na direção de laminação do primeiro. Assim, esse apresenta excelentes propriedades magnéticas numa direção específica. Já o GNO, ao contrário do GO, não exibe uma direção onde as propriedades magnéticas são mais intensas. Estes aços apresentam uma distribuição mais homogeneia das propriedades magnéticas ao longo da chapa, sendo, portanto, menos anisotrópicos do que os aços de grão orientado (GO) em relação as propriedades elétricas e magnéticas.

Os aços GO são comumente usados em situações onde a variação do campo magnético é inexistente ou muito pequena, como em núcleos de transformadores de força e de distribuição. Já a aplicação dos aços GNO é mais ampla, pois sendo a anisotropia menor, pode-se utilizá-los em condições em que se observa a variação do fluxo magnético, como em motores elétricos utilizados em compressores herméticos de geladeiras, freezers e de ar condicionado (NACIONAL, 2015).

O fluxo de fabricação dos aços GO e GNO é feito de modo a obter as melhores propriedades magnéticas. Desta maneira, é indispensável o controle de algumas variáveis, tais como a adição de silício e de alumínio para aumentar a resistividade da chapa e assim diminuir a intensidade das correntes parasitas das perdas magnéticas, o controle microestrutural do tamanho do grão, entre outras.

Esse tipo de controle permite o balanço das perdas magnéticas associadas às correntes parasitas e ao processamento mecânico aplicado ao material, considerando a relação entre a quantidade de imperfeições internas (como as discordâncias) causadas pela aplicação de

esforços mecânicos como os compressivos-cisalhantes presentes na operação de laminação (IORDACHE; HUG; BUIRON, 2013)

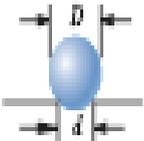
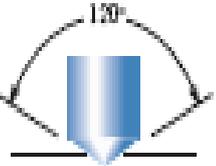
3.2 Ensaaios Mecânicos

3.2.1 Ensaio de microdureza

Dureza pode ser definida, dentre outros aspectos, como sendo a resistência à deformação plástica localizada de um material. Essa resistência à deformação pode ser avaliada por vários tipos de escalas e métodos, os quais possuem a mesma concepção: um penetrador é forçado contra a superfície do material a ser testado, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação, faz-se a medição da profundidade ou do tamanho da impressão resultante, a qual por sua vez é associada a uma escala com um índice de dureza (CALLISTER, 2002).

A figura 1 apresenta um esquema de um ensaio de dureza. Nesta figura é mostrada ainda a vista lateral de um penetrador (ferramenta utilizada para comprimir o material teste) e a vista superior da impressão causada no corpo de prova, assim como o cálculo necessário à determinação do valor da dureza.

Figura 1- Características dos ensaios de dureza em função do método de medição

Penetrador	Forma da impressão		Carga	Fórmulas Dureza
	Vista lateral	Vista de topo		
Esfera com 10mm em aço ou carbeto de tungstênio			P	$= \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Pirâmide de diamante			P	$= 1.854P/d^2$
Pirâmide de diamante			P	$= 142P/t^2$
Esfera de aço com 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 pol. de diâmetro e cone de diamante			60 kg } 100 kg } Rockwell 150 kg } 15 kg } 30 kg } Rockwell superficial 45 kg }	

Fonte: (CALLISTER, 2002.P.95)

Quanto mais macio um material, maior será a impressão e a profundidade, e menor será o índice de dureza. Como indicado pela figura 1, cada método possui ferramentas distintas e os respectivos índices de dureza, não sendo possível a comparação direta entre uma e outra escala de dureza.

Quando o penetrador incide numa região muito pequena fazendo com que a avaliação da dureza seja referente a áreas muito restritas de material, como por exemplo, precipitados, grãos de uma dada fase, películas de revestimentos muito delgadas, um grão específico chamamos o ensaio de microdureza.

No caso específico da microdureza Vickers, um indentador de diamante piramidal é forçado para dentro da superfície da amostra, que deve ser previamente submetida a uma preparação metalográfica superficial. Deve-se assegurar que a amostra esteja bem apoiada de modo a não comprometer a indentação. As cargas aplicadas nesse ensaio tendem a ser menores do que para outros testes como Rockwell e Brinell. Variam de 1 e 1000g. A medição das duas diagonais é feita com o auxílio de um microscópio e então os comprimentos são convertidas para uma medida de dureza (HV), como indicado na figura 7 acima (CALLISTER, 2002)

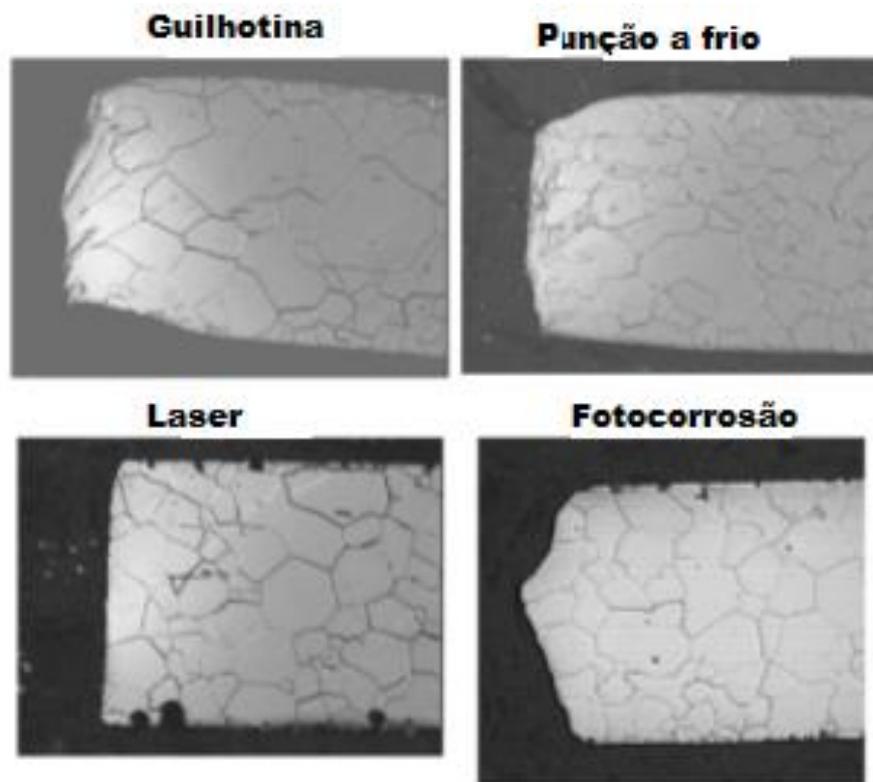
3.3 Métodos de Corte

As chapas de aço elétrico após toda a linha produtiva são submetidas ao corte para que se adaptar seu tamanho a seu uso final. Guilhotina, laser, fotocorrosão e punção a frio são alguns dos métodos largamente utilizados.

Operações de corte induzem deformações plásticas localizadas, não homogêneas e deterioram propriedades magnéticas. A perda magnética aumenta enquanto a permeabilidade diminui (EMURA et al., 2003).

As propriedades magnéticas são dependentes da quantidade do corte por unidade de volume e do método de corte. EMURA et al., (2003), realizou experimentos com amostras de um aço de grão não orientado com 2% de Silício antes de passarem por um recozimento para alívio de tensão em que essas foram submetidas aos quatro tipos de corte mais comuns e o resultado se encontra na figura 2.

Figura 2-Bordas das amostras em diferentes métodos de corte



Fonte: (EMURA et al., 2003)

Verificou-se significativa quantidade de deformação plástica causada pela guilhotina e pela punção numa região de aproximadamente 0.3 mm a partir da borda cisalhada. O Laser causa insignificante deformação nos grãos. A amostra referente à fotocorrosão possui uma borda de cisalhamento de aproximadamente 0.2mm, mas não se observa deformação plásticas em seus grãos.

Após a medição de parâmetros magnéticos, permeabilidade e perda magnéticas de amostras cortadas transversalmente e longitudinalmente por esses métodos de corte, conclui-se que as diferenças nos valores da perda magnética são pequenos, em torno de 10% ,mas em termos de desenvolvimento dos motores é bastante significativo. As diferenças quanto à permeabilidade podem chegar a 20%. Fotocorrosão e punção a frio apresentam-se como métodos de corte com menores quedas nas propriedades magnéticas(EMURA et al., 2003).

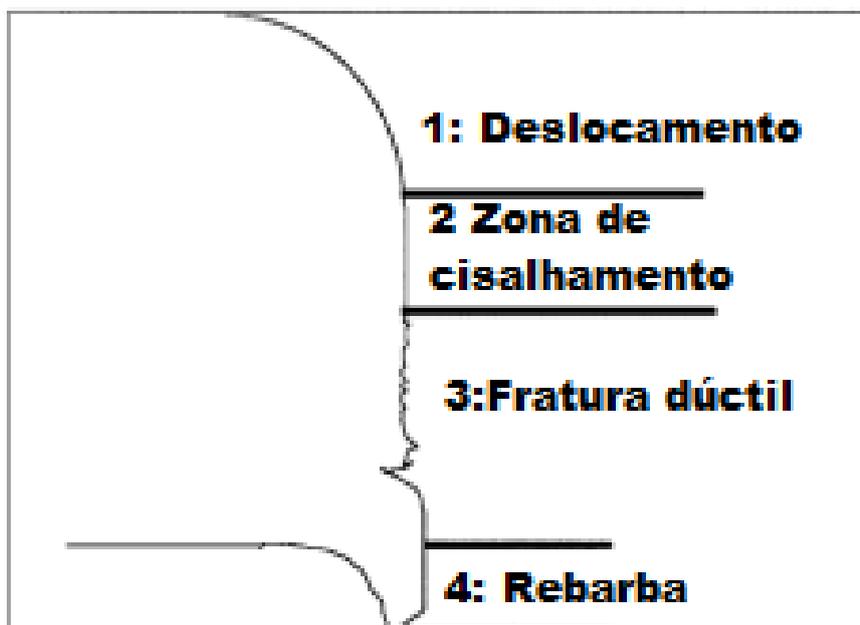
3.3.1 Guilhotina

A guilhotina é sem dúvida o um dos métodos de corte mais utilizados. O corte lamelar é feito através do cisalhamento entre as facas da máquina e a chapa.

Uma banda do equipamento fica estática e suporta o chapa enquanto a outra é considerada dinâmica. Pode-se dividir o evento do corte em quatro momentos. O primeiro evento é o deslocamento da placa dinâmica, levando ao movimento relativo entre as duas lâminas. Esse movimento leva ao segundo momento, que é quando a carga aumenta até que se atinja a carga máxima de cisalhamento do material fazendo com que se inicie a fratura, terceiro evento. A fratura ocorre de forma dúctil. O quarto e o último evento é a formação da rebarba que é a extensão da deformação plástica do material como forma de dissipar a energia absorvida pela carga (BOUDOUIN et al., 2003).

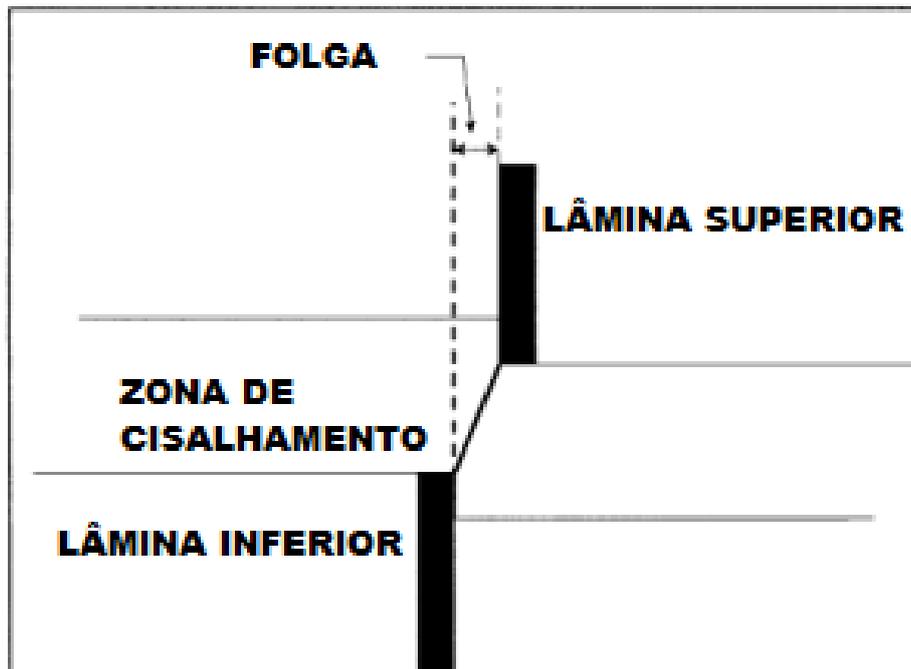
A figura 3 representa os eventos explicados acima. E a figura 4 os aspectos físicos importantes da máquina de corte.

Figura 3- Esquema dos eventos do corte de uma guilhotina



Fonte: BAUDOUIN P. ET AL, 2003

Figura 4 - Elementos físicos da guilhotina



Fonte: BAUDOUIN P. ET AL., 2003

A folga apresenta-se como uma variável extremamente importante para a operação cisalhante tanto na questão de tempo útil do ferramental como na qualidade da borda de corte. Definida como distancia medida horizontalmente entre as lâminas superiores e inferiores da guilhotina quando ambas estão em contato com a placa a ser cortada.

Uma folga ideal minimiza as deformações na chapa causadas pelo esforço do cisalhamento, melhora a qualidade superficial da borda de corte e diminui a carga necessária para a fratura. A fratura, nesse caso, inicia-se na borda das lâminas e se propaga para a chapa de metal e encontra com a lâmina inferior na parte central da peça, fornecendo assim uma fratura regular. Se a folga é muito pequena, a pressão hidrostática requerida cresce e com ela a energia associada ao cisalhamento nas lâminas. Como isso a fratura é retardada e ocorre de forma irregular. Em contrapartida, se a folga é muito grande tem-se maior tendência de formar rebarbas.(EMURA et al., 2003)

3.4 Propriedades magnéticas

O ferromagnetismo é resultado da estrutura eletrônica dos átomos. Tanto para um átomo isolado quanto para átomos inseridos numa estrutura cristalina, num máximo de dois elétrons

podem ocupar cada um dos níveis de energia. Esses dois elétrons têm spins opostos e quando girando em torno de si mesmo, é equivalente a uma carga se movendo, atuando assim como um magneto extremamente pequeno, com os correspondentes pólos norte e sul.

Como os átomos ferromagnéticos adjacentes se alinham mutuamente, de forma a terem suas orientações numa mesma direção, um cristal ou grão contém domínios magnéticos.

Em um material magnético desmagnetizado os domínios estão orientados ao acaso, de forma que seus efeitos se cancelam. Entretanto, se os domínios são alinhados por um campo magnético, o material se torna magnético. O alinhamento de todos os domínios em uma direção origina um efeito aditivo que pode ou não permanecer após a retirada do campo externo.(FILARDO, J.V. 2013)

Um campo magnético externo pode alinhar os domínios ferromagnéticos. Quando os domínios estão alinhados, o material está magnetizado. Para designar quando o alinhamento magnético é permanentemente retido ou não, são usados respectivamente os termos “materiais magnético duros” e “materiais magnético moles” como os materiais mecanicamente duros tendem a ser magneticamente duros, esses termos são adequados. As tensões residuais de um material endurecido evitam a redistribuição ao acaso dos domínios. Um material normalmente perde essa ordenação dos domínios magnéticos quando é recozido, já que a atividade térmica provoca a desorientação dos domínios.

De uma forma geral, o processo de magnetização de um material ferromagnético sob a influência de um campo externo se reduz ao crescimento daqueles domínios cujos momentos magnéticos formam o menor ângulo com a direção do campo e rotação dos momentos magnéticos na direção do campo externo.

A saturação magnética se alcança quando acaba o processo de crescimento dos domínios e os momentos magnéticos de todas as regiões imantadas espontaneamente estão na mesma direção do campo. (FILARDO, J.V. 2013)

3.4.1 Perda Histerética

O processo de magnetização de um material ferromagnético é caracterizado por suas curvas de magnetização $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$. \mathbf{B} (Tesla) é definida como a grandeza da indução magnética ou

densidade do fluxo magnético, que representa a intensidade do campo no interior de um material sujeito a um campo magnético externo e \mathbf{H} (A/m) é a grandeza que representa a intensidade do campo externo aplicado.

Tem-se a relação da equação (1):

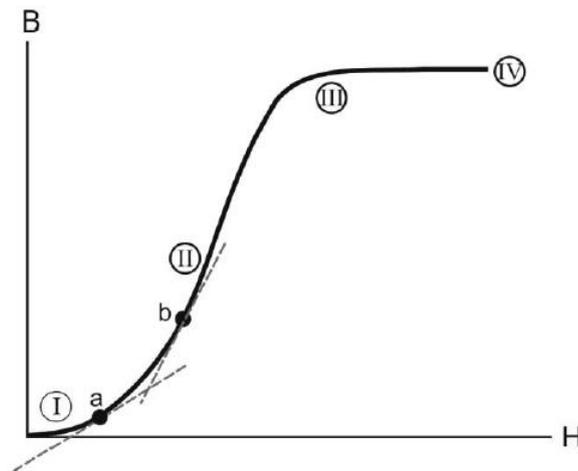
$$B = \mu \cdot H \quad (1)$$

Em que μ é a permeabilidade do meio considerado (H/m).

Geralmente essa não é uma função linear, ou seja, μ não constante, sendo necessário a análise do gráfico ($\mathbf{B \times H}$) para determinação de seu valor. Estas curvas variam consideravelmente de acordo com o histórico termo-mecânico do material. (FILARDO, J.V.2013)

A figura 5 é um gráfico típico do processo de magnetização de material magnético.

Figura 5- curva de magnetização típica de material magnético



Fonte: (NEVES; MÜNCHOW, 2013)

A região 1, indicada no gráfico acima, acontece o crescimento dos domínios que estão alinhados com o campo externo. Nessa etapa, se o campo externo for retirado, domínios voltam à situação original. Se \mathbf{H} for aumentado, atinge-se a região II em que há uma tendência de alinhamento de outros domínios com o campo externo. A partir desse ponto, o alinhamento torna-se irreversível, ou seja, o material permanece magnetizado mesmo se o campo externo for retirado. Na região III, a maioria dos domínios já está alinhada com o campo externo, de modo que é necessário um grande incremento de \mathbf{H} para se conseguir um discreto aumento de \mathbf{B} . Na região IV, todos os domínios da amostra estão alinhados com o

campo externo; portanto um aumento de H não produz qualquer alteração de B . Diz-se que, nesta situação, o material atingiu a **saturação magnética** (NEVES; MÜNCHOW, 2013)

Se a partir da saturação inicial o campo H passa a ser reduzido, a curva de magnetização não retorna seguindo seu trajeto original, produz-se um efeito de *histerese*, onde B se defasa em relação a H , ou diminui a uma taxa mais baixa. O efeito de histerese é gerado pela resistência à movimentação das paredes de domínio.

A grandeza da *remanência* (B_r) corresponde a indução magnética B residual na amostra após a retirada do campo já a *coercividade* (H_c) corresponde ao campo magnético H necessário para reduzir a indução magnética B no interior da amostra a zero. A área compreendida pela *curva de histerese* corresponde a uma perda de energia por unidade de volume, por ciclo de magnetização-desmagnetização, liberada na forma de calor.

Os aços elétricos de grão não orientado possuem dentre outras características favoráveis, grande tamanho médio dos grãos o que lhe faz ser considerado como um material magneticamente mole. Perde pouca energia, ou seja, possuem uma curva de histerese magra e por isso são usados em núcleos de transformadores. Apresentam alta permeabilidade inicial e baixa coercividade. (PTM, 2013)

Dentre fatores que aumentam a perda histórica do aço podemos destacar os tratamentos a frio, a adição de Carbono e imperfeições e impurezas presentes na liga.

3.4.2 Perdas por correntes parasita

Outro método de perda magnética é por correntes parasitas, ou corrente de *Foucault*. Ocorrem devido à produção de calor pela ação de correntes secundárias, ou parasíticas, que são induzidas no material magnético tendendo a se opor à variação da indução magnética. (NEVES; MÜNCHOW, 2013)

Pelo fenômeno da indução estudado por *Faraday-Lens* sobre a superfície da área da seção do material magnético se estabelecerão correntes elétricas. Possuem a liberdade de circular pela superfície do material, sendo a resistência elétrica do material seu único limitador.

Para uma redução das perdas magnética por corrente parasita e de energia por efeito Joule é recomendado que se reduza a espessura do material. Outras medidas incluem adição de Silício

a liga que provoca aumento da resistência elétrica do material e isolamento entre as lâminas do pacote magnético. (FILARDO, J.V.2013)

3.4.3 Perdas de excesso

Perdas de excesso, conhecidas também como perdas anômalas, são definidas como a diferença entre as perdas totais e a soma das perdas histeréticas e parasitas.

As perdas sejam elas históricas parasíticas ou de excesso dependem da metalurgia do material, particularmente da percentagem de silício, da frequência aplicada sobre o material, da espessura do material em um plano normal ao campo, da indução magnética máxima, pureza da liga e da orientação cristalográfica do material (CASTRO et al., 2013)

3.4.4 Fatores que favorecem as propriedades magnéticas de ligas de Fe-Si

Como já mencionado, são inúmeras variáveis que se deve levar em consideração para obter as propriedades magnéticas desejadas em concordância com a aplicação do material, ao qual podemos destacar: teor de silício e de alumínio na liga, histórico do processamento, textura, orientação cristalográfica, grau de impurezas e tamanho de grão.

A adição de Silício ao Ferro aumenta consideravelmente a resistividade da liga, portanto diminuem a perda do núcleo. O Silício diminui o ponto de saturação do Ferro, por ser um material não-magnético. Em contra-partida porém, do ponto de vista mecânico, o silício tende a fragilizar a liga metálica, diminuindo sua resistência mecânica. (ODA et al., 2008)

Sob uma outra perspectiva, Qin et al. (2015) avaliaram a queda significativa da histerese para os aços siliciosos pelo aumento no tamanho de grão. Quanto maiores os grãos, mais otimizada será a textura do aço. A melhoria na textura implica em maior quantidade de linhas de fluxo capazes de serem amplificadas ao irem do exterior para a superfície de um núcleo, em outras palavras, maior a permeabilidade magnética e menor a perda magnética.

Para se obter melhores propriedades magnéticas é desejado que o material seja submetido a um processo de recozimento, após aplicação de esforços mecânicos necessários a aplicação final. O material deve receber energia o suficiente para a nucleação de novos grãos em sua

microestrutura. É interessante que essa nucleação aconteça na direção favorável a magnetização do material, de modo a aumentar a quantidade de linha de fluxos amplificadas pelo núcleo da montagem. (DAFE et al., 2015)

3.4.5Quadro Epstein

As perdas magnéticas em campos alternados podem ser mensuradas por diversas formas. Dentre os aparelhos mais utilizados estão o quadro de Epstein, o Teste de Chapa Única (Single Sheet Tester, SST) e os métodos utilizando transformador toroidal.

Tanto o quadro Epstein quanto chapa única possibilitam o teste de várias amostras ao mesmo tempo e as amostras não exigem complexas preparações como no caso do teste toroidal, em que se deve confeccionar enrolamento para cada amostra.

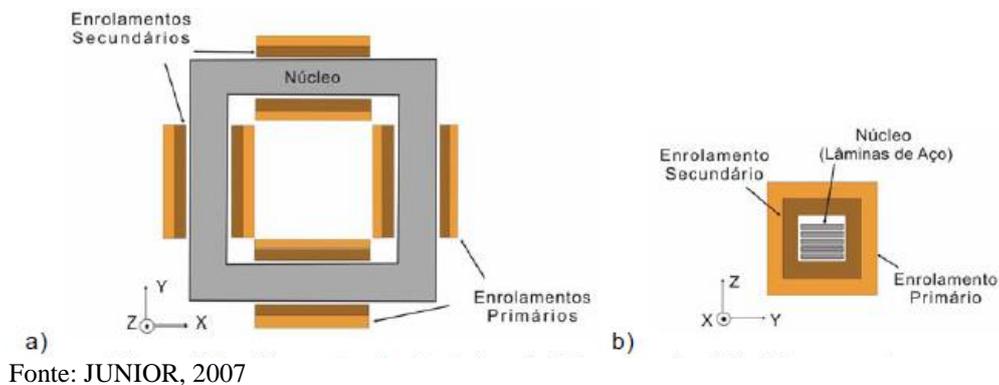
O teste de Epstein, por sua fácil reprodução, é o este mais utilizados, sendo os resultados comercialmente empregados como valores de referência. Como desvantagens, porém, pode-se citar o fato de não ser um ensaio homogêneo, pois a magnetização não-uniforme do material faz surgir cantos pequenos de entreferos que aumentam a relutância e para compensa-la cria-se uma tensão mecânica que altera as propriedades magnéticas da região, o tempo necessário para a preparação das amostras, a quantidade de lâminas necessárias e o desperdício do material.

Já o teste de chapa única, que possui a mesma metodologia e o mesmo esquema elétrico do quadro Epstein, possui vantagens entre as quais destacam: a facilidade da preparação das amostras, utilização de menor quantidade de material por ser uma chapa única e execução do ensaio tanto na direção transversal quanto na direção longitudinal do sentido de laminação. Porém, não apresenta boa reprodutibilidade como o quadro Epstein, as medições da perda magnética podem ser influenciadas pela tensão exercida pelo fechamento superior na amostra e pelo alinhamento dentro do aparato(MENDES, 2004).

A norma brasileira NBR 5161 e as principais normas internacionais indicam como referência o quadro de Epstein para a caracterização magnética de aço laminado.

O quadro de Epstein é um dispositivo eletromagnético que possui dois enrolamentos. O enrolamento primário é responsável pela geração do campo magnético (excitação) enquanto o enrolamento secundário pela medição do fluxo magnético induzido. O quadro é composto por quatro bobinas, ligadas em série, para cada enrolamento. As amostras de aço a serem caracterizadas são introduzidas no interior dos enrolamentos, formando o circuito magnético do dispositivo. Um exemplo do quadro Epstein está demonstrado na figura 6 (FILARDO, J.V. 2013)

Figura 6- Exemplo de um quadro Epstein em a) vista superior e b) vista lateral



O quadro de Epstein assemelha-se a um transformador em que as amostras de teste formam um núcleo magnético do transformador. Apresenta também um “indutor mútuo” para compensar o fluxo disperso no interior das bobinas, localizado no centro do espaço formado pelos enrolamentos. Os enrolamentos apresentam um total de 700 espiras e são recomendados para teste num intervalo de frequência de 25 a 400 Hz.

O comprimento efetivo para o caminho magnético é adotado convencionalmente como 0,94 m, para o quadro de 25 cm. Após ajustada a tensão no secundário, mede-se a tensão no secundário e a corrente no primário. Estes valores são utilizados para o cálculo da tensão eficaz, tensão média, potência, corrente de pico, perdas magnéticas e a permeabilidade magnética.

Outra relação importante é a razão entre a tensão eficaz e tensão média. O fator de forma (FF) é o parâmetro utilizado na correção das perdas devido à inserção de harmônicos como mostra a equação (2):

$$FF = \frac{U_2}{\bar{U}_2}, \quad (2)$$

U_2 = tensão eficaz medida no secundário do quadro Epstein;
 \bar{U}_2 = tensão média medida no secundário

Com esse FF, é possível calcular as perdas magnéticas de forma corrigida no material, dada pela equação (3):

$$P_c = \frac{P_t}{K_H + K_P \left(\frac{FF}{1,1107} \right)^2}, \quad (3)$$

sendo P_t as perdas totais, calculadas a partir dos valores medidos de corrente no primário e tensão no secundário, K_H e K_P são coeficientes obtidos no processo de separação das perdas totais em histerésicas e Foucault e 1,1107 corresponde ao fator de forma de uma função senoidal. As perdas específicas (perdas magnéticas) são obtidas dividindo-se a perdas totais da expressão pela massa efetiva da amostra (PEREIRA, A. Et al, 2010)

3.5 Caracterização microestrutural

O conhecimento dos aspectos microestruturais de um material é de fundamental importância para o conhecimento das suas propriedades mecânicas. A identificação da microestrutura de um material permite um controle melhor da qualidade do mesmo. Isso é feito pela metalografia que é o estudo das características estruturais ou da constituição dos metais e suas ligas, para assim relacioná-los com suas propriedades mecânicas, físicas ou químicas. Para se conseguir essa relação entre a estrutura observada, com auxílio de microscópio, deve-se seguir uma linha de procedimentos necessários ao exame metalográfico (COUTINHO, 1980). Diversas são as técnicas para a realização da análise microestrutural também conhecida pelo nome de micrografia. Em geral, o exame metalográfico é composto pelo corte do material a

ser estudado, pelo embutimento, pelo lixamento, pelo polimento, pelo ataque químico e pela análise ao microscópio.

O reativo químico utilizado para revelar a microestrutura de um material depende da composição química do mesmo, sendo comum o uso do Nital (álcool etílico e ácido nítrico em diferentes níveis de diluição) para os aços ao carbono e ferros fundidos, em geral, o Vilella (1g ácido pícrico, 5ml ácido clorídrico concentrado e 100ml álcool etílico PA) para os aços inoxidáveis ferríticos e o glicerrégia (10ml ácido nítrico, 20ml ácido clorídrico e 30ml glicerina) para os aços inoxidáveis austeníticos) e o Di-Cobre (65ml de ácido sulfúrico, 16g de dicromato de potássio, 3g de cloreto de sódio e 80ml água destilada) para as ligas de cobre (COUTINHO, 1980).

3.6 Tratamento térmico de recozimento

Tratamentos térmicos consistem em ciclos de aquecimento e de resfriamento controlados que são executados com o objetivo de alterar a microestrutura de um material e, conseqüentemente, as suas propriedades. Um dos tipos de tratamentos térmicos mais usados é o recozimento, sendo normalmente utilizado para eliminar os efeitos do trabalho a frio, isto é, para aumentar a ductilidade de um metal anteriormente endurecido por deformação.

O recozimento é um tratamento térmico no qual um material é exposto a uma temperatura elevada por um período de tempo prolongado, sendo então resfriado lentamente. Qualquer processo de recozimento consiste em três etapas: Aquecimento até a temperatura desejada, manutenção ou encharque do material nessa temperatura acompanhado por resfriamento, geralmente, até a temperatura ambiente (CALLISTER, 2002).

O recozimento em nível de estrutura cristalina e de propriedades do material encruado pode ser compreendido em três estágios principais: recuperação; recristalização; crescimento de grãos (CHIAVERINI, 1987).

A primeira etapa, recuperação, é verificada em temperaturas baixas. Ocorre um rearranjo das discordâncias, de modo a adquirir configurações mais estáveis e alívio nas tensões do

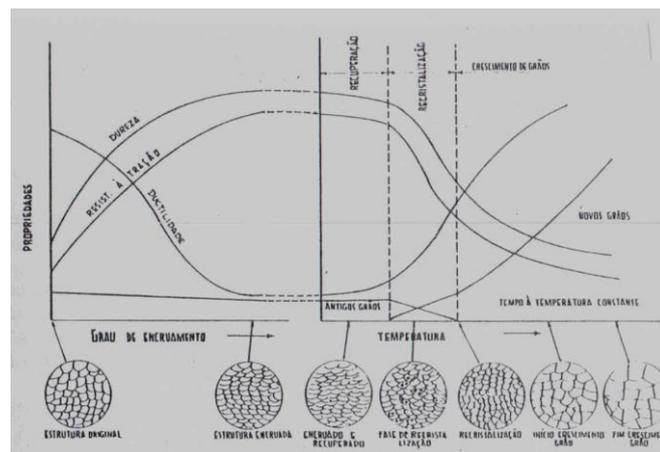
material. A não ser isso, nessa etapa não há sensível mudança estrutural nem sobre as propriedades dos materiais.

Na recristalização, que ocorre logo após a recuperação, portanto em temperaturas mais altas, há significativas mudanças na microestrutura do metal e com conseqüência variação nas propriedades mecânicas. Ocorre o surgimento de novos e pequenos cristais de composição e estrutura idêntica ou não aos grãos originais, ou seja, não há mudança de fase. Após um determinado tempo, estabiliza-se esse fenômeno.

O terceiro estágio, crescimento do tamanho de grão, ocorre nas temperaturas mais elevadas do processo. Os grãos recristalizados tendem a crescer, absorvendo parte dos grãos circunvizinhos. A força motriz desse crescimento é a energia superficial dos contornos de grão dos grãos recristalizados (CHIAVERINI,1987).

Na figura 7, temos uma representação esquemática do ciclo de encruamento-recristalização, indicando os efeitos sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas do material. Encruamento é um fenômeno no qual um material endurece devido à deformação plástica. Ocorre devido ao aumento de discordâncias e imperfeições promovidas pela deformação, que impedem o escorregamento dos planos atômicos.

Figura 7- Representação esquemática do ciclo encruamento-recristalização



Fonte: (CHIAVERINI, 1987)

O recozimento tem a capacidade de recuperar as propriedades magnéticas de amostras de aço GNO que se degradaram após deformação plástica heterogênea devido ao corte. Acredita-se que além de minimizar os níveis de stress aplicado, o recozimento favorece a formação de

óxidos superficiais e nitretos aumentando o grau de inclusões da liga do aço GNO, o que favorece as propriedades magnéticas da liga (EMURA et al., 2013)

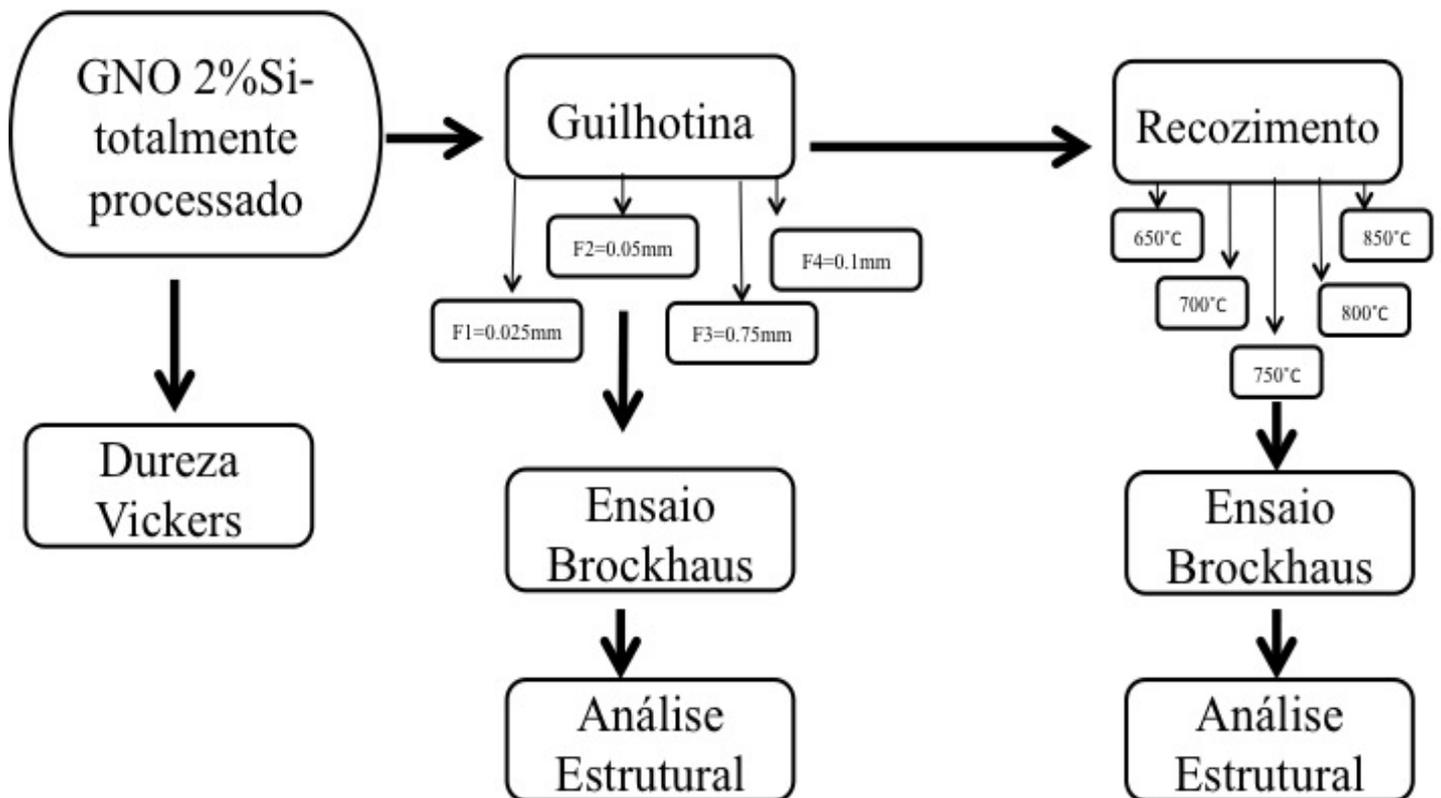
A influência do tamanho de grão, determinado pelas condições de tratamento térmico é considerado um fator de maior relevância quando se analisa degradação de propriedades magnéticas após deformação plástica gerada pelo corte. Sobre o teor de Silício e método de corte (RYGAL,R .et al.,2000)

4 METODOLOGIA

4.1 Fluxograma do processo

O fluxograma representado na figura 8 contém as etapas e a seqüências das atividades propostas e executadas para a parte experimental do trabalho. F1, F2, F3 E F4 são abreviações para as folgas utilizadas no trabalho, respectivamente F1= 0.025mm, F2= 0.05mm, F3= 0.075mm e F4= 0.1mm.

Figura 8-Fluxograma do processo experimental do trabalho



Fonte: Autor

4.2 Material

As amostras do aço GNO para a realização do presente trabalho serão fornecidas no estado totalmente processados sem revestimento pela empresa *Aperam Inox South America S.A*, localizada em Timóteo-MG. Foram fornecidas amostras com percentual teórico de 2% de silício. A composição química está registrada na figura 9.

Figura 9- Composição química GNO como recebido

C	0,002%
N	0,002%
Mn	0,4%
Si	2%

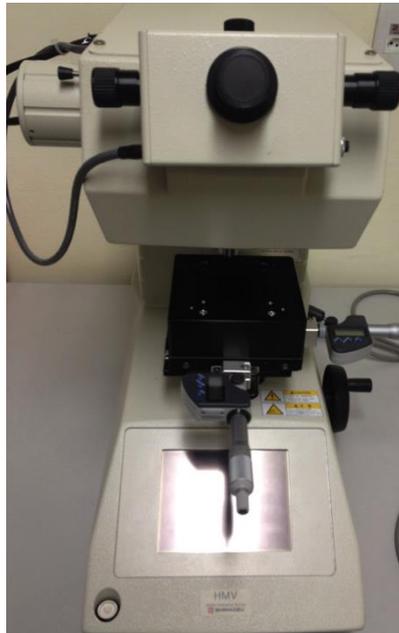
Fonte: APERAM 2015, catálogo técnico

4.3 Caracterização Mecânica

4.3.1 Microdureza

O ensaio de microdureza Vickers foi usado para caracterizar o material em seu estado como recebido. Foi realizado no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT), do CEFET-MG Campus I. Com o equipamento marca *Shimadzu*, modelo HMV. A carga empregada será de 0.3gf. O equipamento pode ser visto na figura 10.

Figura 10- Equipamento utilizado para microdureza



Fonte: Autor

A dureza está para o presente estudo como um parâmetro de propriedade mecânica do material.

4.4 Método de corte

O método de corte adotado foi a guilhotina hidráulica Calvi, modelo *QC11YU-673100*, Potência de 8,5 KW, corrente 34/17. A com capacidade máxima para corte em chapas de 6 mm, localizada na empresa Metalchapas, da cidade de Belo Horizonte-MG. Uma foto do equipamento é apresentada na figura 1.

Figura 11- Guilhotina utilizada no trabalho



Fonte: Autor

As chapas de aço GNO no estado como recebido, 2% de Silício, totalmente processado foram cortadas com quatro diferentes folgas da guilhotina, mensuradas pelo relógio de medição da máquina de corte.

A determinação dos valores da folga obedeceu à relação percentual entre folga e espessura da chapa. A primeira folga corresponde a 5% do valor da espessura, a segunda 10% da espessura

a terceira 15% e a quarta 20%. Sendo a espessura teórica da chapa igual a 0.5mm, F1=0.025mm; F2=0.05mm; F3=0.075mm e F4=0.1mm.

Logo após o corte, as amostras foram submetidas a preparação metalográfica e digitalização da borda de corte. Esses registros serão essenciais para se qualificar a grandeza de deformação plástica heterogênea nas amostras.

4.5 Tratamento térmico no aço GNO

Os tratamentos térmicos de recozimento conduzidos neste trabalho foram realizados no centro de pesquisa da empresa *APERAM South America*. O forno marca *Combustol*, modelo MV 100 está indicado na figura 12. A atmosfera do forno foi controlada com 90% Hidrogênio e ponto de orvalho inferior a 15%. O tempo de encharque para todas foi de 1h. O resfriamento foi ao forno. O tempo total do recozimento foi em média, 24h: 10h de aquecimento, 14h de resfriamento para todas as amostras. As temperaturas máximas atingidas foram cinco, de 650°C a 850°C numa escala de 50°C. As amostras foram divididas em 5 grupos, cujo critério são folga e a temperatura máxima atingida no tratamento térmico. Os grupos terão duplicatas de amostras para as temperaturas especificadas. Por exemplo, o primeiro grupo conterá 8 amostras: atingiram a temperatura de 650° C para as folgas F1, F2, F3 e F4 em duplicatas. Já o grupo 2 atingirá a temperatura de 700°C para as folgas F1, F2, F3 e F4, amostras também em duplicatas. Assim, tem-se ao final duas amostras de Si 2% para cada temperatura e folga.

Figura 12- Forno de tratamento térmico



Fonte: Auto

4.6 Caracterização magnética

O histeresímetro *Brockhaus Messtechnik*, por meio do método do quadro de Epstein, foi utilizado para a determinação das propriedades magnéticas: permeabilidade magnética e perda magnéticas das amostras GNO, totalmente processado, sem revestimento em condições diversas do corte da guilhotina e temperatura de recozimento.

Os testes foram realizados no centro de pesquisa da empresa *APERAM Inox*. A figura 13 mostra o equipamento utilizado. Nota-se uma balança acoplada ao equipamento, que permite o cálculo da espessura durante o teste.

Figura 13- Máquina utilizada para ensaio Brockhaus



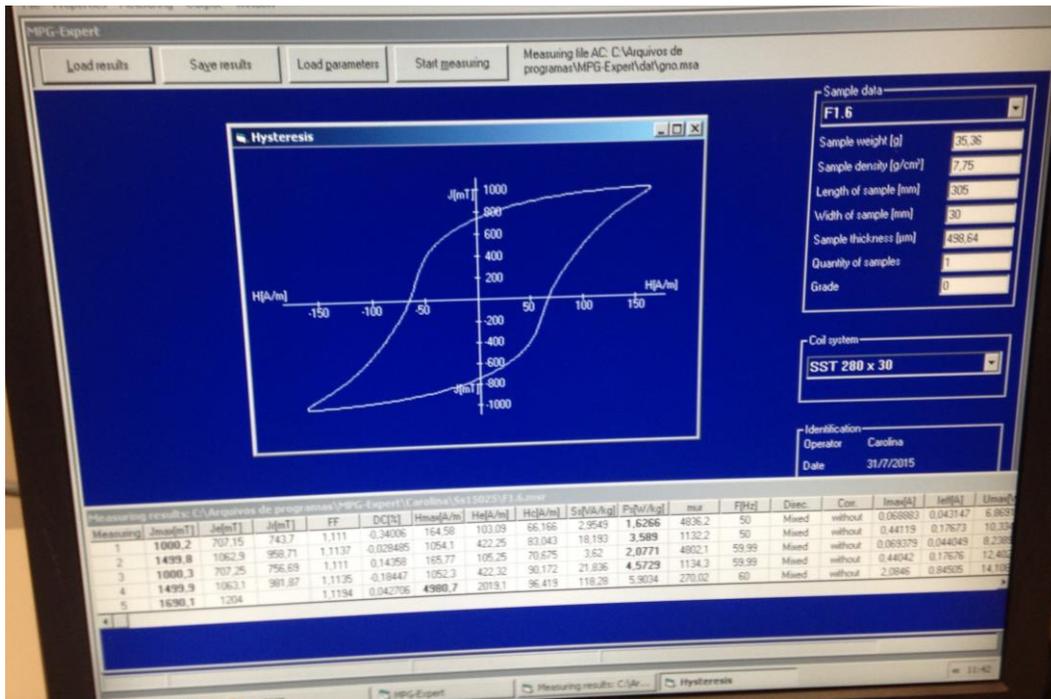
Fonte: Autor

Todas as amostras tiveram o corte longitudinal ao sentido de laminação. Para se calcular a perda total, variou-se a indução magnética e manteve-se a frequência fixa. A frequência de 50 Hz e indução de 1000 mT e 1.500 mT. Frequência de 60 Hz e indução de 100mT e 1.500mT, para o segundo e terceiro parâmetro do teste. Para o último parâmetro manteve-se constante o campo aplicado: 5.000 A/M e frequência de 60Hz.

A densidade considerada do aço GNO adotada para o cálculo da espessura foi de $7,75\text{g/cm}^3$. Serão testadas as amostras no estado como recebido para se criar um parâmetro inicial das propriedades, as amostras após corte nos quatro diferentes tamanhos de folga e as amostras após serem submetidas ao tratamento térmico de recozimento em temperaturas que variam em 50°C de 650°C a 850°C . Ao final obteve-se informações sobre as características magnéticas finais em função de diferentes condições de corte e tratamento térmico.

A figura 14 ilustra o software *Mpg Expert* em que se é possível visualizar as 5 diferentes condições dadas como entrada e os resultados relacionados, que ao final do ensaio são exportados para o programa Excel.

Figura 14- Software Mpg Expert



Fonte: Autor

A porcentagem da perda magnética foi um parâmetro utilizado para as análises de melhoria e depreciação da propriedade de perda magnética, como indicado pela equação (4):

$$\% \text{ Perda magnética} = \frac{\text{Perda antes T.T} - \text{Perda após T.T}}{\text{Perda antes T.T}} \quad (4)$$

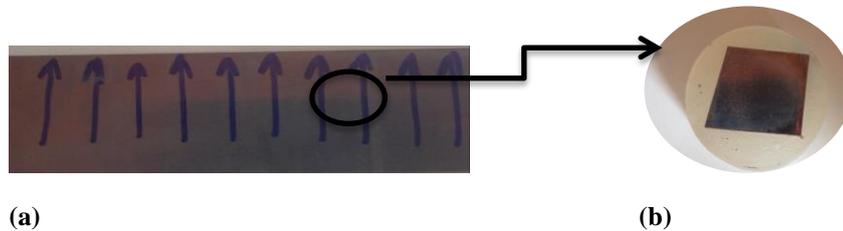
É válido ressaltar que, em termos de propriedade, é interessante que o material apresente o maior valor percentual da perda magnética, pois um valor positivo indica que a perda após tratamento térmico é menor do que a perda antes do recozimento. Já uma piora na propriedade, ou seja, perda magnética após tratamento térmico maior que perda magnética antes do recozimento é apontado com um valor negativo do percentual. Buscou-se então percentual alto nas análises dos resultados.

4.7 Caracterização estrutural

Os ensaios metalográficos foram feitos no laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia de Materiais, CEFET-MG. As amostras foram submetidas ao processo de corte, embutimento, lixamento, polimento, ataque químico e digitalização.

As amostras foram divididas em dois grupos quanto ao corte. As análises para microestrutura para o material no estado como recebido foram cortadas longitudinalmente no sentido de laminação(a) e as micrografias foram retiradas do centro da imagem(b). A figura 15 explicita tal corte.

Figura 15- a) Região utilizada para análise estrutural do material como recebido e seu b) embutimento

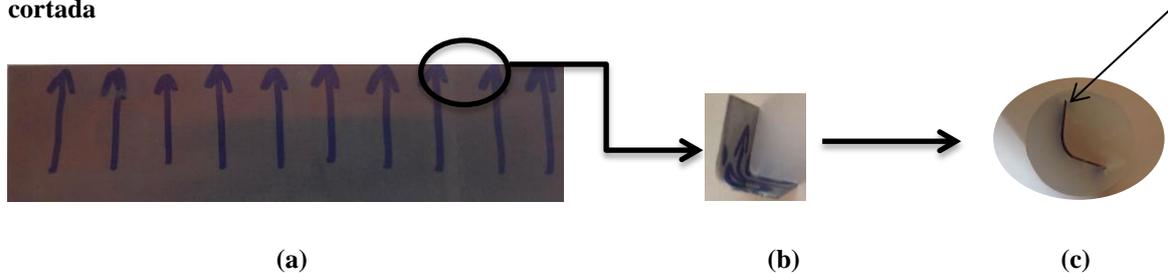


Fonte: Autor

Já as amostras que foram cortadas com diferentes valores de folga para se verificar formato e microestrutura das rebarbas geradas também foram cortadas longitudinalmente, figura 16 (a), dobradas transversalmente, 16 (b).

Em seguida, a amostra foi embutida a frio com acrílico auto-polimerizante, copolímero Metil-Etil Metacrilato, lixadas, polidas e atacadas para então se observar a região da aresta de corte, indicada pela seta na figura 16(c) sendo observado de modo que o embutimento permitisse a visualização da aresta do corte.

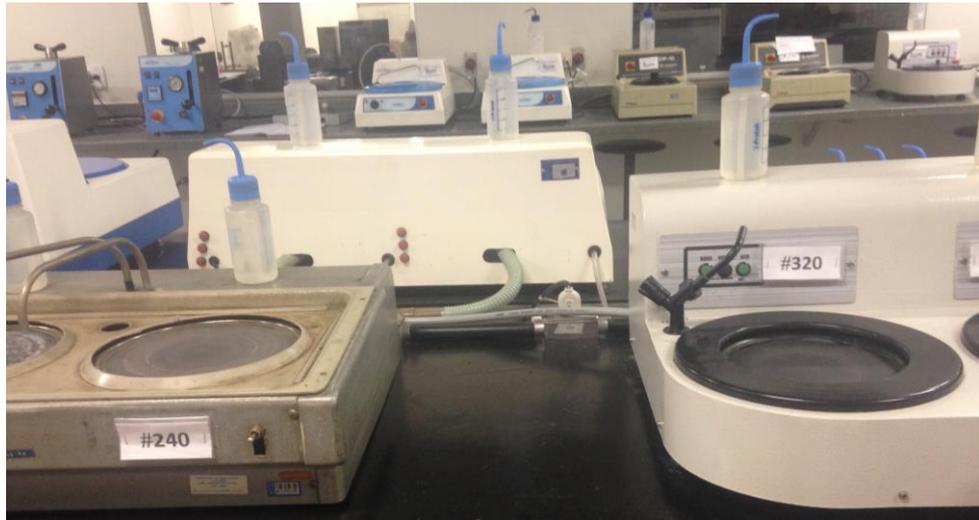
Figura 16- (a) região retirada para corte, (b) amostra cortada e dobrada e (c) embutimento da amostra cortada



Fonte: Autor

As amostras, após embutidas foram submetidas as lixas de # 120, #240, #320 #400 #600 e #1000. A fotografia 17 explicita algumas das lixas utilizadas. O lubrificante utilizado foi o álcool etílico.

Figura 17- Lixas utilizadas durante processo metalográfico



Fonte: Autor

O polimento foi realizado com o auxílio de um abrasivo pasta de diamante nas politrizes para as correspondentes granulometrias: 9 μm , 3 μm e 1 μm , como mostra a figura 18. Entre os panos de polimento foram feitas limpeza da amostra com uso de água e detergente para evitar o acúmulo de sujeira. Em seguida, a secagem das amostras embutidas foram realizadas com o auxílio de álcool etílico.

Figura 18- Politrizes usadas para metalografia com granulometria de (a) 3 μm e (b) 9 μm



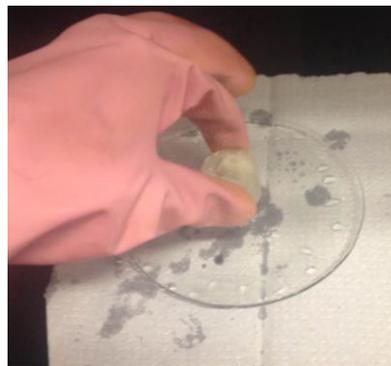
(a)

(b)

Fonte: Autor

O Ataque químico foi realizado com o reagente Nital 3 % (97ml de álcool etílico + 3ml de ácido nítrico), pelo método de imersão por 26 segundos com auxílio do vidro de relógio. A figura 19 ilustra o procedimento.

Figura 19- Ataque químico para revelação da microestrutura



Fonte: Autor

O microscópio ótico usado para a digitalização foi da marca *Fortel* com câmara acoplada de ampliações de 100X, 200X, 400X e 1000X. A figura 20 é uma foto do equipamento usado.

Figura 20- Microscópio ótico usado para análise metalográfica



Fonte: Autor

As amostras do aço GNO caracterizadas microestruturalmente incluem aquela na condição como recebido, cortadas pela guilhotina e amostras tratadas termicamente após corte em diferentes temperaturas finais.

A escolha das amostras para análise metalográfica após corte e tratamento térmico levaram em consideração o resultado das propriedades magnéticas. Ensaios metalográficos foram realizados para aquela condição em que se obteve um maior valor percentual da perda magnética e também para a amostra cuja condição foi de menor perda percentual, ou seja, depreciação da propriedade após tratamento térmico. As escolhas das amostras e suas análises foram cruzadas com o resultado do ensaio Brockhaus.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização mecânica: estado como recebido

Material como recebido, cortado a 90° da direção de laminação apresentou uma microdureza de 163, 3 HV.

5.2 Caracterização estrutural do material como recebido

As propriedades magnéticas da matéria, entre outros fatores sofrem forte influência da composição química, tamanho de grão, condições de processamento, textura cristalográfica do material e condições de processamento(DAFE et al., 2015).

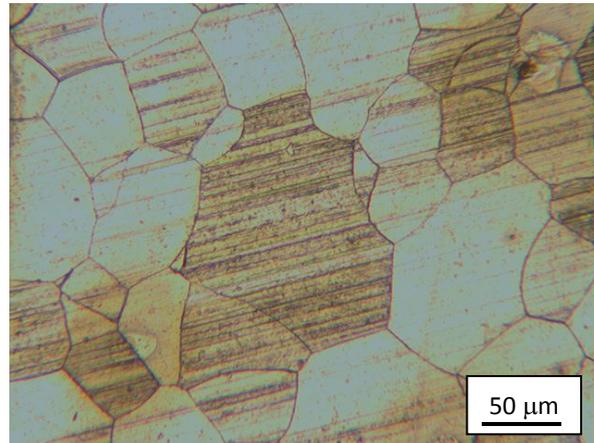
Para o presente estudo, as variáveis consideradas e correlacionadas com propriedade magnética foram tamanho de grão, controlado pela temperatura de tratamento térmico, e diferentes condições de processamento, pela variação na folga da guilhotina.

A análise estrutural faz-se de extrema importância para que os parâmetros associados a propriedade magnética possam ser avaliados.

As amostras do aço de grão não orientado, totalmente processado possuem baixo teor de Carbono, sendo uma solução sólida de elementos de liga e Carbono, em Ferro α , estrutura ferrítica (CALLISTER, 2002).

A figura 21 apresenta a fotomicrografia do aço GNO no estado como recebido, exibindo apenas ferrita. Essa figura foi utilizada como referencia para a investigação da ocorrência de recristalização e crescimento de grão nas amostras que foram cortadas e tratadas termicamente.

Figura 21- Fotomicrografia GNO 2% de Silício ampliação de 200X



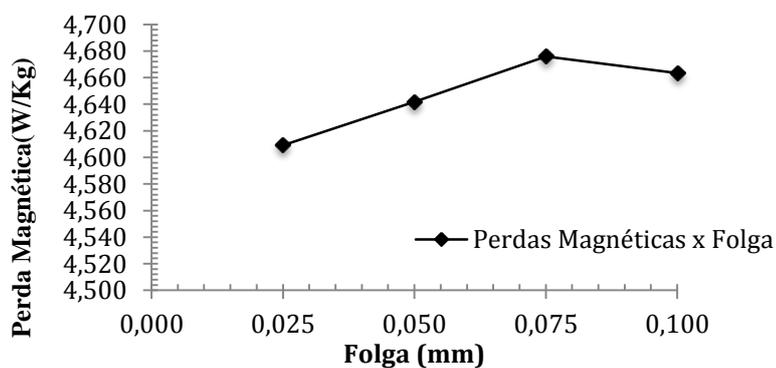
Fonte:Autor

É possível também verificar pela figura, numa análise qualitativa, o tamanho de grão relativamente grande, condição necessária para garantir as boas propriedades magnéticas do material.

5.3 Caracterização magnética do estado como recebido

Após a coleta dos dados pelo software MPG Expert, acoplado a máquina de ensaio Brockhaus Messtechnik com o auxílio do Excel foi possível plotar o gráfico relacionando as diferentes folgas da guilhotina (F1= 0.025mm; F2= 0.05mm, F3= 0.075mm e F4= 0.1mm) com a perda magnética (W/ Kg), para amostras que não passaram por alguma condição de tratamento térmico. O gráfico foi plotado utilizando-se uma média aritmética de todos os valores referentes a uma mesma condição, frequência de 60hz e 1500mT de indutância, figura 22.

Figura 22- Folga da guilhotina X Perda Magnética



Fonte: Autor

Pode-se verificar que há uma tendência no gráfico: aumento da perda magnética com a folga utilizada para corte da guilhotina. A perda atinge seu valor máximo para a folga número 3, correspondente a 0.075mm: 4,676W/Kg. Há uma leve diminuição da perda para a folga 4, 0.1mm, para o valor de 4,663W/Kg.

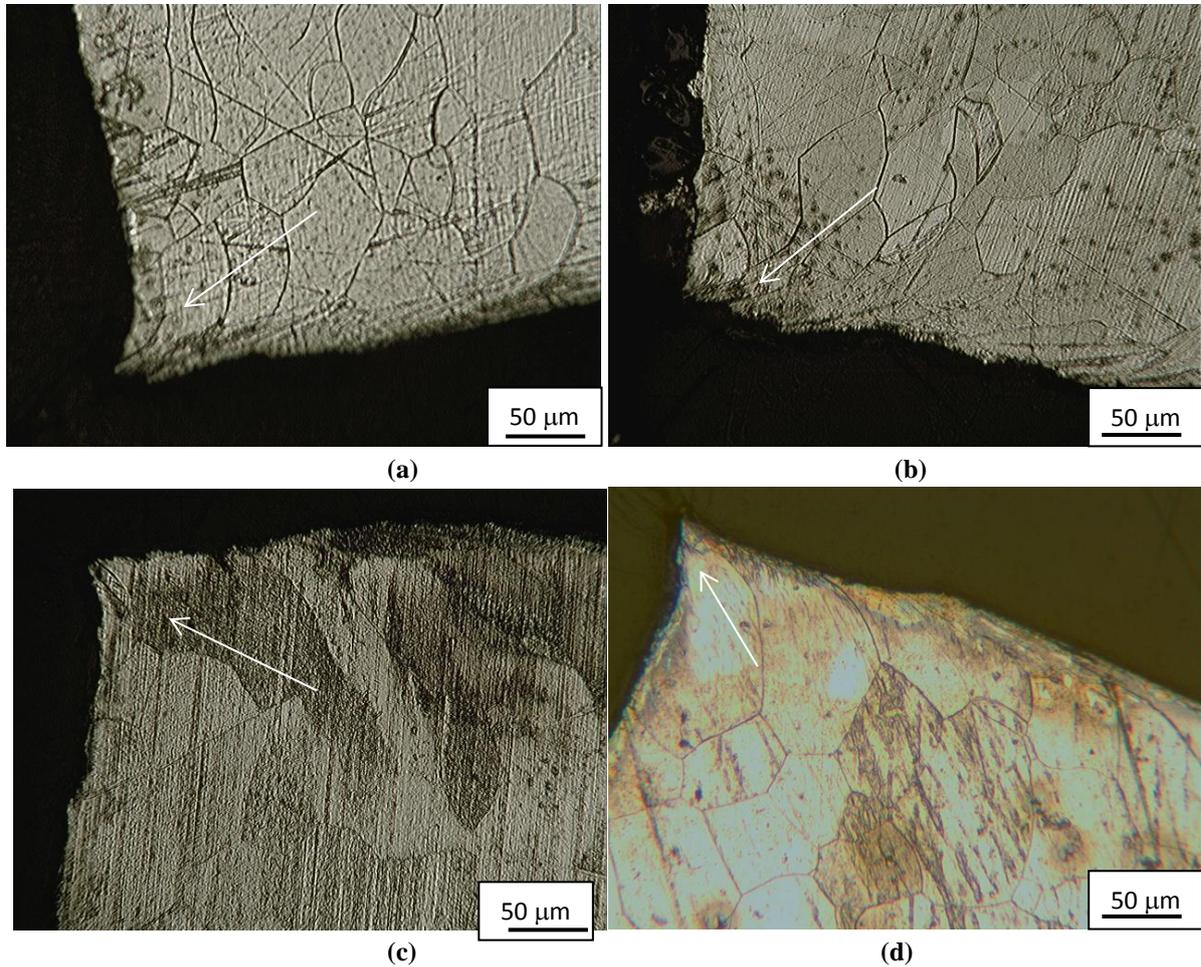
As amostras coletadas aleatoriamente para as medições da folga 3, 0.075mm, podem apresentar uma microestrutura mais irregular, com imperfeições mais evidentes que tornam tal condição mais favorável a perda quando comparamos com as amostras cortadas com a folga 4, 0.1mm. A quebra na tendência entre as folgas 3 e 4 pode ser atribuída a heterogeneidade da microestrutura das amostras geradas pelo método de corte, em termos de tamanho de grão e, possivelmente, devido ainda a variação cristalográfica do material..

O aumento da folga implica em aumento na deformação plástica das amostras o que acarreta uma piora nas propriedades magnéticas por gerar uma microestrutura mais irregular, com menor capacidade de aumentar fluxo magnético em função do tempo. O resultado é um valor de perda magnética mais elevado (PEKSOZ et al., 2013).

5.4 Caracterização estrutural após os cortes

Após submetidas ao corte pela guilhotina na empresa Metalchapas, quatro amostras foram selecionadas para a preparação metalográfica e consequente análise estrutural. A figura 23 representa as microestruturas encontradas.

Figura 23- Micrografia do perfil das arestas submetidas ao corte para 200X de ampliação par as folgas a) F1= 0.025mm b) F2= 0.05mm c) F3=0.75mm e d) F4= 0.1mm



Fonte: Autor

Observa-se que há uma relação entre folga da guilhotina, deformação plástica heterogênea e formato da aresta submetida ao corte.

Segundo a literatura, á medida que se aumenta a folga da guilhotina, obtém-se maior deformação plástica, sem a mesma mais heterogênea e acentuada. Segundo BOUDOUIN, *et al.*(2003), a deformação plástica do material será apresentada tanto na seção transversal ao corte quanto ao longo da espessura da chapa, o que justifica a forte influencia em suas propriedades magnéticas.

Porém, segundo a análise das metalografias não ficou tão evidente que as arestas submetidas ao corte ficaram tão mais irregulares em relação ao seu formato quando se aumentou folga da máquina de corte, como indicado pelas setas das figura 23.

É possível visualizar presença de uma rebarba pontiaguda, o que é um indicativo de uma deformação plástica devido o maior esforço aplicado ao material, porém métodos matemáticos mais avançados devem ser aplicados para uma quantização mais apurada do grau de deformação sob as amostras.

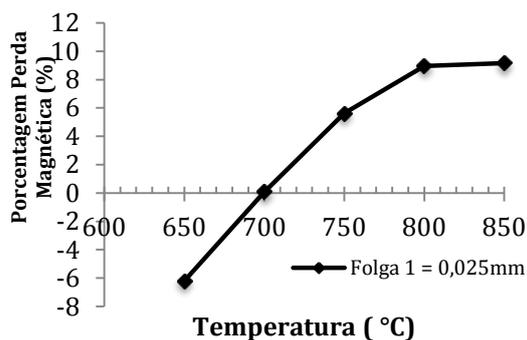
5.5 Caracterização magnética em função do tratamento térmico

Os gráficos da figura 24 (a), (b), (c) e (d) foram os resultados encontrados para as amostras submetidas ao corte e ao tratamento térmico para a condição de 60hz de frequência e indutância de 1500mT .

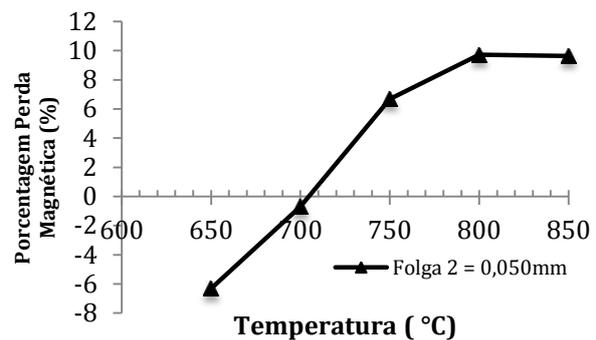
Para uma análise mais criteriosa, dividiu-se os resultados de forma a manter a folga fixa, variando assim percentagem da perda magnética em função da temperatura de recozimento.

Para uma visualização mais global, plotou-se o gráfico da figura 25, em sequência.

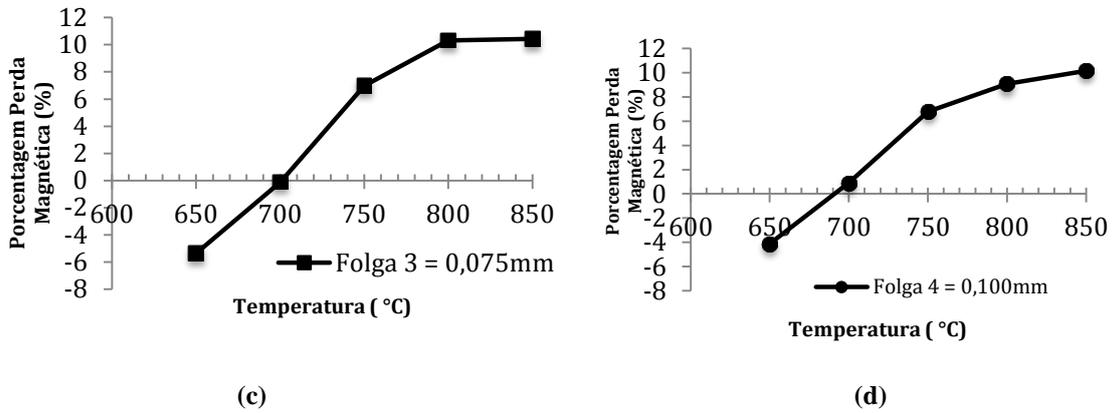
Figura 24- Percentagem da perda magnética X Temperatura de recozimento para a) Folga 1= 0.025mm, b) folga 2= 0.05mm, c) folga 3= 0.075mm e d)folga 4= 0.1mm



(a)

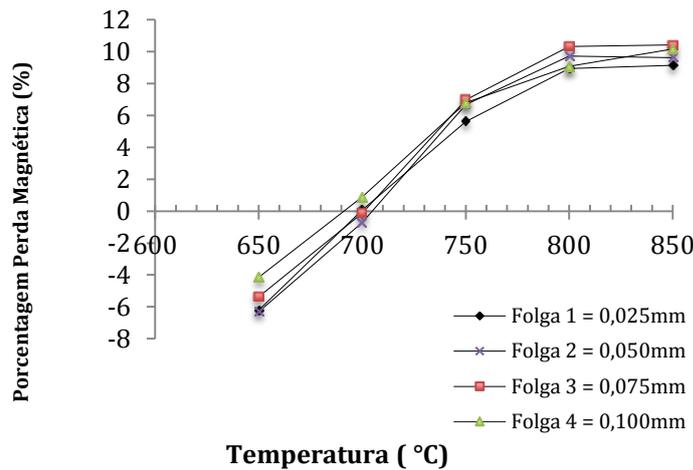


(b)



Fonte: Autor

Figura 25- Temperatura de recozimento X Porcentagem de perda magnética X Folga de corte



Fonte: Autor

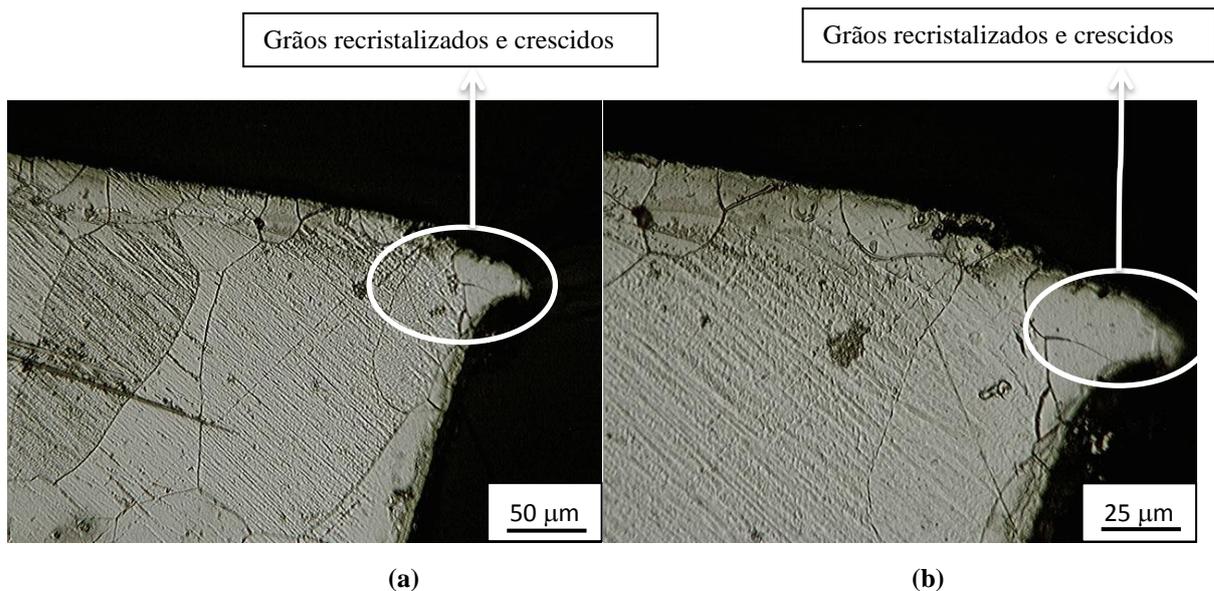
Pela análise dos gráficos das figuras 24 e 25 é possível apontar as condições que se obteve a melhoria mais considerável da propriedade de perda magnética e a depreciação (queda) mais acentuada na perda. A condição: folga4=0.1mm, temperatura de recozimento de 800°C apresentou uma maior porcentagem da perda magnética, ou seja, a propriedade de perda magnética diminui mais consideravelmente após recozimento. Por um outro lado, a condição de folga2=0.05mm, temperatura de recozimento de 650°C, apresentou pior percentual da perda uma vez que a tratamento térmico aumentou a perda magnética significativamente, sendo isso relacionado com a variação da granulometria do material.

5.6 Caracterização estrutural em função do tratamento térmico

Após resultado das propriedades magnéticas em função da temperatura e folga da guilhotina, foram selecionadas as amostras na melhor condição em termos de propriedade magnética e a pior condição para uma análise estrutural, respectivamente F.2.1 (Folga 2= 0.05mm, $T_{\text{recozimento}}= 650^{\circ}\text{C}$) e F.4.81 (Folga 4= 0.1mm, $T_{\text{recozimento}}= 850^{\circ}\text{C}$).

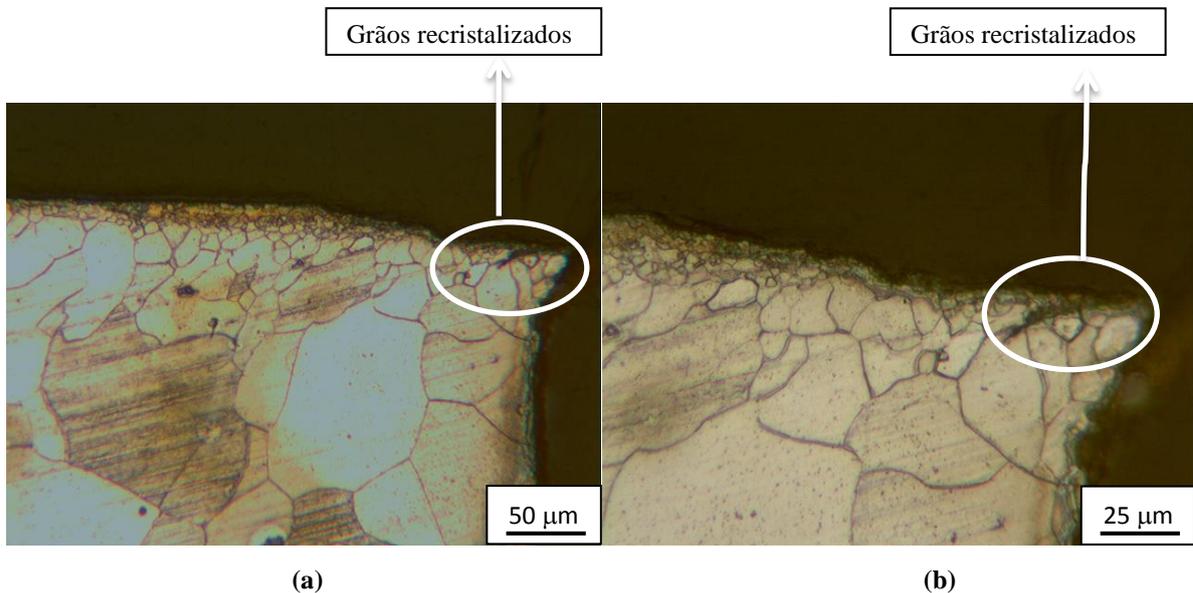
As figuras 26 (a) e (b) são fotomicrografias, com ampliação diferentes da amostra na melhor condição, maior aumento no percentual de perda magnética, F.4.8 e a figura 27 (a) e (b) são referentes a amostra 2.1, pior condição.

Figura 26- Micrografia para a amostra F.4.8 para um aumento de a) 200 X e b) 400X.



Fonte: Autor

Figura 27- Micrografia para a amostra F.2.1 para um aumento de a) 200 X e b) 400X.



Fonte: Autor

A análise das figuras 26 (a) e (b) sugere que a temperatura de 650°C proporcionou a recuperação da microestrutura, com alívio de tensão bem como o início do processo de recristalização na borda de corte. Porém, a energia associada a temperatura não foi suficiente para que o processo de recristalização se completasse e o crescimento dos grãos ocorresse. Observa-se também que quando comparado a amostra antes do recozimento, representado pela micrografia da figura 23 (b), ainda há uma quantidade considerável de deformação heterogênea e um formato irregular em relação ao tamanho de grão da amostra submetida ao corte.

As figuras 27 (a) e (b) indicam que para a temperatura de 800°C houve as fases de recuperação, recristalização e crescimento dos grãos, uma vez que a microestrutura apresenta grãos maiores, mais homogêneos e com um menos aspecto de deformação plástica localizada, principalmente quando a comparamos com as micrografias antes do recozimento, figura 23(d).

Os resultados apresentados encontram-se em concordância com a teoria relacionada à propriedades magnéticas, condições de processamento e ciclo do tratamento térmico. (EMURA et al., 2003)

Pode-se considerar que a deformação plástica decorrente do corte da guilhotina é localizada, mais acentuada nas bordas, as chamadas rebarbas. Porém, é capaz de influenciar negativamente as propriedades magnéticas da chapa como um todo, como foi mostrado pelos gráficos das figuras 24 e 25.

O recozimento é capaz de recuperar as propriedades magnéticas do material deformado plasticamente a frio, não apenas por eliminar a quantidade de tensões internas mas também por introduzir ao material uma melhor textura cristalográfica, favorável as linhas de fluxo aplicados ao material. Essa melhor textura é obtida pelo processo de nucleação e crescimento dos grãos (EMURA et al., 2003).

A deterioração na propriedade magnética, para a condição da temperatura de 650°C está ligada ao ciclo de tratamento térmico não completo. É possível observar uma microestrutura ainda muito irregular, heterogênea quando comparada a temperatura de 800°C, por exemplo. Essa condição funciona como barreira as linhas de fluxo magnéticos ao penetrarem o material. Com isso o aumento no fluxo magnético no núcleo da montagem fica comprometido, aumentando a perda magnética para as amostras em tal condição .

Os estágios de nucleação e crescimento de grãos em determinadas orientações cristalográficas numa estrutura previamente deformada, favorecem a magnetização do material, o que é representado em termos de propriedade por aumento da permeabilidade magnética e conseqüentemente aumento da perda percentual. (DAFE, Sara et al.,2015).

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou as propriedades magnéticas do aço de grão não orientado (GNO) em função de diferentes condições de processamento, representado pela variação na folga da lâmina de corte da guilhotina, em quatro diferentes valores: 0.025mm, 0.05mm, 0.075mm e 0.1mm.

As amostras foram também submetidas a análise da influência do subsequente tratamento térmico de recozimento. Cinco temperaturas progressivas foram escolhidas: 650°, 700°, 750°, 800° e 850° e fotomicrografias permitiu associar processamento, microestrutura e propriedade magnética, essa última representada pela perda magnética (W/Kg) e perda magnética percentual mensuradas pelo ensaio Brockhaus.

Após execução dos experimentos, foi possível concluir que:

- a) A variação na folga da guilhotina provocou mudanças na microestrutura das amostras, porém não se pôde verificar uma forte tendência dessas serem mais heterogêneas e irregulares à medida que se aumenta a folga da guilhotina, quando comparada a microestrutura do estado inicial do material. Métodos mais precisos de análises estrutural devem aplicados para se obter a tendência em relação ao aumento da folga com deformação plástica localizada.
- b) O tratamento térmico exerceu sobre as amostras uma maior influência do que a variação na folga da guilhotina que foi representado por uma variação mais considerável dos resultados da propriedade magnética e conseqüentemente perda magnética melhor mensurada.
- c) A melhor condição encontrada, diminuição considerável na perda magnética foi para a amostra cortada com a maior folga, 0.1 mm e recozida a 800°C;
- d) A pior condição encontra foi aquela que houve aumento mais considerável na perda magnética foi para a condição de corte folga=0.05mm e recozida a 650°C.

- e) As micrografias sugeriram que a amostra com propriedade magnética mais desejável, cuja perda após recozimento foi menor, apresentou uma microestrutura com grãos maiores, mais homogêneos quando comparada a microestrutura do material como recebido.

- f) A amostra com a mais considerável piora na propriedade magnética de perda magnética apresentou uma microestrutura irregular, heterogênea quando comparada ao estado inicial do material.

Existe um tamanho de grão ótimo em que a perda magnética é minimizada. A nucleação, quando estabelecida em uma direção cristalográfica favorável, favorece a magnetização do material, facilitando a passagem de linhas de fluxo, o que é representado pela diminuição da perda histerética, aumento percentual da perda magnética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BACALTCHUK, C. M. B. et al. High magnetic field effect on texture and grain growth of GNO silicon steel. **Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik**, Alemanha, v. 36, n. 10, p.561-565, out. 2005
- BOUDOUIN, P. et al. The effect of the guillotine clearance on the magnetic properties of electrical steels. **Journal Of Magnetism And Magnetic Materials**, Ghent, Belgica, v. 256 , p.32-40, 2003.
- CALLISTER, W.d. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltd, 2002. 589 p.
- CASTRO, N. A. et al. **Pó de ferro microencapsulado: efeito do tratamento térmico de recozimento na redução das perdas magnéticas**. Trabalho apresentado no 57º Congresso Anual da ABM - 22 a 25 de julho de 2002 – São Paulo. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/landgraf/nossos%20artigos%20em%20pdf/02cas%20a%20bm%20microencaps.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2015.
- CHIAVERINI, V. Tratamento térmico das ligas ferrosas. São Paulo: Editora da ABM, p 51-44, (1987).
- COUTINHO, T. A. Metalografia de Não-Ferrosos. São Paulo: Edgard Blucher, 1980, 158p.
- D'ÁVILA, V. M. R. **Estruturas de concretos Armados**. UFRGS- DECIV. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABM9AAA/cisalhamento>>. Acesso em: 03 mar. 2015.
- DAFE, Sara S. F. D et al. Influence of the thermo mechanical processing on shear bands formation and magnetic properties of a 3% Si non-oriented electrical steel. **Journal Of Magnetism And Magnetic Materials**. Ouro Preto- Minas Gerais, p. 3234-3238. jun. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885311004793>>. Acesso em: 15 ago. 2015.
- Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais- (São Paulo). Usp (Org.). **PTM 2110: Propriedades magnéticas dos materiais**. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmt2100/Aula13_2005%201p.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2015.
- EMURA, E. et al. The influence of cutting technique on the magnetic properties of electrical steels. **Journal Of Magnetism And Magnetic Materials**, São Paulo, v. 254, p.358-360, jan. 2003.
- FILARDO, J.v.. **Propriedades magnéticas**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABt8sAL/perdas-magneticas>>. Acesso em: 16 mar. 2015.

IODACHE, V.E.; HUG, E.; BUIRON, N.. Magnetic behaviour versus tensile deformation mechanisms in a non-oriented Fe–(3 wt.%)Si steel. **Materials Science And Engineering**, Université de Technologie de Compiègne, v. 359, n. 1-2, p.62-74, 07 jun. 2013.

LANDGRAF, F. J.G., **Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos**. Disponível em: <[http://www.pmt.usp.br/academic/landgraf/nossos artigos em pdf/02Lan recope .pdf](http://www.pmt.usp.br/academic/landgraf/nossos%20artigos%20em%20pdf/02Lan%20recope.pdf)>. Acesso em: 02 mar. 2015.

MENDES, Filomena B. R. **Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas de Aço ao Silício**. 2004. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NACIONAL, Companhia Siderurgica (Org.). **Laminados a frio**. Disponível em: <[http://www.csn.com.br/irj/go/km/docs/csn_documentos/CSN/CATALOGO LF.pdf](http://www.csn.com.br/irj/go/km/docs/csn_documentos/CSN/CATALOGO%20LF.pdf)>. Acesso em: 03 maio 2015.

NEVES, Eurico G. de Castro; MÜNCHOW, Rubi. **Maquinas e transformadores elétricos: Características magnéticas dos materiais**. Disponível em: <http://minerva.ufpel.edu.br/~egcneves/disciplinas/mte/caderno_mte/circ_magn.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2015.

ODA, Yoshuhiko et al. Recent development of non-oriented electrical steel sheet for automobile electrical devices. **Journal Of Magnetism And Magnetic Materials** **320**. Mizushima, Japão, p. 2430-2435. jun. 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885382901160>>. Acesso em: 20 out. 2015.

PEREIRA JUNIOR, Ilton A. et al. **Análise e medições de propriedades magnéticas dos materiais em diferentes frequências e com correção de harmônicos**. 2010. XVIII Congresso Brasileiro de Automática. Disponível em: <http://www.lepo.joinville.udesc.br/_publicacoes/arquivo354.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2013.

PEKSOZ, Ahmet et al. Mathematical model for cutting effect on magnetic flux distribution near the cut edge of non-oriented electrical steels. **Journal Of Magnetism And Magnetic Materials**. Bursa, Turquia. Jan. 2015.

QIN, Jing et al. Effect of texture and grain size on the magnetic flux density and core loss of cold-rolled high silicon steel sheets. **Journal Of Magnetism And Magnetic Materials**. Bejin, China, p. 537-543. jun. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885315306806>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

RYGAL, R et al. Influence of cutting stress on magnetic field and flux density distribution in non-oriented electrical steels. **Journal Of Magnetism And Magnetic Materials**, Czertochowa, Poland, v. 215-216, n. , p.687-689, 16 mar. 2015

