

# CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS DE BAIXA EFICIÊNCIA

III Congresso Online de Engenharia de Materiais. Inscrições encerradas, 4<sup>a</sup> edição, de 27/04/2021 a 30/04/2021  
ISBN dos Anais: 978-65-89908-00-5

**CRUZ; Juliana dos Santos Miranda Santa<sup>1</sup>, CAMPOS; Marcos Flavio<sup>2</sup>, CARVALHO; Eliane Guedes de<sup>3</sup>**

## RESUMO

### 1. RESUMO

Os aços estudados foram aços de baixo carbono com espessuras menores que 0,41mm, produzidos via recocimento contínuo, que terão suas propriedades magnéticas avaliadas para aplicação desses produtos para fins elétricos. Os aços GNO da série ABNT 1006/1008 são amplamente utilizados em pequenos motores devido ao baixo custo, possuindo propriedades magnéticas suficientes para as aplicações. Medidas magnéticas foram realizadas em quadro de Epstein. Os resultados de perdas magnéticas ficaram em torno de 6 W/kg e a permeabilidade relativa chegou a 1050.

### 2. ABSTRACT

The studied steels were low carbon steels with thickness less than 0.41mm, produced via continuous annealing, which will have their magnetic properties and crystallographic texture evaluated for application of these products for electrical purposes. ABNT 1006/1008 series GNO steels are widely used in small motors due to their low cost and sufficient magnetic properties for their applications. Magnetic measurements were performed on Epstein's chart. Magnetic loss results were around 6 W / kg and relative permeability reached 1050.

### 3. INTRODUÇÃO

A grande relevância da produção de aços elétricos se deve a inúmeras aplicações que estão diretamente ligadas à maioria dos equipamentos e máquinas, que têm seu funcionamento baseado na energia elétrica, como motores, geradores e transformadores [1]. Parte significativa de toda energia consumida no mundo é utilizada por motores elétricos.

Dentre as propriedades dos aços elétricos que são estudadas visando obtenção de melhor desempenho dos motores elétricos, destacam-se as perdas magnéticas e permeabilidade magnética que são diretamente influenciadas por variáveis do processo de fabricação[2].

As perdas magnéticas representam energia dissipada na forma de calor no interior dos aços e nos condutores elétricos e enrolamentos. A permeabilidade é a medida da otimização da passagem de corrente alternada através de um material por meio da amplificação do campo magnético nele aplicado.

Como descrito em [3] e [4] algumas variáveis podem ter efeito significativo nas propriedades magnéticas de um aço elétrico, as principais são, a composição química do aço, a distribuição de tamanho dos precipitados presentes, o tamanho de grão, a densidade de discordâncias e textura cristalográfica. Por este motivo, justificam-se o estudo e acompanhamento de todas as etapas de processamento para que se obtenha o aço elétrico como produto final com as propriedades apropriadas ao uso. O objetivo geral deste trabalho é compreender as características de aços de baixo carbono produzidos via Recocimento Contínuo com espessuras menores que 0,41mm, através da correlação dos resultados de composição química e propriedades magnéticas com condições de processamento, quando variamos o percentual de redução a frio, com a intenção de estudar a viabilidade de aplicação desses aços para fins elétricos.

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br

#### 4. METODOLOGIA

##### 4.1 Aços Estudados

Para os experimentos foram utilizadas 03 amostras de aço baixo carbono laminadas a frio da classe SAE 1006, as amostras A, B e C. Os aços possuem a mesma composição química, apresentada na tabela 1. Porém, possuem espessura a frio diferentes, como podemos observar na tabela 2.

**Tabela 1 - Composição química visada (teores máximos).**

**Amostras**

%C

%Mn

%Si

%Al

%P

%S

%N

Aços

A, B e C

0,060

0,350

0,03

0,060

0,015

0,016

0,005

Fonte: Autora, 2019.

**Tabela 2 - Espessura a frio.**

**Amostra**

**Espessura (mm)**

**Aço A**

0,182

**Aço B**

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br

**Aço C**

Fonte: Autora, 2019

Após laminação a frio, com reduções de 92% (amostra A), 90% (amostra B) e 87% (amostra C) da espessura inicial, os aços foram submetidos a um tratamento térmico de recozimento, em um forno de recozimento contínuo com taxa de aquecimento, temperatura e tempo de encharque e taxa de resfriamento iguais para todas as amostras. Assim como nas variáveis de processamento durante a laminação a quente. Em sequência ao recozimento as amostras sofreram laminação de encruamento com redução em torno de 1,5%.

As amostras como recebido serão chamados de material Sem Tratamento Térmico (STT) e serão comparadas com amostras que sofreram tratamento térmico a seco, feito para simular o tratamento de recozimento final realizado pelos fabricantes de componentes de motores elétricos, eles serão chamados de material Com Tratamento Térmico (CTT).

1.

#### 4.2 Recozimento final

O tratamento térmico a seco, para simulação do recozimento final, foi realizado em escala laboratorial, utilizando um forno tipo mufa da marca Brasmetal.

O início do tratamento, com aquecimento constante de 7 °C/min, ocorreu até a temperatura de 770°C, sob atmosfera de  $N_2$  com vazão de 1L/min. O encharque se deu nesta temperatura por 2h e em seguida o forno foi desligado, estando mantida a vazão de  $N_2$ .

1.

#### 4.3 Caracterização

##### 4.3.1 Análise Microestrutural

A análise microestrutural foi realizada utilizando microscópio óptico ZEISS, modelo Axiphot, com uma câmera acoplada, para observação da microestrutura e obtenção das micrografias resultantes das análises com aumentos de 200X.

A presença de inclusões nos aços foi analisada com base na norma ASTM E45 (Método A)<sup>1</sup>. Para obtenção do tamanho de grão médio seguiu-se a norma técnica E112 – 10, American Society for Testing and Materials (ASTM, 2010).

##### 4.3.2 Propriedades Magnéticas

As propriedades magnéticas perda magnética total, perda histerética, perda anômala, permeabilidade magnética e dados da curva de histerese foram obtidas através do Ensaio de Epstein, realizado através de um Quadro de Epstein. Fornecido pela Brockhaus Messtechnik, modelo MPG100D. Foram utilizadas, induções de 1T e 1,5T em frequências de 50Hz e 60Hz.

Foram analisados conjuntos das amostras com 32 lamelas (16 DL e 16 DT) de 280x30 mm, nas direções longitudinal e transversal da chapa e as análises foram realizadas antes dos tratamentos, após o tratamento térmico a seco.

As lâminas foram inseridas no quadro de Epstein formando juntas duplamente sobrepostas nos cantos, intercalando as amostras cortadas DL e DT. Por fim, os parâmetros como peso, dimensão, quantidade e densidade das lamelas foram inseridos no software do Equipamento para que pudesse dar início à medição.

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise Microestrutural

#### 5.1.1 Sanidade Interna

O resultado obtido das análises de inclusões não metálicas das amostras A, B e C registrados nas tabelas 3 e 4.

**Tabela 3 - Inclusões não metálicas STT.**

#### AMOSTRA

**Sulfeto**

**Aluminato**

**Silicato**

**Óxido / Globular**

**Fino**

**Grosso**

**Fino**

**Grosso**

**Fino**

**Grosso**

**Fino**

**Grosso**

**A**

---

---

---

---

---

---

1

---

**B**

---

---

---

---

---

1

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br

**C**

---

---

---

---

---

---

1

---

Fonte: Autora, 2019.

**Tabela 4 - Inclusões não metálicas CTT.**

**AMOSTRA**

**Sulfeto**

**Aluminato**

**Silicato**

**Óxido / Globular**

**Fino**

**Grosso**

**Fino**

**Grosso**

**Fino**

**Grosso**

**Fino**

**Grosso**

**A**

---

---

---

---

---

---

1

---

**B**

---

---

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br

--

--

--

--

1/2

--

**C**

--

--

--

--

--

--

--

1/2

--

Fonte: Autora, 2019.

Autora, 2019.

Através das tabelas 3 e 4 observamos que os níveis de inclusões não metálicas podem ser comparados nas amostras STT e CTT. Podemos observar que nas amostras B e C houve redução do nível de óxidos finos de 1 para 1/2 durante o tratamento térmico a seco. Mesmo sendo pouco sensível, esta redução pode contribuir para os valores das propriedades magnéticas de acordo com [2]. E as amostras B e C podem apresentar por isto, melhores resultados.

#### 5.1.2 Micrografias

As Figuras 1, 2 e 3, apresentam as microestruturas das amostras A, B e C respectivamente em duas situações: STT e CTT com aumentos de 200X .

As amostras A, B e C (STT) apresentaram microestrutura semelhante formada por grãos ferríticos heterogêneos associados a cementita de morfologia globular fina dispersa em toda a matriz.

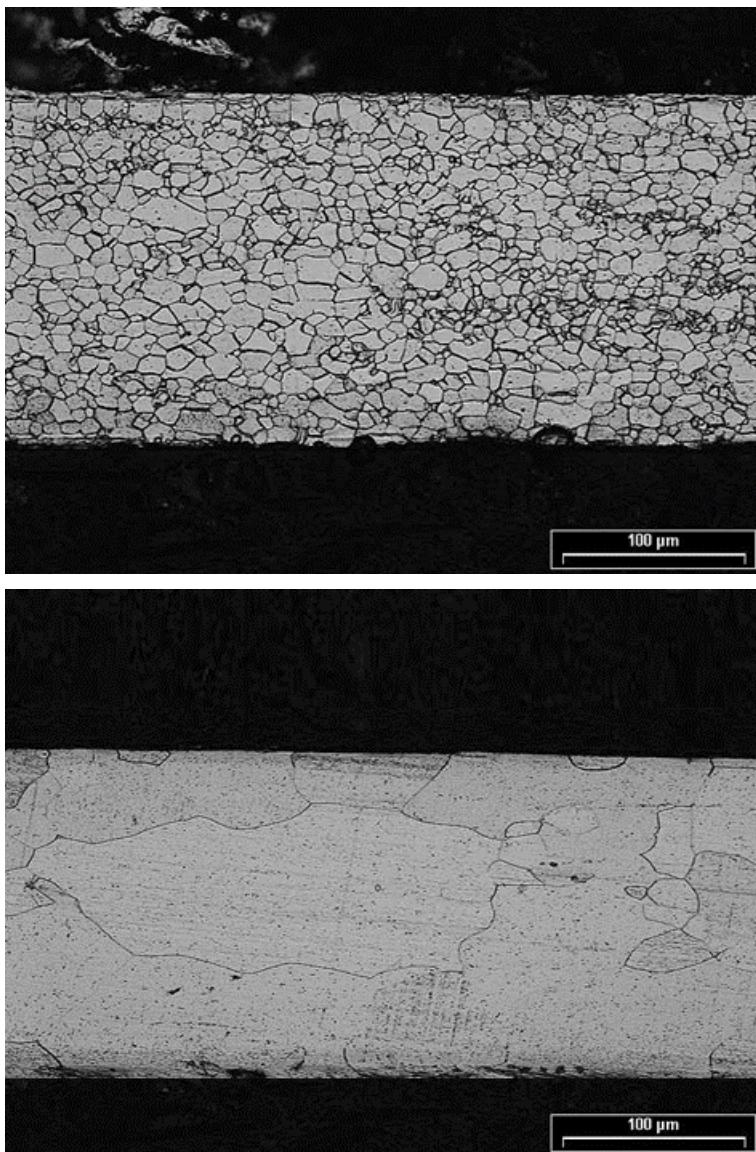
As amostras A, B e C (CTT) apresentaram grãos ferríticos associados a cementita globular fina dispersa na matriz, porém possuem heterogeneidade acentuada caracterizada por apresentarem grãos muito maiores que outros, evidenciando possível crescimento anormal durante tratamento térmico a seco.

**Figura 1 - Micrografias Amostra A.**

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br



1. STT. Aumento 200X

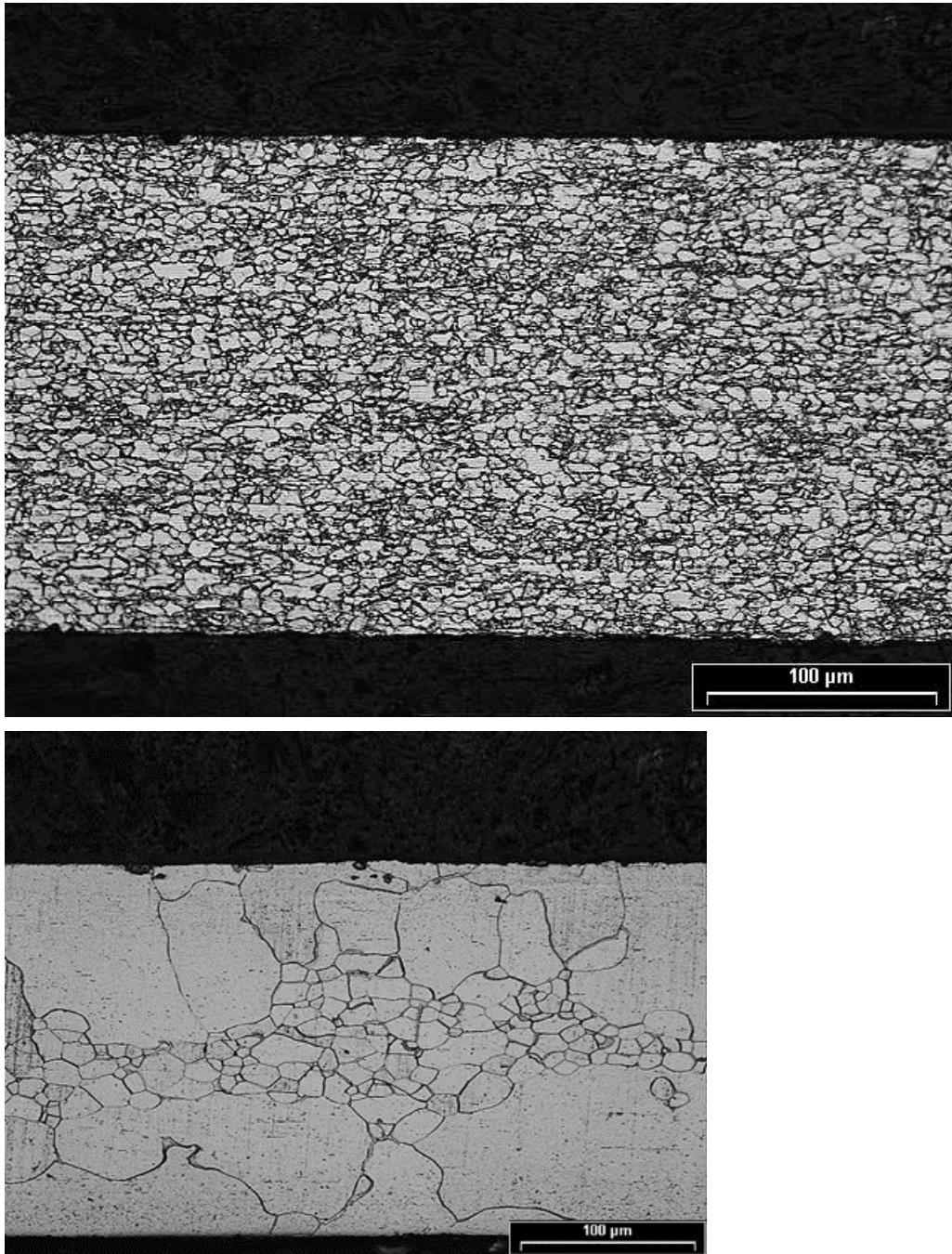
1. CTT. Aumento 200X

**Figura 2 - Micrografias amostra B.**

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br



1. STT. Aumento 200X

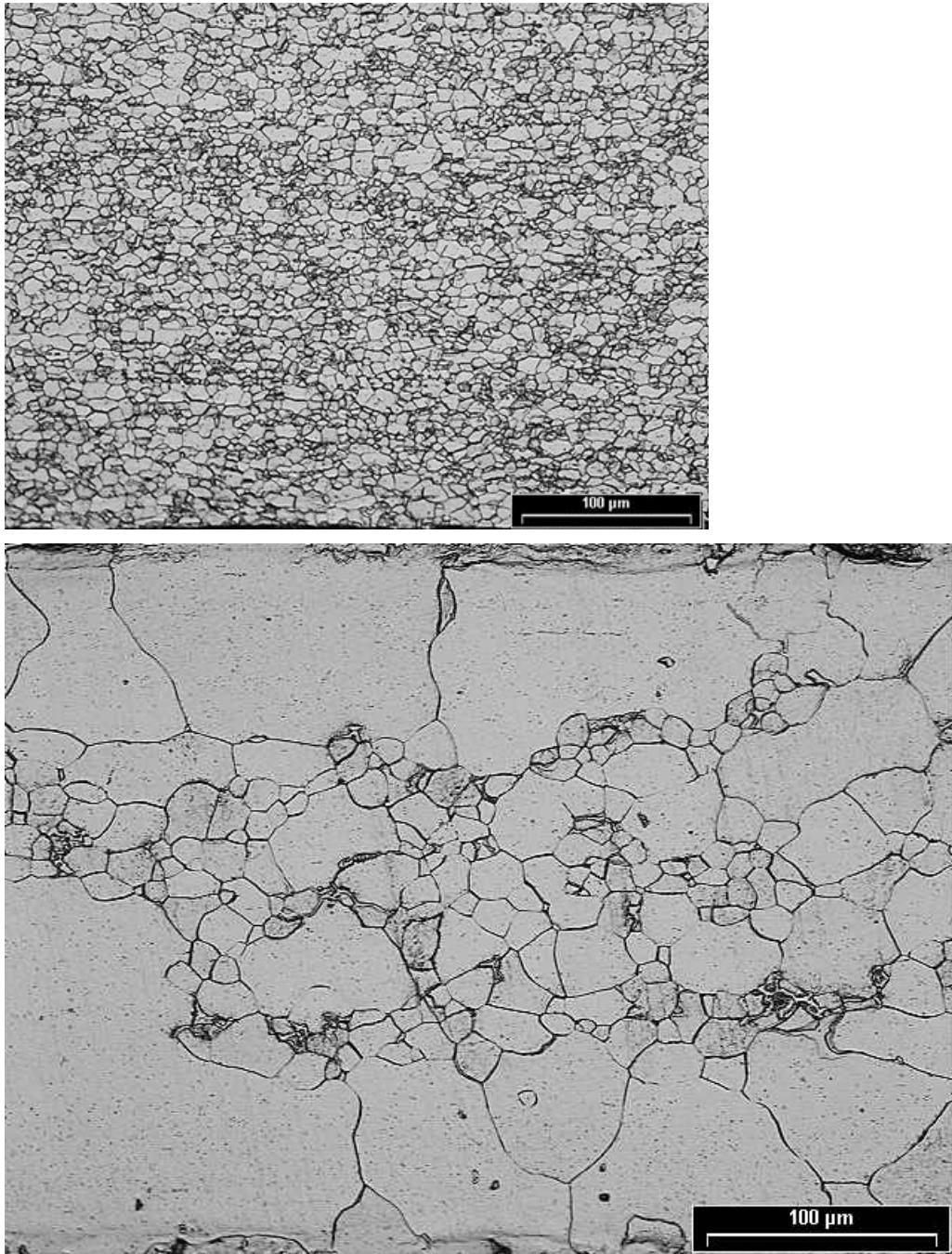
1. CTT. Aumento 200X

**Figura 3 - Micrografias amostra C.**

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br



1. STT. Aumento 200X

1. CTT. Aumento 200X

De acordo com [3], a recristalização apóis recozimento final pode contribuir significativamente com a redução das perdas magnéticas e com aumento da permeabilidade magnética. É possível que as propriedades magnéticas sejam melhores nas amostras CTT.

#### 5.1.3 Tamanho de grão

As tabelas 5 e 6 apresentam o resultado da medida do tamanho médio de grão das amostras A, B e C, STT e CTT respectivamente.

**Tabela 5 - Tamanho de grão das amostras STT.**

#### Amostra

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br

**Tamanho de grão ( $\mu\text{m}$ )**

A

16,8

B

10,0

C

14,1

Fonte: Autora, 2019.

**Tabela 6 - Tamanho de grão das amostras CTT.****Amostra****Tamanho de grão ( $\mu\text{m}$ )**

A

80,0

B

95,1

C

113,1

Fonte: Autora, 2019.

Podemos confirmar agora quantitativamente o que foi observado nas micrografias, que houve crescimento de grão durante tratamento térmico a seco conforme esperado. A amostra C apresentou maior tamanho de grão após tratamento térmico que as demais, se enquadrando no tamanho de grão ideal visado entre 100 e 150  $\mu\text{m}$ , de acordo com [2]. Porém, apresentou grande quantidade de outros grãos menores na microestrutura, caracterizando assim a microestrutura como heterogênea.

A amostra B também apresentou este comportamento, porém seus grãos menores possuem tamanho sensivelmente maior que os grãos menores da amostra C.

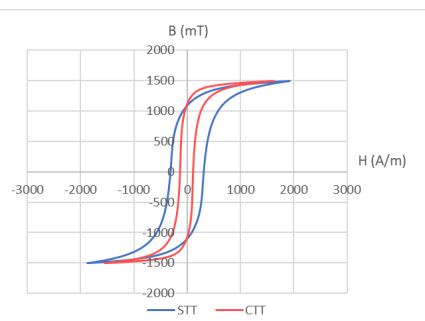
De acordo com [4], os contornos de grão são centros de ancoramento, pois, a estrutura de domínios de um grão está acoplada à do seu grão vizinho, e uma parede de domínio em um grão só se moverá se a do grão vizinho mover-se acopladamente.

1.

**5.2 Propriedades magnéticas****5.2.1 Curva de Histerese**

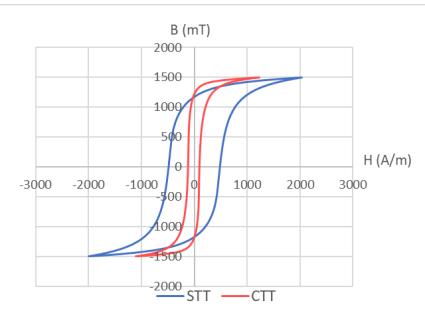
As curvas de histerese das amostras estudadas foram traçadas de acordo com o resultado do ensaio de Epstein, e serão apresentadas nas Figuras 4, 5 e 6.

**Figura 4 - Curva de histerese - Amostra A.**<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br



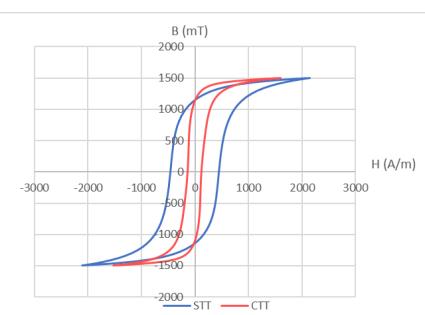
Fonte: Autora 2019.

**Figura 5 - Curva de Histerese - Amostra B.**



Fonte: Autora 2019.

**Figura 6 - Curva de Histerese - Amostra C.**



Fonte: Autora, 2019.

Podemos observar através das curvas das Figuras 4, 5 e 6 que:

1. As curvas são semelhantes e é possível notar que como previsto, as amostras apresentaram redução de área em função do tratamento térmico a seco.
2. Podemos ressaltar algumas diferenças perceptíveis entre elas comparando inicialmente as curvas STT, demarcadas em azul, que as amostras A, B e C apresentaram os valores de indução de saturação,  $B_s$  e intensidade do campo magnético,  $H_s$ , crescentes respectivamente. E a maior área interna da curva é a da amostra B.
1. Comparando agora a curvas das amostras CTT, demarcadas em laranja, podemos observar que a menor  $H_s$  é a da curva da amostra B, e a curva da amostra A possui maior  $B_s$ . Não é possível comparar as áreas neste caso, apenas qualitativamente, sendo necessário somente a interpretação da separação das perdas separadas por componentes, já que de acordo com Landgraf et al (2001), a área interna da curva de histerese representa a parcela histerética das perdas.
2. As amostras B possuí menor  $H_c$ . De acordo com Campos [5], o  $H_c$  sempre diminui com o aumento de tamanho de grão, no entanto podemos comprovar a afirmação baseado nos resultados de tamanho de

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

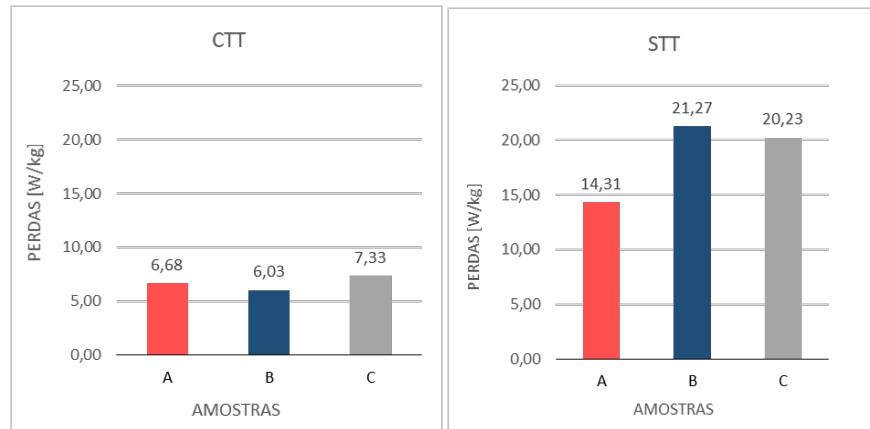
<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br

### 5.2.2 Perdas Magnéticas

A Figura 7 apresenta os valores de perdas magnéticas das amostras A, B e C (STT e CTT) resultantes do Ensaio de Epstein. Os valores de perdas magnéticas apresentados, foram avaliadas na indução de 1,5T e frequência de 60Hz.

**Figura 7 - Perdas das amostras.**



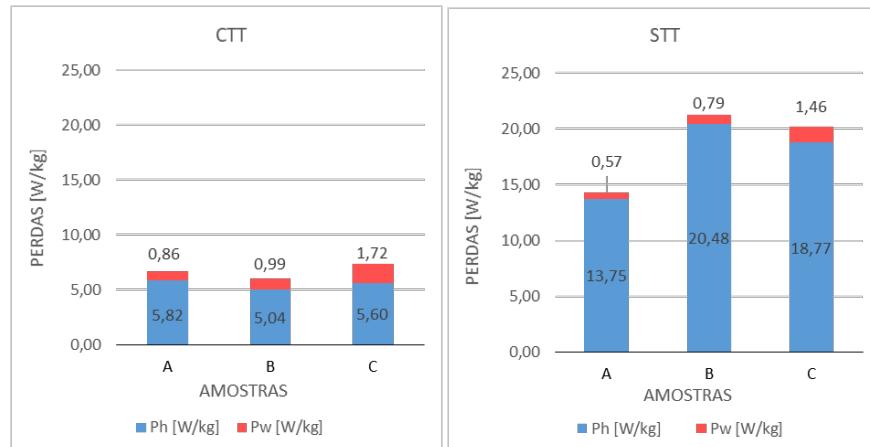
Fonte: Autora, 2019.

A Figura acima demonstra que comparando as amostras A, B e C (STT), o menor valor de perda encontrado foi para a amostra A e existe diferença entre as amostras B e C.

Após tratamento térmico a seco, foi possível notar que houve redução dos níveis de perda em ambas as amostras analisadas. Redução de 53%, 71% e 63% respectivamente para as amostras A, B e C. A amostra que obteve menor valor foi a amostra B e não a amostra A como esperado, segundo a análise das amostras STT. Isto pode ser atribuído às alterações microestruturais e químicas que podem ter acontecido durante o tratamento favoreceram mais os valores das perdas magnéticas da amostra B, que antes do tratamento possuía o maior valor de perdas magnética dentre as três amostras.

Para melhor analisarmos as perdas magnéticas, a Figura 8 apresenta a separação em componentes das perdas, as Perdas Histeréticas (Ph) e as Perdas anômalas (Pw).

**Figura 8 - Separação em componentes das Perdas Magnéticas.**



<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br

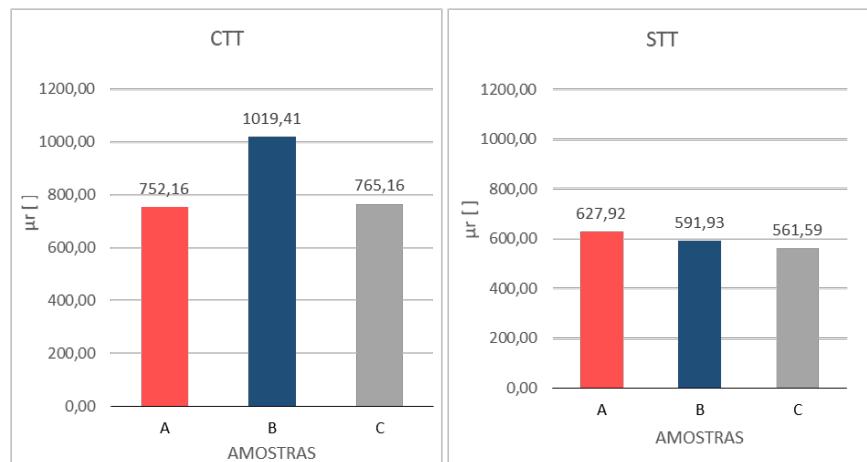
Podemos observar que a maior contribuição para o valor das perdas totais foram as perdas histeréticas. Em todas as amostras analisadas houve redução desta componente após tratamento térmico, porém ocorreu com maior intensidade na amostra B, que passou de possuir o maior valor de permeabilidade no estado STT para o menor valor no estado CTT.

Observamos também que, houve aumento da parcela anômala após tratamento térmico, isto pode se dar ao fato de que após tratamento térmico houve aumento do tamanho de grão, e de acordo com o [6], o consequente aumento da componente da perda anômala. A amostra B apresentou menor acréscimo da parcela anômala neste caso.

### 5.2.3 Permeabilidade

A Figura 9 apresenta os valores de permeabilidade magnética das amostras A, B e C (STT e CTT) resultantes do Ensaio de Epstein. Os valores de permeabilidade apresentados, foram também avaliadas na indução de 1,5T e frequência de 60Hz.

**Figura 9 - Permeabilidade Magnética.**



Podemos observar de acordo com a Figura acima que houve aumento da permeabilidade magnética após o tratamento a seco, em todos os casos de acordo com o que disse [7]. Aumentos de 19%, 72% e 36% respectivamente para as amostras

A, B e C respectivamente. A amostra B possuiu o maior aumento de permeabilidade após tratamento térmico, amostra CTT. Assim como também apresentou melhor valor de perda magnética em comparação com as demais.

## 6. CONCLUSÕES

- O nível de inclusões não metálicas, e o tamanho de grão após tratamento térmico (CTT), podem ter contribuído para que o melhor resultado de perda não fosse encontrado para a amostra esperada, a amostra A, de menor espessura e maior tamanho médio dos grãos antes do tratamento.
- O tratamento térmico a seco utilizado como recozimento final, utilizado principalmente para alívio de tensões e crescimento de grãos, proporcionou como esperado, redução significativa das perdas totais e

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br

- O recozimento final produziu amostras com grãos de tamanho superior a 80 µm e na amostra C, com 113,1 µm, apresentou mesmo comportamento dos aços elétricos com tamanho de grão ideal na faixa de 100 e 150 µm. No entanto as amostras apresentam alto grau de heterogeneidades nos tamanhos de grão na microestrutura. Juntamente com grãos grandes, surgiram grãos menores que chegam a 11,9 µm.
- As heterogeneidades da microestrutura após recozimento podem ser atribuídas à ocorrência incompleta de recristalização e de crescimento de grão, que ocorreu preferencialmente em algumas regiões, pois não se inicia em todos os lugares ao mesmo tempo, mantendo as outras regiões que possuem cinética de recristalização mais lentas sujeitas apenas à recuperação. Esse fenômeno pode competir com a recristalização. Este fato foi analisado através de análises das micrografias, distribuição de tamanho de grão e microdureza.
- A parcela histerética das perdas, que é causada principalmente por movimentação e nucleação de paredes de domínio magnético durante a magnetização do material ferromagnético, se apresentou como a maior representante nas perdas totais. Indicado sua relação direta com microestrutura, teve menor valor para a Amostra A, que possui maior tamanho de grão.
- A amostra B possuiu um conjunto de fatores que contribuíram para que os resultados de perda magnética total e permeabilidade magnética fossem melhores do que nas outras amostras.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 GODINHO, F. A. L; Envelhecimento magnético em Aços Elétricos estudo a partir da Teoria LSW. Dissertação. Universidade Federal Fluminense – EEIMVR. Volta Redonda, 2012.
- 2 INSTITUTO DE PESQUISAS TÉCNICAS, IPT. Aços Carbono e Aços Siliciosos para Fins Elétricos. Curso organizado pelo Laboratório de Metalurgia do pó e Materiais Magnéticos. São Paulo, 14 a 16 de junho de 2000.
- 3 CAMPOS, M. F. de. Microestrutura, textura e propriedades magnéticas em Aços Elétricos. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2000, 300p.
- 4 MARRA, K. M. Cinética de descarbonatação de um aço GNO semiprocessado e sua influência nas propriedades magnéticas e na susceptibilidade ao envelhecimento magnético. Tese Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais. Novembro de 2002.
- 5 PEREIRA Jr, I. A; MAZAROBA, M; HAFFNER, S; PEREIRA, L. A. Análise de propriedades magnéticas dos materiais em diferentes frequências e com correção de harmônicos. Congresso Brasileiro de automática. Bonito, 12 a 16 de setembro de 2010, p. 1.
- 6 LANDGRAF, F.J.G. Propriedades magnéticas de Aços para fins elétricos. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo-SP, [2002].
- 7 DAFÉ, S. S. F. Influência do processamento termodinâmico sobre a formação de bandas de cisalhamento e propriedades magnéticas de um aço não orientado com 3% de silício. Dissertação de Mestrado. Rede Temática em Engenharia de Materiais. REDEMAT- CETEC – UEMG. Minas Gerais. Fevereiro, 2010.

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense, julianamiranda@id.uff.br

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense, marcosflavio@id.uff.br

<sup>3</sup> Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, elguedes@csn.com.br

## 8. AGRADECIMENTOS

Agradeço a CSN por ter cedido as amostras utilizadas neste presente trabalho, em especial ao Técnico Willian e ao Eng. Emerson por todo o suporte durante a amostragem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aços elétricos (GNO), Recozimento contínuo, Propriedades magnéticas