

**Efeito do processo de recozimento primário e secundário em aços elétricos de grão orientado**

**Effect of primary and secondary annealing at grain oriented electrical steel**

**Efecto del proceso de recocido primario y secundario en aceros eléctricos de grano orientado**

**Jefferson Rodrigo Lopes de Araújo**

Faculdade Pitágoras, Brasil

E-mail: [euaraujo94@gmail.com](mailto:euaraujo94@gmail.com)

**Herica Freitas Silva**

Faculdade Pitágoras, Brasil

E-mail: [herica.freitas.2009@hotmail.com](mailto:herica.freitas.2009@hotmail.com)

**Alex Bruno Caetano dos Reis**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0194-1211>

Faculdade Pitágoras, Brasil

E-mail: [abcdosreis@hotmail.com](mailto:abcdosreis@hotmail.com)

**Michelle Bitencourt**

Faculdade Pitágoras, Brasil

E-mail: [bitencourt\\_m@yahoo.com.br](mailto:bitencourt_m@yahoo.com.br)

Recebido: 11/11/2018 | Revisado: 03/12/2018 | Aceito: 19/12/2018 | Publicado: 21/12/2018

**Resumo**

Os aços siliciosos são aqueles compostos de aproximadamente 3% de silício e são utilizados para fabricação de geradores, transformadores e motores industriais. A pesquisa foi feita com o intuito de gerar conhecimento metalúrgico acerca das propriedades magnéticas dos aços elétricos e também conciliar essas propriedades aos parâmetros de processamento do material. Uma amostra padrão foi retirada do lote selecionado para teste, decapada utilizando ácido clorídrico e submetida ao processo de recozimento. Cálculos de proporcionalidade foram feitos utilizando o diagrama ferro silício, levando em consideração o peso e as dimensões da amostra. Após o recozimento, a amostra foi submetida aos testes adequados para evidenciar o tamanho dos grãos e sua influência nas propriedades magnéticas. Seus resultados mostraram um crescimento significativo no tamanho dos grãos após o recozimento secundário, e geração da textura goss, que é desejada ao material. Com as análises foi possível concluir que após o

recozimento, os grãos apresentaram tamanhos padronizados e bem ordenados, e a padronização das perdas e permeabilidade magnética que respectivamente resultaram em 1,5 W/Kg e 1,99T nas condições de 1,7T a uma frequência de 60 Hz (frequência padrão brasileira).

**Palavras-chave:** Aço-Silício; Eletromagnetismo; Recozimento.

### **Abstract**

Siliceous steels are the ones that contain a percentage of approximately 3% silicon and they are used to manufacture generators, transformers and industrial motors. Through the research, understand their metallurgical properties about electrical steel and also conciliate these properties with processes parameters from this material. A standard sample taken from the batch selected for testing was pickled using hydrochloric acid and subjected to the annealing procedure. Proportional calculations were made using the iron silicon diagram, taking into account the weight and dimensions of the sample. After annealing, the sample was submitted to the appropriate tests to show grain size and its influence on magnetic properties. The results showed significant growth in grain size after secondary annealing and generation of the Goss texture, which is desired for the material. By the analyses was possible conclude that after annealing process, the grain showed standard size, and the magnetic loss and permeability resulted in 1,5 W/Kg and 1,99T respectively at 1,7T induction condition at 60Hz frequency (Brazilian standard frequency).

**Keywords:** Siliceous steel; Electromagnetism; Annealing.

### **Resumen**

Los aceros silíceos son aquellos compuestos de aproximadamente un 3% de silicio y se utilizan para la fabricación de generadores, transformadores y motores industriales. La investigación fue hecha con el propósito de generar conocimiento metalúrgico acerca de las propiedades magnéticas de los aceros eléctricos y también conciliar esas propiedades a los parámetros de procesamiento del material. Una muestra estándar fue retirada del lote seleccionado para prueba, decapada utilizando ácido clorhídrico y sometida al proceso de recocido. Los cálculos de proporcionalidad se realizaron utilizando el diagrama de hierro silicio, teniendo en cuenta el peso y las dimensiones de la muestra. Después del recocido, la muestra fue sometida a las pruebas adecuadas para evidenciar el tamaño de los granos y su influencia en las propiedades magnéticas. Sus resultados mostraron un crecimiento significativo en el tamaño de los granos después del recocido secundario, y la generación de

la textura goss, que se desea al material. Con los análisis fue posible concluir que después del recocido, los granos presentaron tamaños estandarizados y bien ordenados, y la estandarización de las pérdidas y permeabilidad magnética que respectivamente resultaron en 1,5 W / Kg y 1,99T en las condiciones de 1,7T a una frecuencia de 60 Hz (frecuencia estándar brasileña).

**Palabras clave:** Acero-Silicio; electromagnetismo; Recocido.

## 1. Introdução

Considera-se aço toda liga de Ferro e Carbono que apresente em sua composição aproximadamente 2% de carbono. Partindo deste pressuposto existem ligas derivadas que contemplam uma maior percentagem deste elemento, denominadas ferros-fundidos. Dependendo da variação de sua composição química o aço poderá apresentar diversas variedades de estruturas e propriedades físicas. Um apêndice da variação de composição do aço é conhecido como uma liga Ferro-Silício popularmente denominada aço elétrico.

Os aços elétricos são aqueles que contem aproximadamente 3% de Silício, estes são utilizados em máquinas estáticas ou rotativas que trabalham com campos eletromagnéticos, como transformadores e motores. Na produção do aço elétrico quanto melhor a sua condutividade elétrica e menor a perda maior o valor agregado deste material, é um produto desenvolvido justamente para aumentar a eficiência de máquinas elétricas com o intuito de reduzir as perdas podendo assim trabalhar com um maior rendimento.

A estrutura de todo material é formada por grãos, o estudo destes grãos e suas propriedades é chamado de metalografia, e pode se subdividir em dois grupos: micrografia que é o estudo dos grãos observados por escalas de zoom maior do que 50 vezes e macrografia que é o estudo destes grãos em escalas de zoom menores e/ou olho nu. A ciência que compreende o estudo da estrutura dos materiais é denominada ciência dos materiais, e permite que sejam caracterizadas propriedades dos materiais tais como estrutura cristalina, grãos, seus tamanhos e contornos associando estas características a suas propriedades físico-químicas. Partindo deste conceito através da a pesquisa foi feita com o intuito de gerar conhecimento metalúrgico acerca das propriedades dos elétricos e também conciliar essas propriedades aos parâmetros de processamento do material.

## 2. Aços Elétricos

Pode-se afirmar que aço é toda liga de ferro e carbono que possuam em sua composição até cerca de 2% de carbono, pois este é o limite de solubilidade deste elemento em estruturas Cúbicas de Face Centrada (CFC) Colpaert (2008). De acordo com Callister Jr (2014) pode-se observar uma concentração máxima de átomos em substâncias, esta é denominada índice de solubilidade, ou seja, a capacidade de um átomo se dissolver em uma determina solução. Aços elétricos são ligas derivadas da liga Ferro Carbono, que apresentem menos de 30 partes por milhão (ppm) de carbono e até aproximadamente 3% de silício em sua composição química.

A adição de Silício no material tem por função aumentar a resistividade do mesmo, fazendo com que ocorra uma diminuição de correntes parasitas (Hou, 1996). Chuen (1980) e Souza (2013) defendem a ideia que os estudos anteriores (Séc. XX) comprovaram que as propriedades magnéticas do Ferro Silício 3%, eram melhoradas com a presença do elemento Si em sua composição. O que possibilitou que o processo deste material evoluísse e pudesse ser aplicadas novas tecnologias no desenvolvimento deste material. “À medida que se aumenta o teor de silício, aumentam-se também os limites de resistência e de escoamento” (SOUZA, 2013, p. 3).

As propriedades magnéticas atribuídas ao material são consequência dos momentos magnéticos gerados pelos elétrons contidos nele. Por este motivo, a característica principal do aço elétrico é sua grande capacidade de transporte eletromagnético com baixas perdas durante este processo. Assim como visto por Landgraf (2001) devido a presença de impurezas em materiais ferrosos observa-se uma grande sensibilidade das propriedades magnéticas.

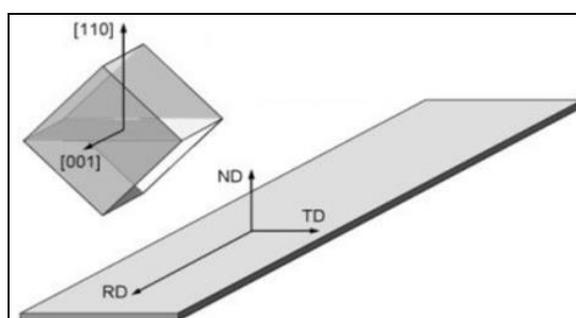
Altos valores de permeabilidade e baixos valores de perdas magnéticas tornam os aços silício adequados para fabricantes de equipamentos elétricos, como geradores, transformadores e motores, pois a menor dissipação de energia no núcleo gera uma significativa economia de recursos. Esse controle do consumo se tornou primordial em momentos de crise de abastecimento de energia elétrica, como a que ocorreu no Brasil, na virada do milênio.

Aço silício de grão não orientado (GNO) é uma liga de Ferro-Silício que varia seu teor de silício entre aproximadamente 1.0 e 3.5%. Esta liga tem como característica a ausência de uma orientação preferencial definida de seus grãos, gerando uma distribuição aleatória da direção dos grãos no material. Porém, na prática, o processo de laminação provoca o

surgimento de orientações preferenciais, gerando certo grau de anisotropia. Essa orientação cristalográfica preferencial é conhecida como textura cristalográfica.

Os primeiros aços grão orientado (GO) possuíam 4% de silício e apresentavam péssimas propriedades magnéticas. Tais aços eram chapas oriundas da laminação a quente. Então, em 1933, foi desenvolvido o material com a chamada “textura de Goss”. Descobriu-se que a fabricação de modo a induzir uma forte textura cristalográfica  $\{110\} \langle 001 \rangle$  (a textura de Goss) permitia a obtenção de excelentes propriedades magnéticas, ou seja, altos valores de permeabilidade magnética e baixos valores perdas magnéticas no aço produzido (GLERIAN, 2011).

A maioria dos grãos que compõem a chapa possui seus planos  $\{110\}$  paralelos à superfície da chapa com a direção  $\langle 001 \rangle$  paralela à direção longitudinal (direção de laminação) que pode ser evidenciada observando-se a Figura 1, o que proporciona forte anisotropia (propriedades variam de acordo com a direção) em relação às propriedades magnéticas. Essa característica resulta em melhores valores na direção de laminação da chapa, o que torna adequada a aplicação deste aço em núcleos estáticos, onde o fluxo magnético coincide com a direção de laminação. Portanto o GO é recomendado para a produção dos transformadores de potência e de distribuição, reatores de potência, hidrogeradores e turbo geradores.



**Figura 1** – Orientação de Goss  $\{110\} \langle 001 \rangle$ .

**Fonte:** Raabe, (2015, pag.3).

Para se obter a textura de Goss é preciso manter o controle rígido dos teores de manganês (Mn) e enxofre (S) em seu processo de fabricação. Quando o material chega à laminação a quente, ele terá Sulfeto de Manganês (MnS) precipitado de forma grosseira. Durante a laminação a quente o precipitado será distribuído homogeneamente pela bobina, e durante o processo de recozimento/descarbonetação na laminação a frio o crescimento dos grãos é inibido. Por fim, no recozimento em caixa, o precipitado vai coalescer e finalmente o

grão pode crescer com a orientação pretendida, no processo chamado de recristalização secundária.

Os resultados industriais mostraram que teores de silício acima de 3,5% aumentavam significativamente a complexidade dos processos a frio. Assim, normalmente as concentrações de silício não excedem muito valores em torno de 3% devido a essas considerações (SHIMIZU e LIDA, 1986).

Os valores de 1,5 T e 1,7 T representam a intensidade do campo magnético e os valores de 50 Hz e 60 Hz representam a frequência de magnetização e desmagnetização aplicada nos testes de perda magnética. Podem ser citados três fatores que influenciam a textura de Goss e, conseqüentemente, nas propriedades magnéticas do material: composição química, tamanho de grão e deformação (GLERIAN, 2011).

A importância do teor de carbono na formação da textura de Goss está relacionada à estabilidade da fase austenítica. Estudos indicam que a proporção de austenita não deve ultrapassar 28% para não reduzir a textura com estrutura cristalina (110) [001] da superfície da chapa. No metal deformado, a nucleação ocorre mais facilmente nos contornos de grãos ou em outras regiões onde a orientação é usualmente diferente da orientação de Goss. Porém, foi observado que o núcleo que se forma em microbandas envolve intensiva desorientação, com a orientação (110) [001] tendo maior participação (GLERIAN, 2011).

Então, a contribuição de núcleos de Goss é diretamente proporcional à fração volumétrica de microbandas na estrutura. A diminuição do tamanho do grão leva a um aumento de volume de zonas de contorno de grão, enquanto o volume ocupado pelas microbandas diminui. Assim, a contribuição dos núcleos com a orientação pretendida deve ser maior quando o tamanho de grão, após recozimento intermediário, for maior. Em aços de granulometria fina, os núcleos surgidos nos contornos de grão crescem antes da maior parte dos núcleos de Goss serem formados.

### **3. Recozimento e Recristalização do Aço de Grão Orientado**

As propriedades magnéticas dos aços elétricos em geral variam com seus aspectos químicos e microestruturais, o tratamento ao qual eles são submetidos, a descarbonetação, o tamanho de grão, dentre outros (GIROTO, 2010). O aço GO apresenta uma etapa de fabricação bastante complexa, onde o mesmo é submetido ao um processo de redução, laminação a quente, laminação a frio e recozimento secundário.

No processo de laminação a quente posterior ao lingotamento do material, observa-se a presença da temperatura elevada que atribui ao material uma condição de recristalização de grãos, temperatura suficiente para que os grãos sejam reordenados e reorganizados. No processo posterior o material é laminado a frio, situação em que o material concentra tensões em sua estrutura devido à presença do encruamento neste processo.

Uma breve síntese geral do processo de laminação é dada por Helman e Cetlin (2005, pag.199) da seguinte forma: Na fabricação deste tipo de aço, são aplicados métodos padrão de fabricação de outras ligas, este é submetido ao lingotamento contínuo, laminação de desbaste ou a quente e posteriormente laminação de acabamento ou a frio. Durante todo este processo toma-se os devidos cuidados para com a orientação e disposição dos grãos do material, ordenando-os da forma mais conveniente para sua aplicação.

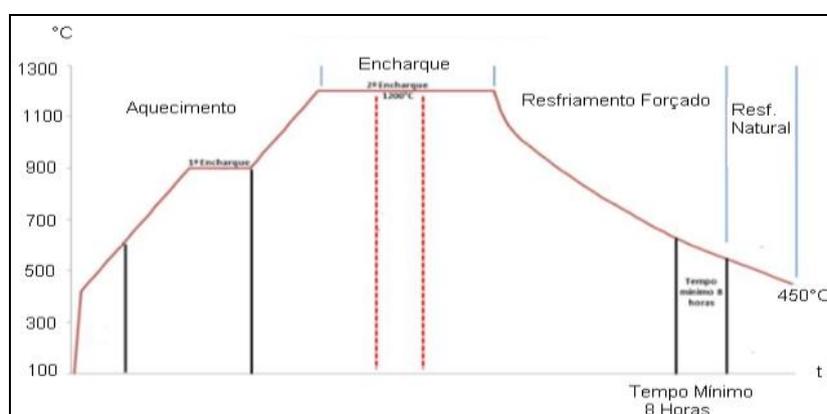
Tendo sido obtida a espessura desejada ao material após este processo e consequentemente a orientação Goss desejada (se tratando de aços elétricos), e antes de ser submetido a seu recozimento final, o GO é descarbonetado a fim de atingir uma grandeza menor do que 30 ppm de carbono. O teor de carbono no material influencia no crescimento de grãos e consequentemente em suas propriedades magnéticas. Juntamente com a descarbonetação, o aço passa pelo seu primeiro processo de recozimento.

Em um ambiente controlado e com ajuda de H<sub>2</sub>O a chapa ao fazer o percurso pelo equipamento acontece a descarbonetação, uma linha de recozimento contínuo, através das reações químicas entre carbono e água o carbono proveniente do processo inicial na aciaria é reduzido em incrivelmente 95% do valor inicial, atingindo assim os valores que são objetivados e que giram em torno de 20 ppm. “Durante o processo de descarbonetação, a superfície da chapa de (GO), em contato com a atmosfera de recozimento, oxida, formando uma subcamada de óxidos de aproximadamente 2 microns” Glerian (2011 apud CESAR et al.,1998; KOMATSUBARA et al., 1996). Na recristalização primária o crescimento dos grãos é controlado e inibido por formação de sulfeto de manganês (MnS) e (AlN) que são soluções que agem no controle de processo para o funcionamento correto e cronológico.

O processo de recozimento de produtos planos pode vir a ocorrer em duas linhas distintas de tipos de fornos: os denominados fornos de linha contínua e fornos tipo caixa. Almeida e Araújo. (2018 apud SILVA et al., 2011) avaliam que os fornos de recozimento contínuo possuem produtividade extremamente alta e uma enorme homogeneidade microestrutural, pois consegue distribuir a temperatura de forma uniforme em seu meio, todavia, tendo um custo muito elevado e por este motivo, no Brasil, há muito pouco deles e muitos dos fornos em caixa.

O processo no forno tipo caixa consiste em controlar toda a atmosfera dentro do mesmo para que as propriedades almejadas no material sejam alcançadas, isso através de gases e monitoradores que dão retorno em tempo real das propriedades dentro do meio, baseado nos princípios termodinâmicos da troca de calor, que acontecem dentro do forno. As bobinas por serem espiras de aço enroladas tendem a trocar mais calor com o ambiente de sua parte externa para sua parte interna, devido ao contato maior com a atmosfera do forno das espiras de fora se comparada as espiras de dentro, a esse fenômeno denomina-se ponto quente e ponto frio que ocorrem com os lados de fora e dentro (centro) da bobina, respectivamente.

De acordo com Almeida e Araújo (2018 apud GLERIAN, 2011) o processo é realizado em um equipamento de processamento por batelada, em que as bobinas são carregadas em fornos de aquecimento elétrico a resistência e tratadas termicamente por 120 horas com temperaturas de até 1200°C na presença de gás hidrogênio seco. O autor ainda cita que as funções principais dessa linha são: a recristalização secundária com o crescimento anormal de grãos, a formação do recobrimento de forsterita (filme de vidro) e a purificação do aço, com eliminação dos elementos químicos residuais de enxofre, nitrogênio e oxigênio. A Figura 2 explicita as fases e o tempo em que as bobinas permanecem nestes fornos.

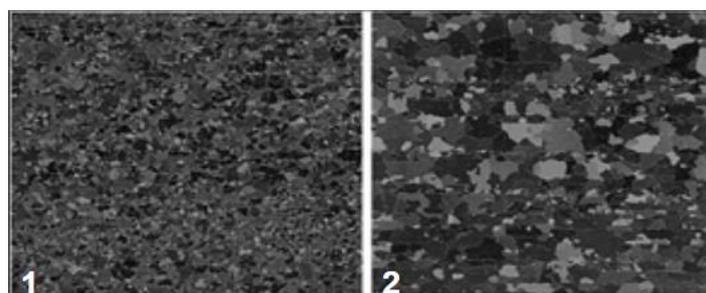


**Figura 2** – Processo de Recozimento Aço Elétrico de Grão Orientado.  
**Fonte:** Almeida; Araújo (2018, pag.28 apud Aperam).

Ainda Almeida e Araújo. (2018 apud GLERIAN, 2011) afirmam que a fase do encharque intermediário é necessário para se garantir que o ponto de orvalho da atmosfera de recozimento seja negativo em altas temperaturas e, objetivando evitar a interferência da formação de outros compostos derivados da oxidação do ferro na formação do recobrimento do filme de vidro. Logo após o ciclo de aquecimento e encharque tem-se o processo de resfriamento forçado, onde através de sistemas de ventilação e trocadores de calor há a

primeira redução de temperatura no meio, e logo após houvesse o resfriamento natural através da troca de calor das bobinas com o ambiente.

Quando ocorre falha nos inibidores de crescimento de grão no processo de recozimento primário, Figura 3, logo a nucleação preferencial é afetada, pois para que haja crescimento, precisam da energia dada no momento certo aos grãos com orientação preferencial para formação de goss no recozimento secundário, caso falhe esse processo não haverá orientação preferencial e sim um crescimento de qualquer grão que se apresente no material como pode ser observado na figura abaixo:

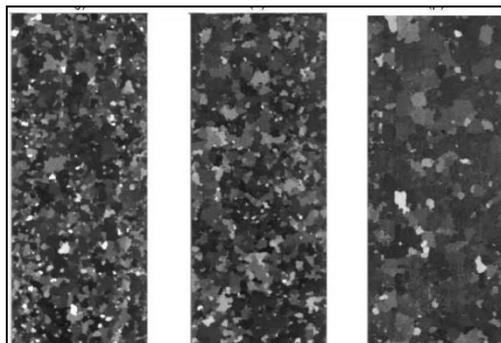


**Figura 3** – Superfície do aço silício (GO) figura 1 falha no inibidor de crescimento, figura 2 sucesso no inibidor, amostras decapadas após o recozimento em caixa.

**Fonte:** Souza (2013, pag.34).

Os fatores cruciais que influenciam na recristalização secundária são: presença de partículas do primeiro recozimento para decarbonetação, textura e espessura do material. Os grãos que crescem são aqueles que possuem uma orientação especial, o que faz com que a recristalização secundária gere uma determinada textura (HUMPHRAYS; HATHERLY, 2004). Deste modo é possível a observação da diferenciação dos grãos na superfície do material, onde no centro, os grãos se alongam e em sua superfície ocorre o crescimento dos grãos do material após todo processo de recozimento e recristalização.

Outra fantástica observação durante o processo de fabricação deste material é evidenciada ainda durante a laminação, Figura 4, pois os grãos localizados próximos à superfície são submetidos a fortes tensões superficiais (DIETER, 1981) e baixas temperaturas. Desta forma, as interações atômicas de soluto e vazios na rede cristalina são dificultadas fazendo com que esses grãos acumulem grande quantidade de energia o que favorece a recristalização dinâmica durante a laminação. Entretanto, os grãos no centro da tira permanecem com altas temperaturas favorecendo o fenômeno da recuperação dinâmica e, portanto, permanecem com a forma alongada.

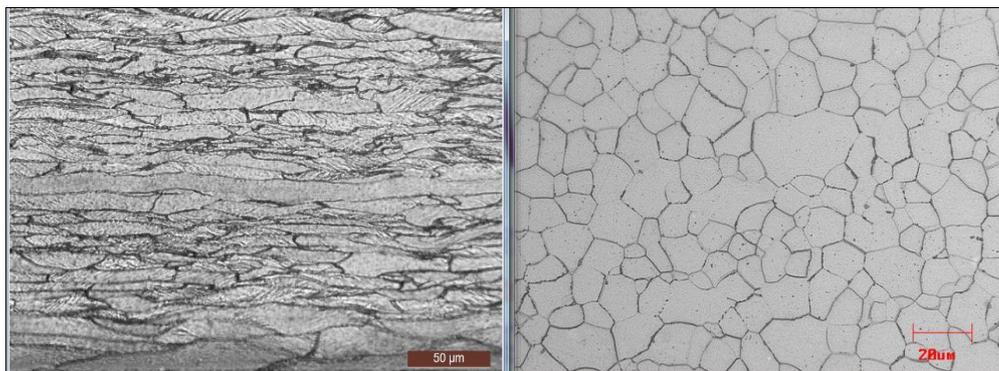


**Figura 4** - Macrografia do aço GO nas extremidades e no centro da chapa respectivamente.

**Fonte:** Alcântara; Cunha (2006).

Para se quantificar as propriedades magnéticas dos aços elétricos utiliza-se o teste denominado Epstein que consiste em simular a condição dentro de um transformador de circulação da magnetização induzida pelos campos de força externos as lâminas de aço e medindo assim qual capacidade de magnetização da amostra e ainda sim qual sua perda magnética residual do processo. O teste Epstein é o processo mais comum de teste em universidades e indústrias e por este motivo, foi padronizado pela norma brasileira (NBR 5161, 1996). Os testes são realizados apenas após todo o processo produtivo, pois o que interessa ao cliente são as propriedades magnéticas do produto final e não em cada parte do seu processo de fabricação.

Esses grãos alongados podem ser observados como adquirindo a orientação preferencial. Desenvolvem assim após esse processo uma orientação cristalográfica que origina texturas secundárias e primárias que após o processo de recozimento em caixa mudando sua morfologia tende a se reorganizar e dar forma a textura de Goss que é a textura chave para explicitar as propriedades magnéticas, esta reorganização pode ser observada na Figura 5.



**Figura 5** – Metalografia dos grãos do aço GO após seu recozimento e recristalização.

**Fonte:** Autores

Em consequência do aumento dos grãos, diminuem drasticamente a quantidade de contorno dos mesmos, os mesmos contornos que causam perda magnética no material devido

às orientações dos domínios de cada grão, então tendo sua orientação adequada será menor dificuldade para passagem de um campo coercivo externo aumentando assim a permeabilidade magnética com menor força de magnetização a deixando adequada aos padrões que necessitem atender. No caso do aço GO as condições de teste dadas são 1,7T uma frequência de 60 Hz, que são as induções e frequências a quais a maioria dos equipamentos em território nacional estão submetidos.

#### **4. Metodologia**

Obteve-se um lote de amostras para a realização da pesquisa, foi escolhida dentre o lote uma amostra para a realização dos testes. A amostra escolhida possuía dimensões de 263x30x0,27mm. Para melhores resultados a amostra foi lavada com álcool e lixada com uma lixa de granulometria de 200, o processo de lixamento foi realizado manualmente devido à pequena espessura (0,27 mm) do material. Após este processo, a mesma foi lavada com água corrente, e fora submetida a um processo de secagem forçada por meio de ar aquecido.

Após a lavagem e secagem da amostra, esta foi então submetida a uma decapagem química. A decapagem química do material foi feita com uma solução aquosa de ácido clorídrico (HCl) com PA de 37% e água aquecida a uma temperatura de aproximadamente 100°C. As proporções desta solução foram em média 113ml para cada componente (50%). A decapagem no material utilizando esta solução foi realizada a fim de evidenciar seus grãos.

Durante o processo de decapagem, a amostra ficou imersa dentro de um recipiente e de vidro que continha a solução aquosa de HCl por um tempo de 40 minutos. Para que a maior parte da superfície da amostra fosse atacada, a mesma foi apoiada sobre placas de vidro para que sua face inferior não ficasse em contato direto com o vidro do recipiente. Durante o período de ataque, a amostra foi virada cerca de 10 vezes (1 vez a cada 4 minutos) para que se pudesse ter um ataque uniforme.

Após alguns minutos submersos já se podia observar o desprendimento de partículas do revestimento do material. Ao final do tempo a amostra foi retirada e, posteriormente, lavada com água corrente e sabão de coco, sendo seca em toalhas de papel e submetida a uma aplicação de uma camada de verniz para prevenir a oxidação de sua superfície. Observa-se na Figura 6 o resultado do procedimento de decapagem.



**Figura 6** – Amostra Selecionada para teste.

Fonte: Autores (2018).

A mistura para a decapagem química realizada com uma proporção de 50% de cada componente, continha cerca de 113 ml de água aquecida a uma temperatura de 100°C e 113 ml de ácido clorídrico em PA 37%. A amostra foi apoiada em lâminas de vidro para não haver contato direto com o fundo do recipiente, podendo ser atacada em quase toda sua superfície.

A amostra foi submetida a uma análise visual posterior a lavagem. Esta análise foi feita para poder evidenciar como estavam dispostos os grãos do material antes do mesmo ser submetido ao processo de recozimento. Ao observar-se o tamanho dos grãos, pode-se mostrar conforme a Figura 7 que os mesmos possuíam tamanhos aleatórios configurando maiores contornos de grãos.



**Figura 7** - Análise Visual da Amostra Após a Lavagem.

Fonte: Autores (2018)

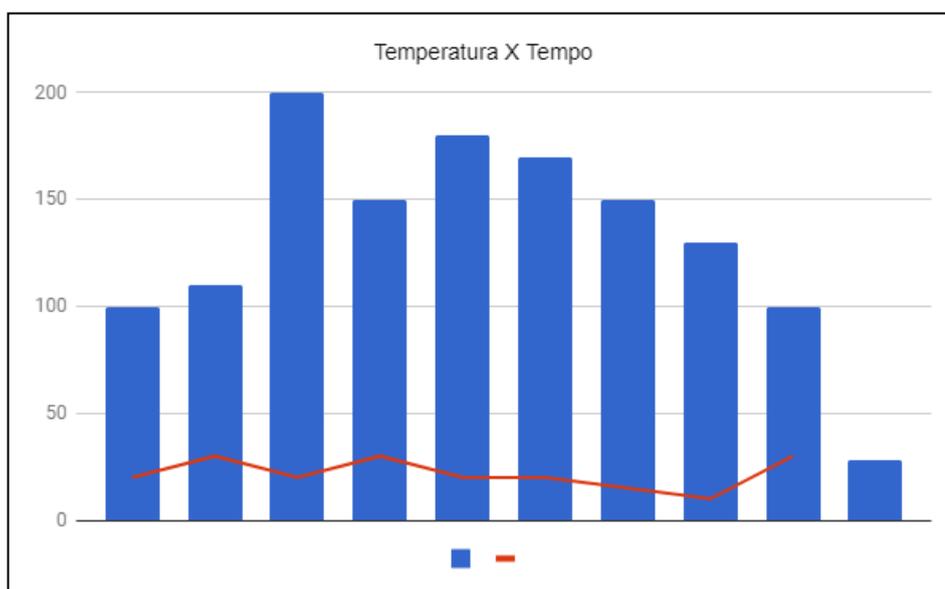
Pelo tamanho dos grãos, evidenciava-se claramente que o material não possuía um baixo índice de perda, ocasionando assim um rendimento baixo da máquina que operava com o material.

O processo de recozimento secundário e recristalização do aço proposto pelo grupo foi feito com base nos estudos das referências bibliográficas citadas. A tabela 1 e o gráfico contido na Figura 8 representa a temperatura e tempo que o mesmo fora submetido, estão descritas abaixo:

**Tabela 1** - Temperatura e Tempo Utilizados no Processo de Recozimento.

Etapa	Temperatura X Tempo		N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
	Tempo (min)	Temperatura (°C)		
Purga com Aquecimento	20	100	-	-
Purga com Aquecimento	30	110	-	-
Aquecimento	20	200	-	-
Encharque	30	150	-	-
Aquecimento	20	180	-	-
Encharque	20	170	-	-
Encharque	15	150	-	-
Encharque	10	130	-	-
Purga com Resfriamento	30	100	-	-
Resfriamento no Ambiente	-	28	-	-

**Fonte:** Autores (2018)



**Figura 8** - Gráfico de Temperatura X Tempo.

**Fonte:** Autores (2018)

A amostra foi submetida a este processo que foi cronometrado e monitorado com o auxílio de um termopar localizado dentro do forno mufla observado na Figura 9, o termopar possibilitou ao grupo monitorar e observar a temperatura real da amostra.



**Figura 9** - Forno Utilizado para o Recozimento  
**Fonte:** Autores (2018)

Após o recozimento e resfriamento da mesma, a amostra foi decapada utilizando a mesma solução aquosa de HCl para que se retirasse toda camada de fuligem proveniente do processo formada sobre a superfície do material.

Um estudo foi feito nos grãos do aço após o processo de recozimento, se pode observar na Figura 10 o tamanho dos grãos, analisando e comparando com o seu tamanho antes do recozimento se pode observar uma leve variação do tamanho dos grãos.



**Figura 10** - Grãos Macroscópicos Após o Recozimento.  
**Fonte:** Autores (2018)

Para determinar realmente a eficácia do recozimento faz-se necessário uso de normas técnicas de contagem de grãos para comparar e validar o recozimento secundário como um processo a aumentar o tamanho dos grãos e sua disposição ao longo da amostra. Para comprovar a diminuição da perda o ideal é se realizar o teste de perda e permeabilidade magnética no material (Epstein).

As amostras de dimensões padrão, foram empilhadas no aparelho blockhouse, que realiza o teste Epstein segue na Figura 11.



**Figura 11** – Aparelho Epstein.  
**Fonte:** Autores (2018)

Todas as amostras são adicionadas no sentido que tem melhor magnetização o sentido de laminação e coincidente com da textura de goss, então após o empilhamento o sistema é isolado, e a partir daí são induzidas cargas eletromagnéticas no material simulando seu regime de trabalho dentro de uma máquina de fluxo orientado de corrente, testando assim qual sua permeabilidade e sua perda magnética derivada do processo de retenção de energia pelos contornos de grão e paredes dos domínios.

## 5. Resultados E Discussões

Analisando o lote experimental pode-se comparar que o tamanho de grão aumentou gradativamente após o recozimento, reduzindo assim o número de contorno de grãos e assim os domínios magnéticos, testado no aparelho Epstein nas condições de 1,7T de indução e 60Hz de frequência tendo assim suas propriedades eletromagnéticas dentro da faixa padrão aceitável segundo catálogos.

Uma vez que as perdas magnéticas são causadas por diversos fatores, observa-se que e um deles é ocasionado pelo contorno de grão. Quanto mais contornos de grão a corrente precisa transpor para se movimentar pelo material, maior a sua perda. Com este conceito, pode-se afirmar com clareza que o tamanho dos grãos pode influenciar diretamente no

desempenho do material. A Figura 12 apresenta uma comparação visual na amostra anterior e posteriormente ao recozimento.



Figura (1) Anterior ao recozimento

Figura (2) Posterior ao recozimento

**Figura 12** - Comparação dos Grãos Antes e Após o recozimento

Fonte: Autores (2018)

É clara a diferença entre o tamanho dos grãos, sendo assim pode-se concluir que a perda na amostra era maior antes do seu recozimento.

## 6. Considerações Finais

Através de todo processo experimental, observou-se que o crescimento e recristalização dos grãos são a chave para a evidenciação das altas propriedades eletromagnéticas dos aços elétricos, e que isso se dá devido a uma série de fatores os quais têm início nas bandas de cisalhamento dos grãos em aproximadamente  $30^\circ$  durante o processo de laminação a frio, que são pontos de nucleação de goss no material. O aumento dos grãos é dado pela alta energia no forno e os inibidores tem o importante papel de proporcionar a correta nucleação dos grãos, essa série de fatores são parâmetros que influem diretamente nas perdas e permeabilidade do aço.

Sendo assim os experimentos comprovaram a teoria acima explicitada onde após o recozimento, os grãos apresentaram tamanhos padronizados e bem ordenados resultando em uma perda máxima de 1,5 W/Kg nas condições de teste de 1,7T uma frequência de 60 Hz e uma permeabilidade de 1,99T estando assim dentro dos parâmetros aceitáveis para aplicação.

## Referências

ALCÂNTARA, Fabrício Luiz; CUNHA, Marco Antônio. **Estudo da recristalização secundária do aço silício de grão orientado**. São Paulo: APERAM, 2006. 5p. Dissertação, São Paulo, 2006.

ALMEIDA, Ivanilson Bispo de; ARAÚJO, Maiane Marques de Oliveira. **Avaliação do Isolamento Térmico de Fornos Utilizados no Processo de Recozimento em Caixa**. 2018. 95 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário do Leste de Minas Gerais – Unileste, Coronel Fabriciano, 2018.

CALLISTER JR., Willian D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais Uma Abordagem Integrada**. 2.ed São Paulo: Anhanguera Publicações, 2014. 702 p.

CHUEN, S. L. **Determinação dos parâmetros operacionais do recozimento de descarbonetação do aço silício**. Proposta de tese engenharia metalúrgica. Belo Horizonte: UFMG, 1980.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Blucher, 2008.

DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica**. 2ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois Editora, 1981. 653p.

GLERIAN, Paulo César. **Efeito de magnésias com diferentes aditivos nas estruturas e propriedades de aço elétrico de grão orientado**. 2011. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

GIROTO, Elen Regina. **O efeito do potencial de oxigênio na oxidação subsuperficial e suas influencias nas propriedades elétricas de aços elétricos após o recozimento final**. São Paulo: UFSP, 2010. 90p. Dissertação, Mestrado em Engenharia, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2010.

HELMAN, Horácio.; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. São Paulo: Artliber Editora, 2005. 260 p.

KREITH, Frank; BOHN, Mark S. **Princípios da Transferência de Calor**. 6° ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning Ltda. 2003. 623 p.

LANDGRAF, F.J.G. Apostila “**Aços carbono e aços silício para fins elétricos**”. Capt. 6,7 e 8. Ed.IPT, São Paulo-SP, 2001.

LANDGRAF, F.J.G “**Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos**.” São Paulo-SP, 2004.

SOUZA, Ronie M. Pinheiro. **Efeito do perfil térmico de recozimento das bobinas laminadas a quente nas propriedades do aço elétrico de grão orientado**. Minas Gerais: UFMG, 2013. 85p. Dissertação, Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.