# UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

## **GUILHERME ORIGO FULOP**

Estudos de ligas de Fe-Ti laminadas para utilização em máquinas elétricas.

Lorena – SP

### **GUILHERME ORIGO FULOP**

Estudos de ligas de Fe-Ti laminadas para utilização em máquinas elétricas.

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, na área de Concentração: Materiais Convencionais e Avançados.

Orientadora: Profa. Dra. Cristina Bormio Nunes

Versão corrigida

Lorena – SP

2018

# Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado da Escola de Engenharia de Lorena, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Origo Fulop, Guilherme Estudos de ligas de Fe-Ti laminadas para utilização em máquinas elétricas. / Guilherme Origo Fulop; orientadora Critina Bormio-Nunes - Versão Corrigida. - Lorena, 2018. 89 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais na Área de Magnetismo e Supercondutividade) - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2018

1. Magnetostricção. 2. Ruído. 3. Transformadores. 4. Fe-ti. 5. Fe-si. I. Título. II. Bormio-Nunes, Critina, orient.

"Ninguém baterá tão forte quanto a vida. Porém, não se trata de quão forte pode bater, se trata de quão forte pode ser atingido e continuar seguindo em frente. É assim que a vitória é conquistada." Sylvester Stallone - Rocky Balboa

#### **AGRADECIMENTOS**

Ao meu pai, Roberto Fulop, à minha mãe, Eunicélia Origo Fulop e a meu irmão, Matheus Origo Fulop, por todo o suporte que me deram desde o começo da graduação até o mestrado, por sempre estarem presentes na minha vida, mesmo estando longe. Por sempre serem um porto seguro, não importando o momento, eu sabia que sempre podia contar com vocês. E na volta para casa era sempre uma comemoração gostosa. Também gostaria de colocar aqui minhas tias Edneia Romero Origo e Nice e o Tio Betão, que sempre me esperavam com a mesma ansiedade. Aos meus avós Desuardo Origo e Maria Romero Origo e a todos os parentes que sempre me apoiaram.

À minha namorada, Aline da Silva Alencar, por todos os ensinamentos que me trouxe, pela paciência, por todos os bons momentos, risadas, bolos e outras comidas gostosas que fizemos. Obrigado pela tranquilidade de sempre, por ser sempre um porto seguro, por sempre ter uma conversa confortante e alegre.

À minha orientadora, Cristina Bormio Nunes, pela oportunidade de trabalho, pela confiança que teve em mim ao iniciar um trabalho com um assunto novo, pelo ânimo que me deu ao iniciar novamente do zero, pela paciência quase que diária e por toda a ajuda fornecida.

Ao meu amigo e irmão Mateus Botani de Souza Dias por todos os momentos de risadas (que não foram poucos), por sempre ter algum conselho guardado na manga e sempre aceitar minhas sugestões de colocar bacon na comida. E, claro, agradeço por toda ajuda e paciência que teve ao longo desses anos.

Ao meu velho amigo, Vinnicius Cavalcanti, que conheço faz anos e a amizade continua a mesma, aliás, preciso dar uma passada aí no Rio pra ter aquela jogatina e rodizião.

Agradeço ao meu amigo do ensino fundamental, André Giafferi, pelos anos de amizade, pelos conselhos e ajudas, claro, às idas ao Frans Café em Bauru.

Também aos amigos da graduação (Lucas Chiaramonte, Luiz Felipe Urias, Beatriz Parra, Murilo Sacco, Jamberti Mainetti, Hugo Hamano) e da pós graduação (Vinicião, Fred, Júlio, Brunão, Lucas, Fabião, Denis e Nabil) por todo apoio dado durante o mestrado e por todas as idas ao glorioso Via.

Sem esquecer do MACVEST, pela oportunidade de dar aula e ajudar pessoas que desejam entrar em uma universidade de qualidade e por me ajudar a diminuir minha timidez a cada aula dada.

À oficina do DEMAR e a todos os técnicos pela agilidade, competência e paciência para toda ajuda requisitada.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), projeto nº 2015/25461-6, pela bolsa de mestrado concedida a mim.

**RESUMO** 

FULOP, G. O. Estudos de ligas de Fe-Ti laminadas para utilização em máquinas elétricas.

2017. 89p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Engenharia de Lorena,

Universidade de São Paulo, Lorena, 2017.

O presente trabalho teve como foco um problema que vem se tornando cada vez mais grave nos

dias de hoje, já que, com o crescimento das zonas urbanas, algumas residências estão se

aproximando dos transformadores de potência. Transformadores são máquinas cuja função é

aumentar ou diminuir a diferença de potencial de uma rede elétrica, porém, eles geram um nível

significativo de ruído, podendo ser prejudicial à saúde. Esse ruído é causado pela

magnetostricção pelas chapas de Fe-Si as quais compõem o núcleo. Assim, o intuito desse

trabalho foi estudar duas ligas de Fe-Ti, para averiguar seu comportamento magnetostrictivo.

Além disso, é importante estudar as propriedades magnéticas dessas ligas, a fim de se analisar

quais são as perdas magnéticas associadas a essas ligas. Portanto, também foram feitas medidas

de indução magnética, permeabilidade magnética e resistividade elétrica. Também foram feitas

análises de microscopia eletrônica de varredura, para análise do tamanho e morfologia dos

grãos, difratometria de raios X, para identificação das fases presentes e difração de elétrons

retroespalhados, para identificação da textura. Todas essas medidas foram feitas para as ligas

de Fe-Ti e uma liga de Fe-Si comercial de grão orientado e os resultados foram comparados

entre si. As ligas de Fe-Ti apresentaram valores de magnetostricção menores do que a liga de

Fe-Si, porém, apresentaram valores bem maiores quando analisadas as perdas magnéticas. Com

isso, foi possível fazer uma primeira análise das ligas de Fe-Ti, criando diversas possibilidades

para estudos futuros.

Palavras chaves: Magnetostricção. Ruído. Transformadores. Fe-Ti. Fe-Si.

#### **ABSTRACT**

FULOP, G. O. Study of rolled Fe-Ti alloys for using in electric machines. 2017. 89p. Dissertation (Master of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2017.

The present research had as focus a problem that is becoming very serious nowadays, since with the growth of urban areas, some households are approaching the power transformers. Power transformers are machines whose function is to increase or decrease the potential difference of a power grid, but they generate a significant level of noise, which can be harmful to human health. This noise is created by the magnetostriction of the Fe-Si plates that compose the core. Thus, the purpose of this research was to study two Fe-Ti alloys to investigate their magnetostrictive behavior. In addition, it is important to study the magnetic properties of these alloys in order to analyze the magnetic losses associated with these samples. Therefore, measurements of magnetic induction, magnetic permeability and electrical resistivity were also made. Were made analyzes of scanning electron microscopy to investigate the size and morphology of the grains, X-ray diffraction, to identify the phases that are present in the material and electron backscatter diffraction to identify the texture. These characterizations were made for the Fe-Ti alloys and a commercial grain-oriented Fe-Si alloy. The results were compared to each other. Fe-Ti alloys showed lower magnetostriction values than the Fe-Si alloy, however they presented highest values of magnetic losses. As a result, it was possible to make a first analysis of the Fe-Ti alloys properties, creating several possibilities for future studies in order to improve Fe-Ti alloys properties.

Key words: Magnetostriction. Noise. Transformers. Fe-Ti. Fe-Si.

# SUMÁRIO

| 1      | INTRODUÇÃO   | 11 |
|--------|--|----|
| 2      | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA  | 12 |
| 2.1    | Magnetostricção  | 12 |
| 2.2    | Materiais magnéticos macios  | 12 |
| 2.3    | Transformador  | 14 |
| 2.4    | Perdas Magnéticas  | 16 |
| 2.4.1  | Perdas Histeréticas  | 16 |
| 2.4.2  | Perdas por corrente de Foucault ou corrente parasita (Eddy Currents) | 17 |
| 2.4.3  | Perda anômala ou de excesso  | 20 |
| 2.4.4  | Perda magnética total  | 20 |
| 2.5    | Ligas de Fe-Si   | 22 |
| 2.6    | Ligas de Fe-Ti   | 24 |
| 2.7    | Textura  | 26 |
| 3      | MATERIAIS E MÉTODOS  | 29 |
| 4      | RESULTADOS E DISCUSSÃO   | 36 |
| 4.1    | Liga de Fe-Si  | 36 |
| 4.1.1  | Microestrutura   | 36 |
| 4.1.1  | .1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)                         | 36 |
| 4.1.1. | .2 Difratometria de Raios X (DRX)                                    | 37 |
| 4.1.1. | .3 Difração de elétrons retroespalhados (EBSD)                       | 38 |
| 4.1.2  | Propriedades Magnéticas  | 40 |
| 4.1.2. | .1 Indução Magnética (B)   | 40 |
| 4.1.2. | .2 Magnetostricção   | 43 |
| 4.2    | Liga Fe-3Ti  | 44 |
| 4.2.1  | Microestrutura   | 44 |
| 4.2.1. | .1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)                         | 44 |
| 4.2.1. | .2 Difratometria de raios X (DRX)                                    | 47 |
| 421    | 3 Difração de elétrons retroespalhados (FRSD)                        | 50 |

| 4.2.2  | Propriedades Magnéticas   | . 53 |
|--------|---|------|
| 4.2.2. | .1 Indução Magnética  | 53   |
| 4.2.2. | 2 Magnetostricção   | 58   |
| 4.3    | Liga Fe-4Ti   | 60   |
| 4.3.1  | Microestrutura  | 60   |
| 4.3.1. | .1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)                          | 60   |
| 4.3.1. | .2 Difratometria de raios X (DRX)                                     | 64   |
| 4.3.1. | .3 Difração de elétrons retroespalhados (EBSD)                        | 68   |
| 4.3.2  | Propriedades Magnéticas   | . 71 |
| 4.3.2. | .1 Indução Magnética  | 71   |
| 4.3.2. | 2 Magnetostricção   | 76   |
| 4.4    | Comparação dos Resultados de Propriedades Magnéticas e Microestrutura | . 78 |
| 4.4.1  | Resistividade Elétrica  | 81   |
| 4.4.2  | Perdas Histeréticas e perdas por corrente parasitas                   | . 82 |
| 5      | CONCLUSÕES  | . 84 |
| 6      | PRÓXIMOS PASSOS   | .87  |
| REF    | ERÊNCIAS  | . 88 |

# 1 INTRODUÇÃO

Transformadores são dispositivos que funcionam em corrente alternada e que permitem aumentar ou diminuir a tensão elétrica em um circuito de corrente alternada sem que sua frequência seja alterada. Um dos componentes do transformador é o núcleo que é feito de chapas finas de Fe-Si isoladas eletricamente. (1)

Para utilizar um material como núcleo magnético de máquinas elétricas deve possuir boas propriedades magnéticas e elétricas, tais como: alta resistividade elétrica, ser facilmente magnetizado, ter baixo campo coercivo e alta permeabilidade magnética. Tais propriedades visam a diminuição das perdas de energia associadas às propriedades magnéticas. (2)

Materiais texturizados na direção de fácil magnetização também são desejáveis para a obtenção de alta permeabilidade relativa. A obtenção de grãos grandes também é desejável, pois a diminuição da área relativa aos contornos de grão facilita a movimentação das paredes dos domínios magnéticos. (3, 4)

O material comercialmente usado que atende todas essas especificações são ligas de Fe-Si, sendo a com 3% em peso de Si a mais utilizada. Este material também chamado de aço elétrico. (2, 3, 5, 6)

Recentemente, com o crescimento das áreas urbanas, as residências estão se aproximando dos transformadores. Desta forma, o problema do ruído gerado por eles tem se tornado importante para a saúde, podendo causar vários distúrbios. Tal ruído é gerado pela magnetostricção do material que compõe o núcleo do transformador. Portanto, materiais com magnetostricção nula são interessantes para o desenvolvimento de núcleos de transformadores, a fim de diminuir o ruído gerado. (2, 7, 8)

Ligas de Fe-Ti mostraram ter baixos valores de magnetostricção, podendo ser um material promissor para essas aplicações. (9 e 10)

O intuito desse trabalho foi fazer um primeiro levantamento das propriedades magnéticas de ligas de Fe-Ti laminadas em forma de chapas, averiguando o comportamento magnetostrictivo, bem como medidas de indução magnética e resistividade do material, comparando-o com os valores de uma liga comercial Fe-Si de grão orientado. Também foram avaliadas as microestruturas das ligas após a laminação e tratamento térmico. Para tanto, foram estudadas ligas de Fe-Ti com 3% e 4% em peso de Ti. Também foram feitas medidas de magnetostricção e indução magnética da chapa de Fe-Si comercial, comparando os resultados com as ligas de Fe-Ti em estudo. Além disso, foram quantificados os valores de perdas histeréticas e de corrente parasitas para as ligas estudadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Magnetostricção

Magnetostricção é a mudança nas dimensões nos materiais ferromagnéticos devido à aplicação de um campo magnético externo. Isso ocorre devido à movimentação das paredes dos domínios magnéticos do material. A magnetostricção é máxima quando todos os domínios magnéticos se alinham com o campo externo aplicado, nessa condição, o material está saturado. Quando há uma expansão, diz-se que a magnetostricção é positiva e quando há uma contração, a magnetostricção é negativa. (11, 12)

A deformação medida na mesma direção na qual o campo magnético é aplicado denomina-se magnetostricção longitudinal ( $\lambda_{long}$ ) enquanto que na direção perpendicular à direção de aplicação do campo, magnetostricção transversal ( $\lambda_{trans}$ ). Para se determinar a magnetostricção total ( $\lambda_{total}$ ) e a magnetostricção de saturação ( $\lambda_s$ ) utiliza-se a equação (1).

$$\lambda_{total} = \frac{3}{2}\lambda_s = \lambda_{long} - \lambda_{trans} \tag{1}$$

Há uma relação entre os valores de magnetostricção longitudinal e transversal que é válida quando o material é isotrópico por considerar que não há variação de volume, dada pela equação (2).

$$\lambda_{long} = -2\lambda_{trans} \tag{2}$$

Um baixo valor de magnetostricção também é uma propriedade interessante para o desenvolvimento de alguns dispositivos magnéticos, a fim de diminuir o ruído gerado. Chapas usadas em núcleos de transformadores de potência necessitam de baixos valores de magnetostricção, para reduzir o ruído e o consequente aquecimento. (13)

#### 2.2 Materiais magnéticos macios

Os materiais ideais para serem aplicados em transformadores são os chamados materiais magnéticos macios. Tais materiais são caracterizados pela alta permeabilidade magnética, que é uma propriedade de quão facilmente o material se magnetiza devido à aplicação de um campo

magnético. Materiais magnéticos macios são fáceis de se magnetizar, significando que se magnetizam para baixos valores de campo magnético aplicado, ou seja, a densidade de fluxo magnético (B) é alta dentro do material quando um baixo valor de campo externo (H) é aplicado. Além disso, devem possuir baixo valor de campo coercivo, que representa o campo magnético a ser aplicado no material a fim de desmagnetizá-lo totalmente. Tais materiais podem ser aplicados em corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). Em aplicações em CC, o material é magnetizado e a magnetização é constante enquanto a corrente está ligada. Se a corrente é desligada, o material é desmagnetizado, como é o caso dos ímãs usados em guindastes. Em aplicações em CA o material é magnetizado e desmagnetizado alternadamente de uma direção para a direção oposta em uma frequência determinada durante o período de operação, como é o caso em transformadores. (2, 3)

Para se entender o porquê de alguns materiais serem macios ou duros deve-se, primeiramente, compreender os fatores que afetam o formato da curva de magnetização, ou seja, a forma como a magnetização (M) muda a partir do estado desmagnetizado até o valor de saturação na presença de um campo aplicado H. Um fator que afeta fortemente o comportamento da curva M vs H é a anisotropia magnetocristalina, o que significa que as propriedades magnéticas dependem da direção cristalográfica em que são medidas. A Figura 1 mostra as curvas de magnetização nas direções <100>, <110> e <111> para monocristais de ferro. (3)

As direções <100> são as direções de fácil magnetização, pois, com campos muito baixos é possível atingir a saturação. Na situação do material desmagnetizado, os momentos magnéticos já estão nas direções <100>, tanto positivas quanto negativas. Se um campo é aplicado na direção (100), os momentos alinhados nas direções equivalentes, como (100), (010), etc. terão de rotacionar, através da movimentação das paredes para a direção (100). O valor de M do ponto 1, na Figura 1, é praticamente o valor da magnetização de saturação. (3)

Já no caso de aplicar um campo nas direções <110> e <111>, uma componente da projeção do momento na direção <100>, por exemplo, já existe e vale  $M_s/\sqrt{2}$ , correspondente ao ponto 2 na Figura 1. Para levar a componente perpendicular às direções <110> é necessário fornecer muita energia, portanto, o campo necessário para se atingir a saturação é maior. (3)

No caso das direções <111>, o mesmo raciocínio ao das direções <110> pode ser feito, mas neste caso as projeções de <100> nas direções paralelas a <111> resulta no ponto 3 da Figura 1, onde  $M_s/\sqrt{3}$  é o valor da magnetização. A direção (111) é denominada de direção de

difícil magnetização, pois é necessário um campo alto para que o material sature nesta direção.(3)

O campo coercivo tende a ser aumentado com a presença de defeitos estruturais no material, podendo ser vacâncias, inclusões, discordâncias e partículas de segunda fase não magnética, ou ainda por contornos de grão. Tais defeitos podem aprisionar as paredes de domínio dificultando sua movimentação. Para que a parede seja desaprisionada é necessário fornecer mais energia, que é dada pelo aumento do campo magnético. Com isso, o laço de histerese torna-se mais largo pelo aumento do campo coercivo e sua área aumenta, aumentando as perdas histeréticas. Portanto, é importante que os materiais magnéticos macios sejam isentos de tais defeitos estruturais, ou seja, tenham baixos valores de campo coercivo (H<sub>c</sub>). Com relação ao efeito da anisotropia cristalina em policristais, será discutido no item 2.7.

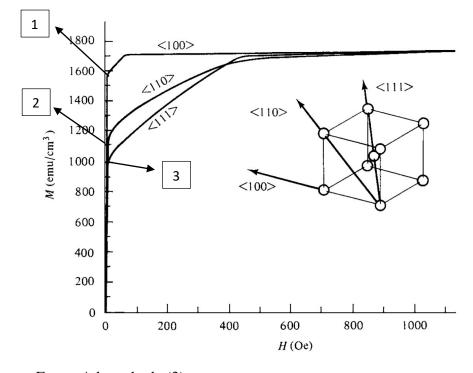


Figura 1- Curva de magnetização para monocristal de ferro.

Fonte: Adaptado de (3).

#### 2.3 Transformador

O funcionamento é tal que aplica-se uma corrente alternada na bobina primária, a bobina secundária é posicionada próxima à primária, sendo que são eletricamente isoladas uma da outra. A corrente alternada que está sendo aplicada na bobina primária gera um fluxo magnético

que varia com o tempo. O núcleo de lâminas de material magnético guia o fluxo magnético até a bobina secundária, induzindo, assim, uma diferença de potencial na bobina secundária. Um transformador é um dispositivo que permite aumentar ou diminuir a tensão elétrica em um circuito de corrente alternada. A Figura 2 representa um desenho esquemático de um transformador. (1,3)

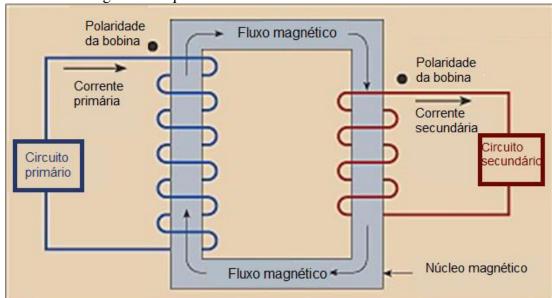


Figura 2- Esquema do funcionamento de um transformador.

Fonte: Adaptado de (1).

Mesmo sem possuir partes móveis, os transformadores produzem um ruído quando energizados. O material do núcleo de um transformador está sujeito a um campo magnético resultante alternado produzido pela corrente alternada nas bobinas primária, secundária e corrente parasita. Desse modo, as chapas que compõem o núcleo dilatam e contraem conforme o campo magnético varia dos valores — H a zero e de zero a +H, efeito este causado pela magnetostricção do material. Desta forma, o material vibra com o dobro da frequência do campo ao qual ele é exposto. Estes movimentos mecânicos periódicos criam vibrações sonoras com uma frequência fundamental 120 Hz. Em países da Europa, a frequência da corrente é de 50 Hz, portanto, esses harmônicos possuem uma frequência fundamental de 100 Hz. (3, 14, 15)

É importante controlar os níveis de ruído, pois podem causar reações adversas em seres humanos. De 40 a 45 dB começa a haver interferência na fala, que se torna grave acima de 60 dB. Acima de 50 dB, podem ocorrer insônia e interferência do sono. Para exposições prolongadas com ruídos acima de 75 dB pode ocorrer perda auditiva. (7)

A Tabela 1 mostra como variam os níveis sonoros para transformadores com isolamento a óleo.

Tabela 1 – Níveis sonoros para várias potências de transformadores.

| Níveis Sonoros | Potência     |
|----------------|--------------|
| (dB)           | (kVA)        |
| 40 - 60        | até 500      |
| 65             | 4000 - 5000  |
| 73             | 6000 - 7500  |
| 76             | 8000 - 10000 |

Fonte: adaptado de (14).

#### 2.4 Perdas Magnéticas

Em aplicações em CA, como é o caso dos transformadores, é importante considerar a energia perdida em cada ciclo de histerese. Essas perdas podem ser divididas em três parcelas distintas: Perdas histeréticas, perdas por corrente de Foucault e perdas anômalas.

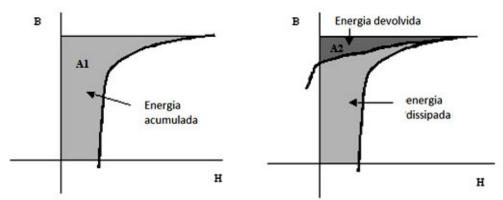
#### 2.4.1 Perdas Histeréticas

Esse tipo de perda relaciona-se com a área contida dentro do laço de histerese, que está relacionada a uma perda de energia. Enquanto é magnetizado, o material acumula energia potencial magnética até a magnetização máxima, a energia correspondente à área A1, mostrada na Figura 3, à esquerda. Quando é desmagnetizado, uma parte da energia gasta na magnetização é dissipada na forma de calor, dessa forma, a curva de desmagnetização não volta exatamente sobre a curva de magnetização. A energia dissipada é dada pela diferença entre as duas áreas A1 e A2, ou seja  $P_h = A1 - A2$ . A energia correspondente à área A2 também é mostrada na Figura 3, à direita.(2, 5)

Para reduzir a perda histerética podemos diminuir o valor do campo coercivo, diminuindo, assim, a área dentro do laço de histerese. Portanto, é necessário ter um material homogêneo, livre de defeitos, para que as paredes de domínio possam se movimentar livremente.

A perda histerética pode ser calculada pela diferença entre a área da energia acumulada e a devolvida em um ciclo de histerese feito em condição quase-estática, ou seja, para uma frequência aproximadamente nula.

Figura 3- Energia acumulada na magnetização (à esquerda) e energia devolvida e dissipada na desmagnetização (à direita).



Fonte: adaptado de (5).

#### 2.4.2 Perdas por corrente de Foucault ou corrente parasita (*Eddy Currents*)

Como foi discutido anteriormente, no funcionamento de um transformador um campo magnético alternante induz uma diferença de potencial na bobina secundária, o que, por sua vez, produz uma corrente elétrica nessa bobina. Essa diferença de potencial pode ser vista como uma força eletromotriz (fem), criada para tentar anular a variação de fluxo magnético. Entretanto, a fem também é induzida nas chapas que compõem o núcleo do transformador, pois são feitas de material condutor. Portanto, também são induzidas correntes elétricas nas chapas, denominadas de correntes parasitas, que, por sua vez, criam um campo magnético oposto  $(H_p)$  ao aplicado. (3)

Ao estudar correntes parasitas, é importante levar em consideração o efeito pelicular ( $skin\ effect$ ). A corrente de Foucault penetra até certa profundidade do material ( $\delta$ ), a intensidade da densidade de corrente diminui exponencialmente a partir da superfície até o centro do material, como na equação (3).

$$J = J_S e^{-\frac{x}{\delta}} \tag{3}$$

Onde J é a densidade de corrente no material,  $J_s$  é a densidade de corrente na superfície, x é a profundidade abaixo da superfície, medida da superfície ao centro, e  $\delta$  é o *skin depth*, que é medido da superfície para o centro e representa a profundidade na qual o valor de B cai para 37% do valor na superfície. Essa profundidade pode ser calculada através da equação (4). (3)

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \tag{4}$$

Onde  $\delta$  é o *skin depth* em cm,  $\rho$  é a resistividade em  $\Omega$ .cm,  $\mu$  é a permeabilidade e f é a frequência em Hz.

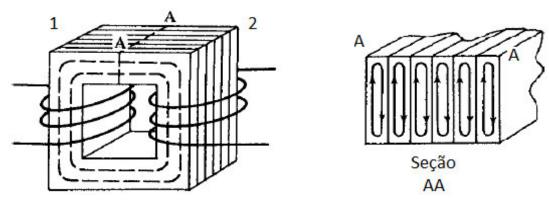
Conforme aproxima-se do centro do material, a intensidade de  $H_p$  aumenta, sendo máxima no centro do material. Dessa forma, o campo magnético resultante diminui da superfície para o centro. Isto ocorre pois, o *skin effect* cria uma espécie de blindagem no material, isolando o interior da peça do campo magnético aplicado. Como consequência, o fluxo magnético dentro do material é gerado somente até uma determinada profundidade. (3)

Dependendo da magnitude de  $\delta$ , se a espessura da chapa é muito grande, o fluxo magnético no centro da chapa é praticamente nulo, ou seja, o centro do material não está contribuindo em nada para a multiplicação do campo magnético aplicado, ou seja, o volume do dispositivo é maior do que necessitaria ser.(3)

Com base na equação (4), nota-se que a espessura da camada de blindagem ( $\delta$ ) diminui conforme a permeabilidade e a frequência aumentam e quando a resistividade diminui. Esse efeito pode ser muito forte quando analisamos os transformadores, pois trabalham com uma frequência de 50 a 60 Hz (consideradas baixas). Uma liga de Fe-3,25%at Si, com  $\mu$  = 6750 e  $\rho$  = 40 x 10<sup>-6</sup>  $\Omega$ .cm utilizada em um transformador teria uma  $\delta$  de 0,5 mm. Portanto, a fim de garantir que a densidade de corrente parasita diminua, a resistividade do material deve ser alta, pois mesmo que isso aumente o  $\delta$ , o valor da densidade de corrente  $J_s$  na superfície será menor para um mesmo campo magnético aplicado. Dessa forma, diminui a densidade de corrente parasita global e o campo  $H_p$ . Mas ainda, a fim de que o fluxo magnético percorra por quase todo o material, o núcleo deve ser composto por várias chapas, estas devem ser isoladas eletricamente e sua espessura deve ser menor que  $\delta$ . O isolamento elétrico das chapas evita o acoplamento destas por efeito de proximidade, que é causado devido ao campo magnético que uma chapa induz na outra devido à corrente de Foucault, fazendo com que as chapas se acoplem, o que seria equivalente a uma chapa grossa. (3)

A Figura 4 mostra as correntes parasitas nas chapas de um núcleo de um transformador. Conforme o campo magnético aumenta de 1 para 2 na Figura 4 à esquerda, as correntes parasitas fluirão em cada chapa na seção AA conforme mostra a Figura 5 à direita. O campo magnético produzido por essas correntes irá fluir de 2 para 1, contra o campo magnético principal do núcleo, e assim diminuindo o fluxo magnético total. (3)

Figura 4 - Correntes parasitas em um núcleo de transformador.



Fonte: adaptado de (3).

Para calcular a perda de potência por correntes parasitas pode-se utilizar a equação (5).

$$P_{cp} = \frac{(\pi . B . f . e)^{2}}{6 . d . \rho}$$
 (5)

Onde  $P_{cp}$  são as perdas por corrente parasita em W/kg, B é a indução em T, e é a espessura das chapas em m, f é a frequência em Hz, d é a massa específica em kg/m³ e  $\rho$  é a resistividade em  $\Omega$ .m.(5)

Portanto, através da equação (5), pode-se notar que quanto mais fina a chapa, menor o valor das perdas por corrente parasita. Também pode-se observar que com uma resistividade elétrica alta, o valor das perdas diminui, além de diminuir o efeito pelicular. É importante ressaltar que além de a corrente de Foucault produzir um campo magnético que se opõe ao campo magnético principal, ela também produz calor, que é proporcional a  $i^2R$ , onde i é a corrente de Foucault e R é a resistência no caminho percorrido por ela. (2, 3, 5)

Assim, com base no *skin effect* e na equação de  $P_{cp}$ , essa perda pode ser diminuída fazendo-se o núcleo composto por chapas finas fabricadas por laminação e isoladas eletricamente umas das outras, como mostrado na Figura 4, reduzindo a perda por corrente parasita.(2, 3, 5)

A perda por corrente de Foucault pode ser minimizada aumentando-se a resistividade da liga e/ou diminuindo a espessura da chapa, sendo essa uma das razões pelas quais o material é laminado até uma espessura de, aproximadamente, 0,3 mm.

#### 2.4.3 Perda anômala ou de excesso

A terceira parcela da perda magnética é a chamada perda anômala. Após medir o valor da perda total, observa-se que a soma da parcela referente à perda histerética com a fração relativa à perda por corrente de Foucault não atinge o valor total medido. Portanto, tornou-se necessário a introdução de uma parcela extra, cujo valor é a quantia que falta para completar as perdas magnéticas totais. (3, 5)

O nome "perda anômala" vem do fato de não se ter conhecimento da origem dessa perda, porém, possivelmente essa perda está associada à movimentação das paredes de domínio magnético dentro do material. Para diminuir essa perda deve-se ter um material o mais homogêneo possível, apresentando o mínimo de resistência à velocidade de movimentação das paredes dos domínios. (2, 3)

#### 2.4.4 Perda magnética total

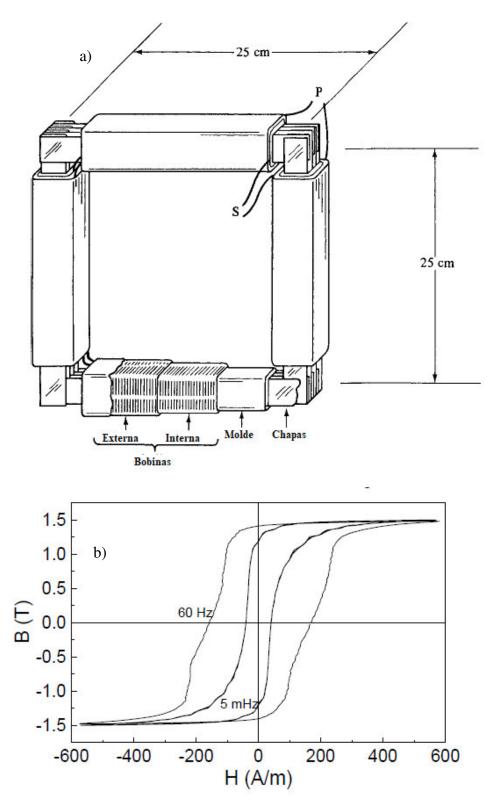
Após apresentarmos as três parcelas das perdas magnéticas, podemos agrupá-las para obter o valor da perda magnética total. Essa perda pode ser representada pela equação (6).

$$P_t = P_H + P_{cp} + P_a \tag{6}$$

Onde  $P_t$  é a perda magnética total,  $P_H$  é a perda histerética,  $P_{cp}$  é a perda devido às correntes parasitas e  $P_a$  é a perda anômala.

A Figura 5 (a) mostra um esquema do Método de Epstein e a Figura 5 (b) mostra duas curvas de histerese, uma feita a 60 Hz e outra a 5 mHz, ou seja, em condição quase estática.

Figura 5 - (a) Esquema do Método de Epstein para medidas de perda total, (b) Curvas de histerese na condição quase-estática e a 60 Hz.



Fonte: Adaptado de (5).

O método utilizado para se medir as perdas totais é chamado de Método de Epstein. Utilizam-se tiras de 28 cm de comprimento, 3 cm de largura e 0,36 mm de espessura, contendo um total de 88 tiras. Colocam-se as tiras formando um quadrado e cada lado é inserido dentro de um solenóide, com 25 cm de comprimento, conforme mostrado na Figura 5 (a). Os solenóides são compostos por duas bobinas, uma interna e uma externa, ambas com 175 espiras. O circuito de medida consiste em um wattímetro e um potenciômetro para controlar a densidade de fluxo na liga. As perdas são medidas utilizando-se corrente alternada, podendo ser com uma frequência de 50 Hz ou 60 Hz. (3)

Esse tipo de perda varia com a frequência da inversão da corrente alternada. Para altas frequências, as perdas serão mais altas, enquanto que se diminuirmos a frequência, as perdas irão diminuir. Transformadores trabalham com frequência de 50 e 60 Hz, que são consideradas baixas. Porém, a área da histerese não é nula, mesmo em condições quase-estáticas existe uma dissipação de energia no processo.

Dessa forma, observando a Figura 5 (b), podemos perceber que a área da curva medida com a menor frequência é muito menor. Portanto, as perdas histerética e total podem ser calculadas pela diferença entre a área da energia acumulada e a devolvida, conforme descrito na seção 2.4.1, para os ciclos realizados quase estaticamente (Ph) ou dinamicamente (Pt). (5)

No caso de transformadores, o material mais utilizado para compor seus núcleos são as chapas de ligas de Fe-Si, que serão discutidas no tópico 2.5, a seguir.

#### 2.5 Ligas de Fe-Si

Ligas de Fe-Si, também chamadas de aços elétricos, são materiais magnéticos macios que apresentam alta permeabilidade, baixa perda histerética e baixa perda por corrente parasita em campos magnéticos alternados. (6)

A adição de silício ao ferro aumenta a resistividade elétrica da liga. Uma adição de 3% em peso de Si aumenta a resistividade de 10  $\mu\Omega$ .cm para 45  $\mu\Omega$ .cm. Como a resistividade aumenta, a intensidade das correntes parasitas diminui, portanto, as perdas magnéticas por corrente de Foucault diminuem. Além disso, a adição de silício promove a diminuição da anisotropia magnetocristalina, o que, por sua vez, aumenta a permeabilidade. Já a magnetostricção do Fe-Si diminui com o aumento da quantidade de Si na liga, podendo chegar a valores nulos para uma quantidade de 6,5% de Si. (5, 6)

O diagrama de fases Fe-Si, apresentado na Figura 6 é muito semelhante aos diagramas dos sistemas Fe-Ga e Fe-Al para ligas na região rica em ferro. Para as concentrações de até

cerca de 6% em peso de Si, aproximadamente, 10% em atômico, na temperatura ambiente, há somente a presença da fase Fe(Si)- $\alpha$ , a qual possui uma estrutura A2, cúbica de corpo centrado em que os átomos de ferro podem ser substituídos aleatoriamente por átomos de silício. Acima de 6% em peso de Si, podem ser formadas as fases  $\alpha_2$  e  $\alpha_1$  (Fe<sub>3</sub>Si) com estruturas B2 que é CCC ordenada e/ou D0<sub>3</sub> que é CFC ordenada. Ambas as estruturas podem ser vistas na Figura 7.(16, 17, 18)

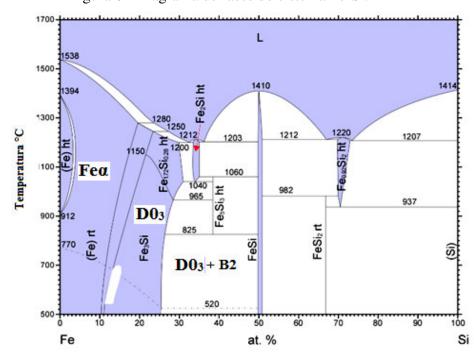


Figura 6 - Diagrama de fases do sistema Fe-Si.

Fonte: adaptado de (18).

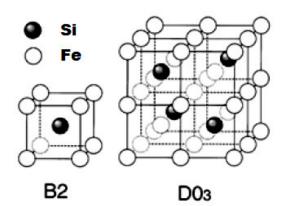


Figura 7- Estruturas B2 e D0<sub>3</sub>.

Fonte: Adaptado de (19).

Como já mencionado, a liga com 6,5% de Si possui magnetostricção praticamente nula, além disso também apresenta alta permeabilidade, alta resistividade elétrica, baixo campo coercivo e baixa perda magnética. Seria o material ideal para ser usado em transformadores devido à sua alta performance, baixo nível de ruído e baixo gasto de energia. Porém, sua produção é difícil devido à sua alta fragilidade quando trabalhada a frio. As ligas de Fe-Si comerciais são aquelas contendo de 3 a 4% de Si e são chamadas de aços elétricos. Nestas composições, somente há a presença da fase Fe(Si)-α. (3, 4, 20, 21, 22)

Os tipos de aços elétricos utilizados em transformadores são os chamados aços elétricos de grãos orientados. Como o fluxo magnético está na direção ao longo do comprimento das chapas é necessário que a permeabilidade seja alta nessa direção. No Fe-Si, a direção de fácil magnetização é (100). Os aços elétricos de grãos orientados possuem textura Goss, isto é, orientação {011} <100>. (2, 3)

Outro tipo de aço elétrico também utilizado é o de grãos não orientados, mais utilizado em motores elétricos em que o campo magnético está localizado no plano das lâminas, mas o ângulo entre o campo magnético aplicado e a direção de laminação varia. Desta forma, não se faz necessário ter uma direção de fácil magnetização alinhada com a direção de laminação. (2, 3).

#### 2.6 Ligas de Fe-Ti

As ligas de Fe-Ti são muito menos estudadas que as de Fe-Si. Sabe-se que para ligas contendo entre 8 e 35% em atômico de Ti, cerca de 6,3 e 34% em peso, as curvas de histerese são bem estreitas, indicando que o material possui baixo campo coercivo (H<sub>c</sub>), ou seja, essas ligas são materiais magnéticos macios. (10)

A Figura 8 mostra o diagrama de fases do sistema Fe-Ti. O Ti é solúvel no Fe até cerca de 10% em atômico de Ti a 1290°C. Abaixo dessa temperatura, há a coexistência de duas fases ferromagnéticas, Fe(Ti)-α e Fe<sub>2</sub>Ti, a última possuindo uma estrutura hexagonal, também conhecida como fase Laves com estrutura C14. Materiais ricos em Ti apresentam comportamento antiferromagnético. (9, 10)

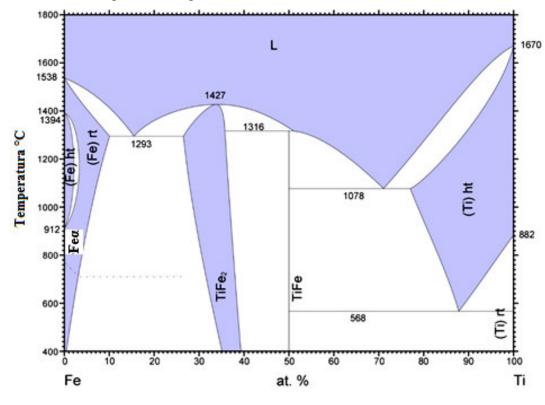


Figura 8 - Diagrama de fases do sistema Fe-Ti.

Fonte: Adaptado de (23).

Valores de magnetostricção para ligas de Fe-Ti reportados anteriormente: para concentrações de 1,7%, 3,4%, 5,2% e 6,9% (em peso) são, respectivamente, -6,2 ppm, -1,8 ppm,-1,0 ppm e 0 ppm, para um campo magnético aplicado de 0,1 T. Também foi mostrado que o valor da magnetostricção das ligas Fe-Ti aumenta ligeiramente com a adição de Ti para composições acima de 6,9 % de Ti em peso. (10)

Foi observado que a liga com 6,9% em peso apresentou magnetostricção total aproximadamente nula para valores de campo de até 0,4 T, porém, para valores acima desse campo, a magnetostricção (tanto longitudinal quanto transversal) aumentou quase que linearmente. Esse aumento após atingir a saturação foi atribuído à magnetostricção forçada ou volumétrica, a qual ocorre para campos magnéticos muito elevados. (9, 10)

Não foram encontradas informações relativas à textura para as ligas Fe-Ti. Porém, com base nas informações encontradas para o Fe-Si, podemos supor que a melhor textura para a diminuição das perdas magnéticas seja a textura Goss, tendo em vista que a direção de fácil magnetização é a <100> para o ferro e ligas ricas em ferro, referente à fase Fe-α com estrutura A2.

#### 2.7 Textura

A textura possui forte influência na magnetização e, consequentemente, na perda histerética do material. A componente de textura que minimiza essas perdas é a Goss {011}<100>, por possuir as direções de fácil magnetização <100> na direção de laminação em ligas de Fe-Si.

Ao se laminar um material a frio, vários defeitos são formados, como maclas, bandas de cisalhamento, vacâncias, discordâncias, etc. Tais defeitos aumentam a energia interna do material. Esta energia acumulada pode ser usada para acelerar os processos de recuperação e recristalização durante tratamentos térmicos.(4)

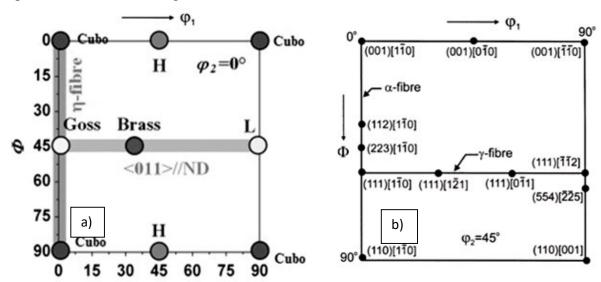
Na recuperação há a aniquilação de discordâncias, que ocorre pela movimentação e escalagem das mesmas. Além disso, elas se rearranjam formando redes de discordâncias, conhecidas como subgrãos, pois possuem contornos de baixo ângulo. A recristalização, que ocorre após a recuperação, sendo, portanto, a temperaturas mais altas, consiste na aniquilação de discordâncias pela movimentação dos contornos de alto ângulo, formando grãos livres de discordâncias. Esses grãos crescem e consomem grãos menores, resultando em regiões com baixa densidade de discordâncias. Mesmo com a remoção de grande parte das discordâncias, o material ainda possui uma área de contornos de grão grande. Portanto, ocorre crescimento de grão a fim de eliminar a energia associada aos contornos. Dessa maneira, grãos pequenos são consumidos, grãos maiores crescem e os contornos de grãos assumem configurações de menor energia. Em alguns casos, pode ocorrer que alguns poucos grãos cresçam muito mais que outros grãos, esse caso é chamado de crescimento anormal de grão. Isso pode acontecer devido a uma alta temperatura de recozimento, assim como a presença de partículas de segunda fase e textura. (4)

Basicamente, a textura Goss forte dos aços elétricos, ligas de Fe-Si, é formada pelo crescimento anormal de grãos com essa orientação. Após a laminação a frio, as componentes de textura predominantes são {112} < 100 > + {111} < 100 >. A componente Goss existe nos centros das bandas de transições entre as duas componentes citadas acima. Os grãos nucleiam no processo de descarburação e crescem anormalmente no tratamento térmico final. Partículas finas de MnS são adicionadas ao material para barrar o crescimento normal e proporcionar o crescimento anormal de grãos. Recentemente, partículas de AlN também foram adicionadas para esse fim. É importante a posterior remoção dessas partículas para que elas não atrapalhem a movimentação de paredes de domínios e aumente o campo coercivo. Além disso, grãos grandes são desejáveis pois a área relativa aos contornos de grão diminui e menos

obstáculos à rotação das paredes de domínio são introduzidos, o que causa um aumento da permeabilidade magnética. Portanto, é desejado que as ligas de Fe-Ti também possuam uma componente de textura que proporcione uma fácil magnetização na direção de laminação. (3,4)

É comum que materiais CCC altamente deformados a frio mantenham a textura de laminação após a recristalização. As componentes de textura que permanecem são a fibra alfa e fibra gama. A fibra alfa inclui as componentes  $\{001\}<110>$ ,  $\{211\}<011>$  e  $\{111\}<011>$  e a fibra gama possui as componentes  $(111)[1\overline{1}0]$ ,  $(111)[1\overline{2}0]$ ,  $(111)[0\overline{1}0]$  e  $(111)[\overline{1}\overline{1}2]$ , correspondendo aos planos  $\{111\}$  paralelos à direção de laminação. A Figura 9 (a) mostra a localização das texturas para  $\varphi_2=0^\circ$ , sendo importante observar a presença da textura Goss. A Figura 9 (b) mostra a localização das componentes de textura importantes em uma ODF para as fibras alfa e gama para  $\varphi_2=45^\circ$ . A ODF (*orientation distribution function*) é uma função matemática cuja função é descrever a frequência de ocorrência de certas orientações particulares no espaço tridimensional de Euler, utilizando como coordenadas três ângulos de Euler,  $\Phi$ ,  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ . (4)

Figura 9 - ODF com as componentes de textura mais importantes para textura Cubo e Goss (a esquerda) e as fibras alfa e gama (a direita).



Fonte: Adaptado de (3) e (24).

A intensidade da fibra alfa aumenta bastante para reduções até 70%, mas com reduções maiores, as componentes {112} <110> e {111} <110> tornam-se mais proeminentes. A fibra gama mantém-se uniforme para reduções de até 80%, mas depois disso, a componente {111} <110> fortalece. (4)

Provavelmente, a presença de fibra alfa e gama degradam as propriedades magnéticas, tendo em vista que elas não possuem a direção de fácil magnetização, ou seja, <100>, mostrada na Figura 1. As componentes da fibra alfa possuem direção <110>, ou seja, média magnetização e a fibra gama possui direções muito próximas à direção <111>, a qual é a direção de difícil magnetização. Portanto, espera-se que um material que possua tais componentes de textura tenha propriedades magnéticas intermediárias entre essas duas direções, sendo então prejudicadas.

Outro forte indicativo da presença de textura é a presença de uma grande quantidade de contornos de baixo ângulo. Se grãos adjacentes possuem orientações cristalográficas muito próximas, significa que a diferença de orientação entre eles é baixa, dessa forma, o contorno de grão será de baixo ângulo. Conforme a orientação cristalográfica muda, a diferença de orientação aumenta e, consequentemente, o contorno de grão será de alto ângulo. (4)

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Produção do Material

As duas ligas de Fe-Ti utilizadas neste trabalho foram fabricadas por fusão a arco, utilizando-se Fe com 99,8% de pureza e Ti de grau 2. Os lingotes obtidos possuíam massa de 40 g. Para garantir maior homogeneidade, as ligas foram fundidas 5 vezes. Foram produzidas 2 composições da liga, sendo uma com 3% de Ti e uma com 4% de Ti. Em seguida, uma fresadora universal da marca ROMI, modelo U-30 foi utilizada para dar acabamento nas ligas fundidas. A Figura 10 mostra a liga de Fe-Ti no estado como fundido e após o processo de fresagem, o qual foi realizado no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena (DEMAR). A liga fresada possuía uma espessura de 7 mm.

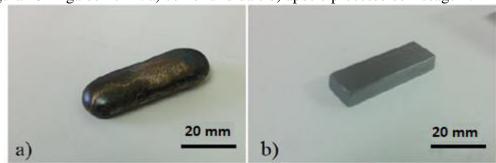


Figura 10- Liga de Fe-Ti: a) como fundida e b) após o processo de fresagem.

Fonte: Arquivo pessoal.

Antes de serem laminadas, as ligas foram encapsuladas e depois prensadas em um tubo de aço inox para evitar possíveis danos ao laminador, já que não era conhecido o comportamento do material. A Figura 11 mostra como a liga ficou após ser encapsulada para a laminação, dessa forma, a espessura do conjunto liga de Fe-Ti + tubo atingiu 19 mm.



Figura 11- Liga encapsulada para laminação.

Fonte: Arquivo pessoal.

A laminação foi feita num laminador FENN 4-105. Foram realizados 14 passos a frio, com uma redução de cerca de 96% em espessura. Ao final, o conjunto possuía uma espessura de 0,7 mm, que é o limite do equipamento.

Após retirar o tubo de aço para acessar a chapa de Fe-Ti, foi constatado que esta tinha uma espessura de 0,5 mm. Em seguida, as lâminas de ligas foram dispostas entre duas chapas de aço inox de 2 mm de espessura, ficando com 4,5 mm de espessura total. A Figura 12 mostra a liga como descrito para o segundo processo de laminação. As bordas foram soldadas a fim de evitar que a chapa de Fe-Ti se separasse das chapas de aço, durante o processo de laminação.



Figura 12- Liga encapsulada para o segundo processo de laminação.

Fonte: Arquivo pessoal.

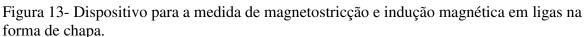
Foram realizados mais 8 passos de laminação a frio. Ao final, o conjunto tinha 2,6 mm de espessura. Após desembutir a liga, constatou-se que as ligas estavam com 0,3 mm de espessura, sendo essa a espessura almejada.

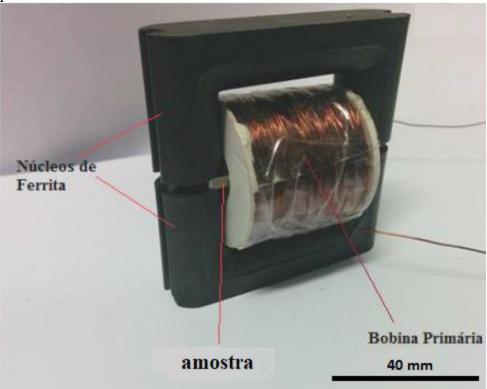
Após a laminação, as ligas foram cortadas numa cortadeira ISOMET 1000 da marca BUEHLER. Foram separados pequenos pedaços de cada liga para a realização de tratamentos térmicos em diferentes temperaturas, com o objetivo de avaliar a estrutura de grãos e verificar se ocorreria eventualmente o crescimento anormal de grãos.

Com base no diagrama de fases Fe-Ti da Figura 8, foram feitos vários tratamentos térmicos testes em ambas as chapas de Fe-Ti, dois tratamentos térmicos a 1100°C, um por 3 h e outro por 9 h, um tratamento a 1200°C por 3 h. Em um segundo momento, a chapa com 4% de Ti foi tratada por 5 h a 850°C. Com base nos resultados obtidos após a análise das microestruturas via microscopia eletrônica de varredura, foi estabelecido que as ligas de Fe-Ti seriam tratadas a 850 °C por 48 h.

#### 3.2 Medidas de Magnetização e Magnetostricção.

Realizaram-se medidas de magnetostricção e indução magnética nas chapas do material no estado como-laminado e tratado. Para as medidas de magnetostricção e indução magnética, foi utilizado o dispositivo mostrado na Figura 13. Os núcleos magnéticos em formato de U são de ferrita. Para a construção da bobina primária, foi produzido um carretel em nylon. Para aplicar corrente na bobina primária foi utilizada uma fonte de corrente da TEKTRONIX, modelo PWS4602. A voltagem máxima utilizada foi de 10 V, que corresponde a uma corrente máxima de cerca de 1,5 A.





Fonte: Arquivo pessoal.

Um gaussímetro, modelo 475 e uma sonda Hall axial, ambos da marca LAKESHORE, foram utilizados para calibrar a bobina primária. A calibração é necessária pois não é possível posicionar a sonda Hall no núcleo durante a realização das medidas de magnetostricção e indução magnética. Primeiramente, posicionou-se a sonda Hall axial dentro do carretel, de modo que ela ficasse no meio do orifício. Utilizando-se um programa LABVIEW media-se o valor da tensão elétrica aplicada (V) em relação ao campo medido pela sonda Hall (H). A

relação  $\mu_0$  H vs V é linear e faz-se a regressão linear para obter a equação que dá a relação do campo como função da tensão elétrica aplicada. A Figura 14 mostra o posicionamento da sonda Hall para a calibração da bobina primária.



Figura 14- Calibração da bobina primária.

Fonte: Arquivo pessoal.

Dessa forma, com os dados obtidos é possível construir uma curva do campo medido pela tensão elétrica utilizando o software Origin. Em seguida, foi feita uma regressão linear, tirando uma relação entre o campo magnético gerado pela bobina (H) e a tensão elétrica gerada pela fonte de corrente (V). A Figura 15 mostra a curva de calibração para a bobina primária, sendo a relação H(V) dada por:

$$H = 20.61 + 3038 \times V \tag{7}$$

Essa equação foi introduzida no LABVIEW e a conversão de tensão elétrica em campo magnético era feita automaticamente pelo próprio programa. O desvio padrão na medida de H é de  $\pm$  22,37 A/m.

A preparação das chapas para as medidas de magnetostricção e magnetização consistem no lixamento e limpeza com álcool isopropílico, para garantir uma superfície limpa e adequada para a colagem dos extensômetros.

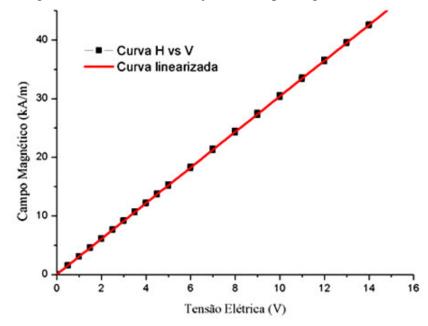


Figura 15- Curva de calibração de campo magnético.

Fonte: Arquivo pessoal.

Foram utilizados extensômetros com fator de sensibilidade de 2,17, do fabricante nacional EXCEL SENSOR. Utilizou-se três extensômetros em cada liga, um para medir a magnetostricção longitudinal e o outro para a transversal, em relação ao campo magnético aplicado. O terceiro extensômetro foi colado na superfície oposta da lâmina aos dois extensômetros citados anteriormente, mas também foi posicionado para medir a magnetostricção longitudinal. Fazia-se a média aritmética entre as medidas obtidas nos dois extensômetros que mediam a magnetostricção longitudinal. Isso era feito para evitar influências do tamanho de grão, pois, se o grão fosse muito grande, o extensômetro poderia coletar o resultado de uma população muito pequena de grãos. A Figura 16 mostra os extensômetros colados em um dos lados da liga.

Para a medida de deformação foi utilizada uma ponte de WHEATSTONE da NATIONAL INSTRUMENTS (NI9237) na configuração de ¼ de ponte.

A indução magnética foi medida por uma bobina secundária com 80 espiras enrolada ao redor da chapa conforme mostrado na Figura 17. A medida da indução magnética foi realizada por um fluxímetro da marca LAKESHORE conectado à bobina secundária.

Também foram feitas medidas de magnetostricção e indução magnética em chapas de Fe-Si de grão orientado doadas pela empresa TRANSFORMADORES JUNDIAÍ.

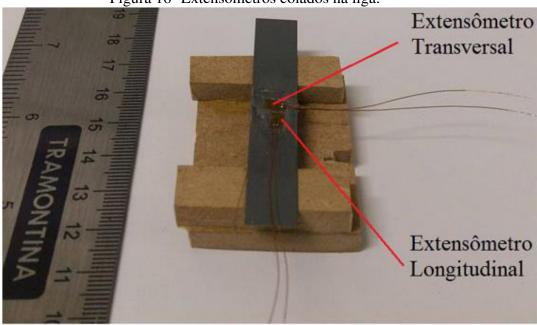


Figura 16- Extensômetros colados na liga.

Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 17- Bobina secundária.

Fonte: Arquivo pessoal.

### 3.3 Avaliação da Microestrutura

A avaliação da microestrutura do material foi feita por observação em microscópio eletrônico de varredura da marca Hitachi, modelo TM3000. As ligas para tal avaliação foram preparadas por metalografia convencional, isto é embutimento, lixamento e polimento mecânico. Após o preparo metalográfico, as ligas foram atacadas por cerca de 20 s por uma solução de Nital 10% em volume. Além disso, foram feitas medidas de composição química por EDS. Para a liga de Fe-Si, a análise foi em área, devido aos grãos grandes, já para as ligas de Fe-Ti, as análises foram pontuais.

As ligas também foram submetidas à difratometria de raios X utilizando um difratômetro da SHIMADZU XRD6000 com radiação de molibdênio. As medidas foram feitas entre  $15.0^{\circ}$  e  $37.0^{\circ}$ , com passo de  $0.02^{\circ}$  e 5 s por passo. Nessa faixa de ângulos  $2\theta$  são localizados os principais picos relativos às reflexões das fases presentes. As ligas foram comparadas com um padrão feito com os dados obtidos através do PEARSON CRYSTAL DATA, mas deve-se ressaltar que esses padrões são feitos para ligas no formato de pó.

Também foram realizadas análises de EBSD nas ligas de Fe-Si e nas de Fe-Ti tratadas. Tais análises foram feitas no Laboratório de Caracterização Estrutural, na UFSCar, em São Carlos utilizando um microscópio FEI INSPECT S 50.

### 3.4 - Medidas de Resistividade

As medidas de resistividade foram feitas utilizando um equipamento PPMS modelo EVERCOOL II da QUANTUM DESIGN. As medidas foram realizadas sem a aplicação de campo, na faixa de temperatura de 2 a 300 K com passo de 2 K/s.

# 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Liga de Fe-Si

#### 4.1.1 Microestrutura

### 4.1.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Observa-se na Figura 18 que a microestrutura apresenta grãos grosseiros, sendo que existem poucos que diferem do tamanho médio dos grãos. Isso indica que o material possui grãos crescidos anormalmente, o que era esperado para a liga comercial de Fe-Si de grão orientado.

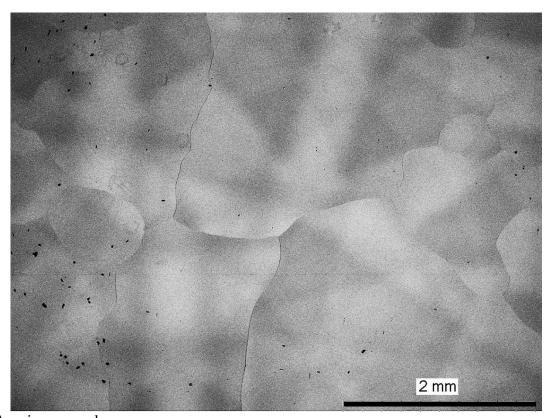


Figura 18- Micrografia da liga de Fe-Si comercial.

Fonte: Arquivo pessoal.

A análise de tamanho de grão pelo método do intercepto, utilizando 5 micrografias, resultou em um tamanho médio de grão de cerca de  $1.81\pm0.98$  mm.

O resultado das medidas de composição obtidas por EDS para a liga Fe-Si é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2- Composição química das fases presentes na liga de Fe-Si.

|          | Composição (% em peso) |               |  |
|----------|------------------------|---------------|--|
| Fase     | Fe                     | Si            |  |
| Fe(Si)-α | $97,2 \pm 0,1$         | $2.8 \pm 0.1$ |  |

### 4.1.1.2 Difratometria de Raios X (DRX)

A Figura 19 mostra o resultado da difratometria de raios X da liga de Fe-Si. No mesmo gráfico também foram colocados os dados da fase padrão Fe(Si)-α.

(110) ——Fe-Si ——Fe(Si)-α

(200)
(211)

15
20
25
30
35
2θ(°)

Figura 19- Difratogramas da liga Fe-Si.

Fonte: Arquivo pessoal.

Da Figura 19, podemos observar a presença somente da fase Fe(Si)-α, o que está de acordo com o diagrama de fases mostrado na Figura 6, para a temperatura ambiente. Existe a presença de somente um pico de alta intensidade, relacionado ao plano (110), a 20,1°, os outros dois picos apresentam intensidade muito baixa. A presença de um pico de alta intensidade pode indicar a existência de uma textura preferencial e o plano (110) pertence à componente de textura GOSS, a qual é a textura dos aços elétricos.

#### 4.1.1.3 Difração de elétrons retroespalhados (EBSD)

A Figura 20 mostra a ODF relativa a  $\varphi_2 = 0^\circ$ . A Figura 21 (a) mostra a imagem obtida através do EBSD e a Figura 21 (b) mostra os contornos de alto e baixo ângulo presente na liga de Fe-Si, indicados na legenda como BÂ, que são contornos de baixo ângulo os quais vão de 2 a 15° e AÂ, que são contornos de alto ângulo, que vão de 15 a 180°.

Pela ODF apresentada na Figura 20, observamos a predominância da textura GOSS, como era esperado para a liga de Fe-Si.

Podemos observar, claramente, a predominância de grãos com planos (110) perpendicular à direção de laminação, através da Figura 21 (a), que pode ser observada pela cor verde. Pela Figura 21 (b), observamos a presença majoritária de contornos de baixo ângulo, o que indica que os grãos possuem orientações muito próximas, indicando a presença de textura.

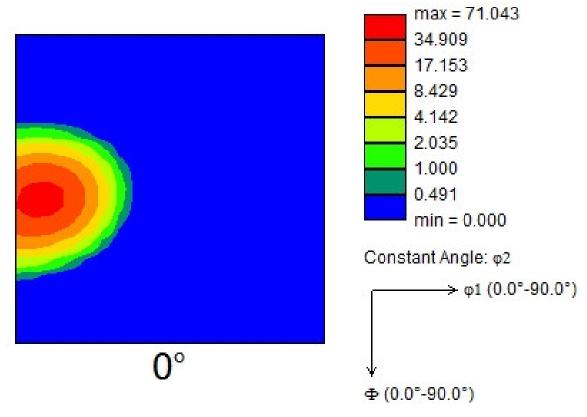


Figura 20 – ODF da liga Fe-Si.

TD a) RD 800 um b) 800 um

Figura 21 — Análise por EBSD da chapa da liga Fe-Si: a) Figura de Polo inversa e b) Contornos de grão<del>.</del>

#### 4.1.2 Propriedades Magnéticas

### 4.1.2.1 Indução Magnética (B)

A indução magnética foi medida com duas taxas diferentes de variação de campo, a fim de extrair dos resultados da indução de saturação e os campos coercivo e remanente. Uma taxa moderada de variação de campo (aproximadamente 1,5 kA/m/s) foi aplicada até o campo limite do dispositivo de 45 kA/m para a obtenção da indução de saturação. A Figura 22 mostra a curva de indução para a liga de Fe-Si, sendo o valor máximo de indução magnética obtido de 2,27 T.

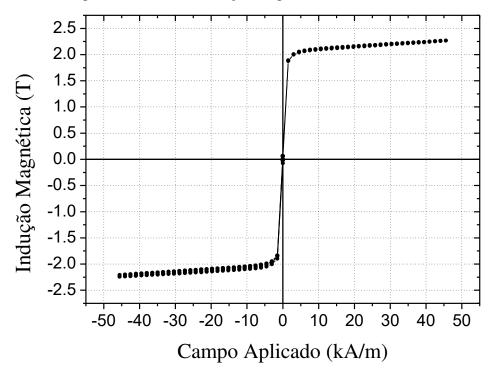


Figura 22- Curva de indução magnética do Fe-Si.

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 23 exibe um detalhe da curva de indução magnética para a liga de Fe-Si, obtida usando-se uma taxa de variação de campo baixa (~ 0,6 kA/m/s) e um campo máximo de 12 kA/m, a fim de se determinar os campos coercivo e remanente. Com base na Figura 23, podemos verificar que o valor de campo coercivo é de aproximadamente 9,57 A/m e o valor de campo remanente cerca de 0,026 T. Tais valores são baixos, como era de se esperar de um material magnético macio.

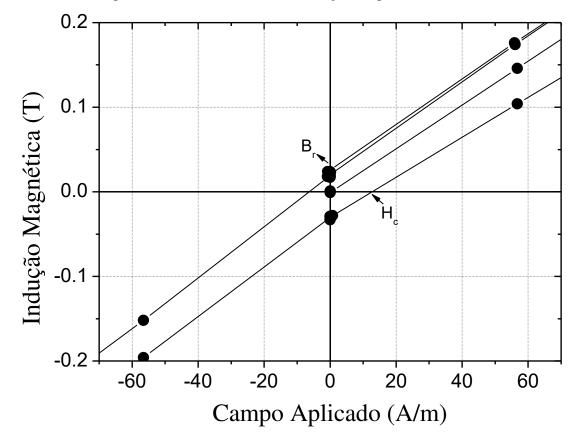


Figura 23- Detalhe da curva de indução magnética do Fe-Si.

A Figura 24 (a) mostra a curva de indução magnética inicial da liga Fe-Si e a Figura 24 (b) mostra a curva da permeabilidade relativa  $\mu_r$ , originada pela derivação da curva de indução magnética inicial. Da derivada, obtém-se  $\mu$ , que dividido por  $\mu_o$  resulta em  $\mu_r$ .

A permeabilidade inicial é uma propriedade física do material é definida como  $\mu = \frac{dB}{dH}$ , para H = 0. Portanto,  $\mu_r$  inicial para esta liga é, aproximadamente, 870 e a permeabilidade máxima é de 1728 para um campo de 627 A/m.

2.5 Indução Magnética (T) 2.0 1.5 1.0 0.5 a) 0.0 10 20 30 40 50 0 Campo Aplicado (kA/m) 2000 Permeabilidade Relativa (μ/μ) 1500 1000 500 b) 0 0 2 4 6 8 Campo Aplicado (kA/m)

Figura 24- Curvas para o Fe-Si de: (a) Magnetização inicial, (b) permeabilidade relativa.

.

## 4.1.2.2 Magnetostricção

A Figura 25 mostra as curvas de magnetostricção longitudinal e transversal para a liga de Fe-Si.

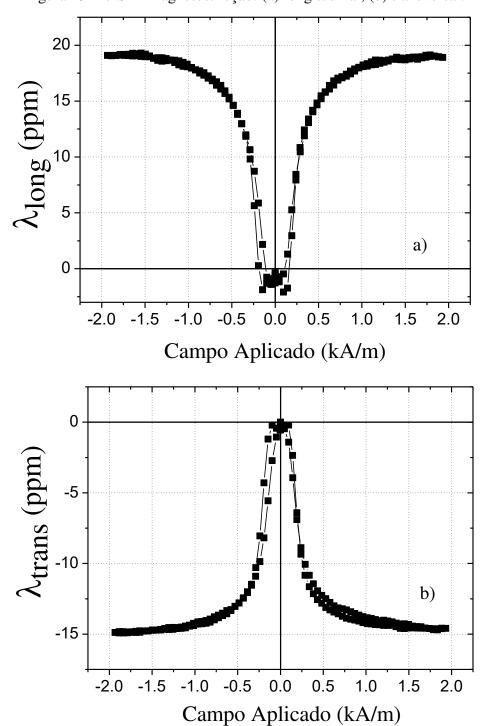


Figura 25- Fe-Si – Magnetostricção: (a) longitudinal, (b) transversal.

O valor de saturação da magnetostricção longitudinal é de 19,0 ppm e o da magnetostricção transversal é de -15,0 ppm. Portanto, utilizando a equação (1), o valor da magnetostricção total é de 34,0 ppm e o valor de saturação 22,7 ppm.

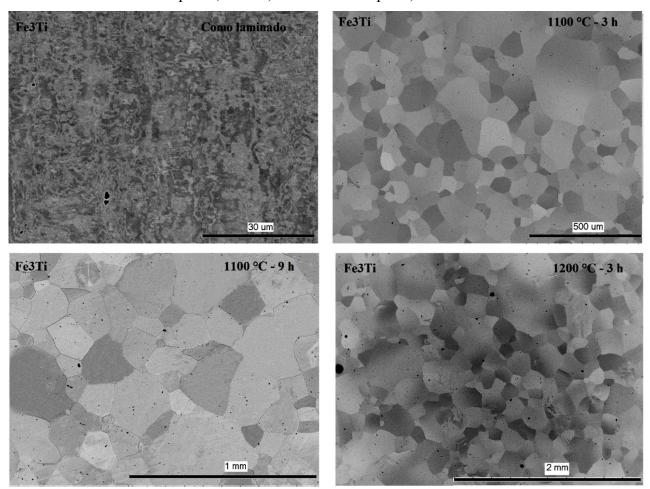
### 4.2 Liga Fe-3Ti

### 4.2.1 Microestrutura

### 4.2.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 26 mostra a microestrutura da liga Fe-3Ti nas condições como-laminada, tratada a 1100°C por 3 h e 9 h e a 1200°C por 3 h, resfriadas fora do forno.

Figura 26- Micrografías da liga Fe-3Ti nas condições a) como-laminada, tratadas a 1100° C por: b) 3 h e c) 9h e a 1200°C por d) 3h.



Observa-se da Figura 26 (a), para o material como laminado, que a microestrutura é típica de um material completamente deformado. Os grãos apresentam-se deformados, isso devido à alta redução em área a frio (cerca de 96%) a qual a liga foi submetida. Nas Figuras 26 (b), (c) e (d), que correspondem ao material tratado nas condições indicadas, observamos a presença de grãos bem definidos após o tratamento térmico da chapa como-laminada a frio. Podemos notar que existem grãos pequenos, médios e grandes coexistindo para as três condições de tratamento térmico, indicando uma distribuição normal de tamanho de grão, mesmo que o tamanho médio de grão da liga Fe-3Ti tratada a 1100°C por 9 h seja levemente maior, não se observou crescimento anormal de grão. Isso pode ser devido à ausência de partículas de segunda fase na temperatura na qual o tratamento foi realizado. A presença de partículas finas (tamanho menor que 100 nm) de segunda fase homogeneamente distribuídas pode retardar ou impedir a movimentação de contornos de grão de alto ângulo. O crescimento anormal de grão pode ocorrer nas regiões onde essas partículas coalescem ou se dissolvem, deixando alguns poucos grãos livres para crescer. (4)

Com base nos resultados na liga Fe-4Ti tratada a 850 °C, que será discutido no tópico 4.3.1.1, estabeleceu-se a temperatura de tratamento térmico de 850 °C por 48 h. A Figura 27 mostra as micrografias da liga de Fe-3Ti tratada em tais condições.

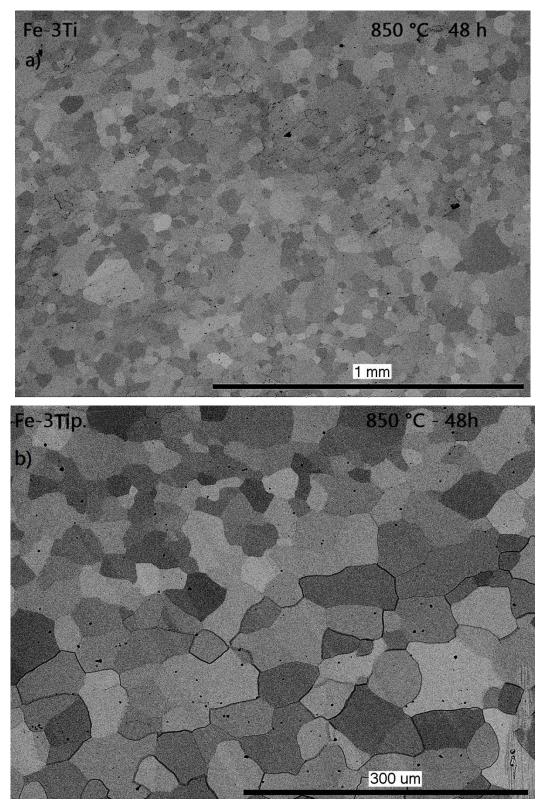
Observando as micrografias apresentadas na Figura 27, podemos constatar que a microestrutura é muito semelhante às apresentadas na Figura 26 b), c) e d), mesmo que o tamanho de grão seja menor. Portanto, não há evidências de que tenha ocorrido crescimento anormal de grão. Esse comportamento era esperado, tendo em vista o diagrama de fases da Figura 8, só há a presença de uma fase, ou seja, não há partículas de segunda fase as quais, como discutido, podem contribuir para barrar o crescimento normal de grão.

A Tabela 3 mostra os resultados de composição química obtidos por EDS para a liga de Fe-3Ti.

Tabela 3 - Composição química das fases da liga de Fe-Ti.

|          | Composição (%p.) |                 |  |
|----------|------------------|-----------------|--|
| Fase     | Fe               | Ti              |  |
| Fe(Ti)-α | $97,7 \pm 0,1$   | $2,29 \pm 0,10$ |  |

Figura 27– Micrografias da liga Fe-3 Ti no estado tratado a 850 °C por 48 h para duas ampliações.



#### 4.2.1.2 Difratometria de raios X (DRX)

A Figura 28 mostra os resultados de difratometria de raios X da liga Fe-3Ti nas condições como-laminada, tratada a 1100°C por 3 h e 9 h e a 1200°C por 3 h e a Figura 29 mostra o difratograma para a liga tratada a 850° C por 48 h. Junto aos difratogramas, também são apresentados os dados da fase padrão Fe(Ti)-α.

Observa-se na Figura 28 que é possível identificar a presença majoritária da fase Fe(Ti)-α. Segundo o diagrama de fases do Fe-Ti mostrado na Figura 8, uma liga com 3% de Ti apresenta a fase TiFe<sub>2</sub> em temperatura ambiente, mas em uma quantidade muito baixa. Portanto, devido à baixa quantidade dessa fase e ao resfriamento ao ar, não foi possível identificá-la nos difratogramas, assim como não foi possível identificá-las nas micrografias. No entanto, os picos mais intensos da fase TiFe<sub>2</sub> ocorrem para ângulos coincidentes com da fase Fe(Ti)-α, referente aos planos (110), portanto podem estar superpostos.

A largura dos picos no material como laminado é maior do que no material tratado. Isso ocorre devido à grande quantidade de defeitos presentes nessa liga, graças à alta deformação a frio de aproximadamente 96% em área. As ligas tratadas termicamente apresentam picos mais estreitos e menor quantidade de ruído, indicando maior cristalinidade.

Na Figura 28 (a), para o material como laminado, pode-se observar que a família de planos cristalográficos que possui a maior intensidade relativa é a (200), localizada a 28,5°, enquanto que o padrão do Fe(Ti)-α é o plano (110), a 20,1°. Isso pode indicar que a liga possui uma textura de laminação. A intensidade relativa do pico a 35,3° (211) é praticamente igual à do padrão e o pico a 20,1° (110) possui uma intensidade relativa muito menor que a do padrão.

Nas Figuras 28 (b), (c) e (d) dos materiais tratados após a laminação, a intensidade relativa do pico a 35,3° é maior que a do padrão, indicando que, após os tratamentos térmicos, alguma textura pode ter sido criada. A reflexão referente ao plano (110) a 20,1° praticamente sumiu. A diferença entre as condições de tratamento térmico diferente é mais evidente para o pico a 28,5° (200), para o qual na liga tratada a 1100°C por 3h a intensidade relativa é menor.

Figura 28- Difratogramas da liga Fe-3%Ti nos estados a) como laminado, tratados a 1100°C por: b) 3 h e c) 9 h e a 1200°C por d) 3 h.

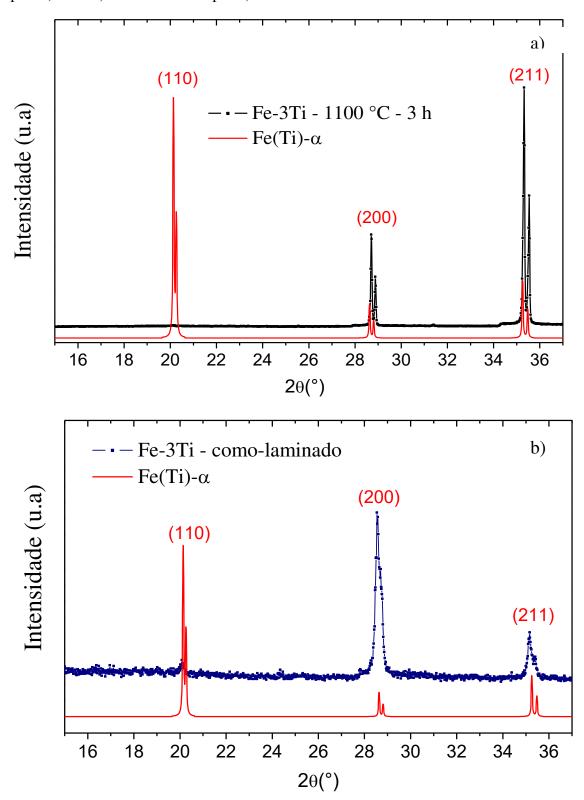
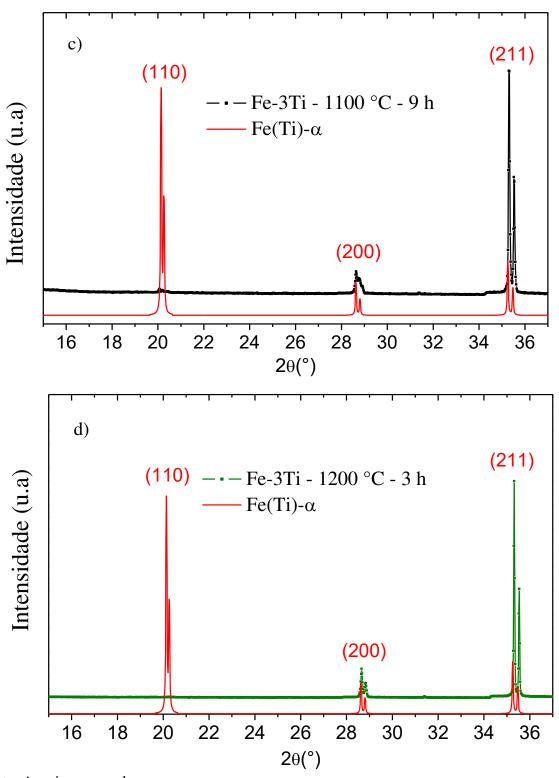


Figura 28 cont.- Difratogramas da liga Fe-3%Ti nos estados a) como-laminado e tratados a 1100°C por: b) 3 h e c) 9 h e a 1200°C por d) 3 h.



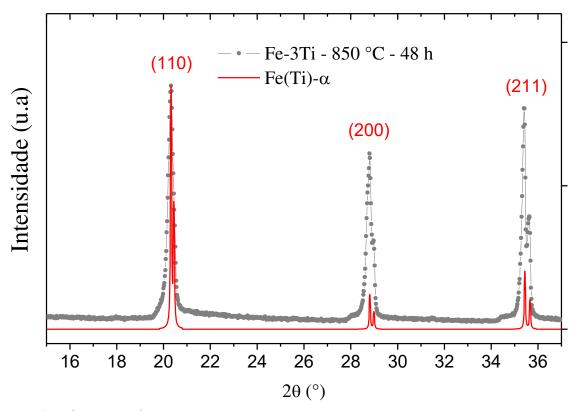


Figura 29 – Difratograma da liga de Fe-3Ti tratada em 850 °C por 48 h.

Conforme se observa na Figura 29, não foi detectada a presença da fase TiFe<sub>2</sub>, devido à baixa quantidade dessa fase. O pico de maior intensidade foi relativo ao plano (110), localizado a 20,1°, idêntico ao do padrão. No entanto, as intensidades relativas dos picos referentes aos planos (211) e (200) são menores que a do padrão, mas isso pode ocorrer tendo em vista que a liga não está na forma de pó, mas sim, em chapa, podendo indicar a presença de alguma orientação preferencial.

#### 4.2.1.3 Difração de elétrons retroespalhados (EBSD)

A Figura 30 mostra a ODF relativa a  $\varphi_2=45^\circ$ . A Figura 31 (a) mostra a imagem obtida através do EBSD e a Figura 31 (b) mostra os contornos de alto e baixo ângulo presentes na liga de Fe-3Ti tratada a 850 °C por 48 h. Na legenda, BÂ = baixo ângulo, que varia de 2 a 15° e AÂ = alto ângulo, que varia de 15 a 180°. A Figura 32 mostra a distribuição de tamanho de grãos para a mesma liga.

Pela ODF apresentada na Figura 30, observamos a predominância de fibra alfa e fibra gama na liga de Fe-3%Ti tratada a 850 °C por 48 h, que não são ideais para as propriedades

magnéticas desejadas, pois não possuem componentes da direção de fácil magnetização alinhadas ao longo da direção de laminação.

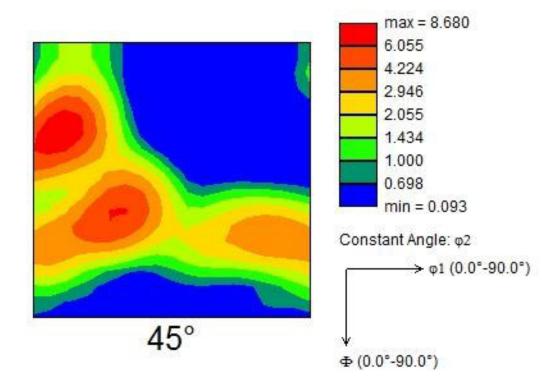


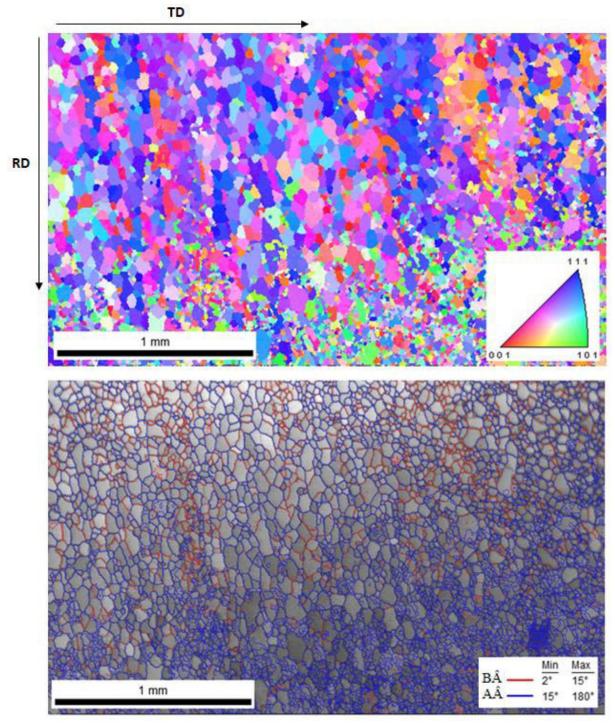
Figura 30 – ODF da liga Fe-3%p. Ti tratada a 850°C por 48 h.

Fonte: Arquivo pessoal.

Podemos observar, que existe a presença de grãos com vários planos, sem existir um plano preferencial, através da Figura 31 (a). Pela Figura 31 (b), observamos a presença majoritária de contornos de alto ângulo, o que indica que os grãos não possuem orientações muito próximas, indicando que não existe textura preferencial.

A Figura 32 nos mostra uma distribuição monomodal de tamanho de grão, indicando que houve crescimento normal de grão, pois, existem grãos pequenos, grãos médios e grãos grandes, como já pôde ser constatado pela microscopia eletrônica de varredura. O tamanho médio de grão foi cerca de  $57,46\pm45,22~\mu m$ .

Figura 31 - Liga Fe-3Ti tratada a 850 °C por 48 h: a) Figura de polo inversa e b) Contornos de grão (BÂ – baixo ângulo e ÂÂ – alto ângulo)



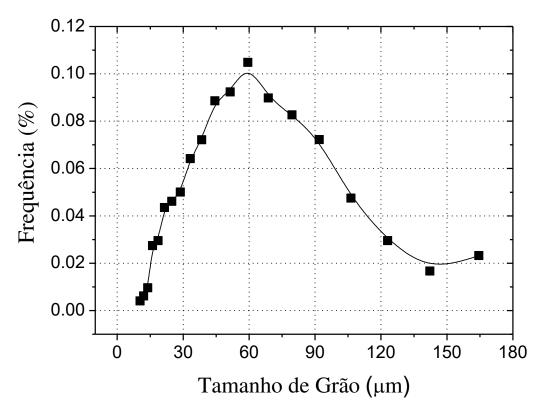


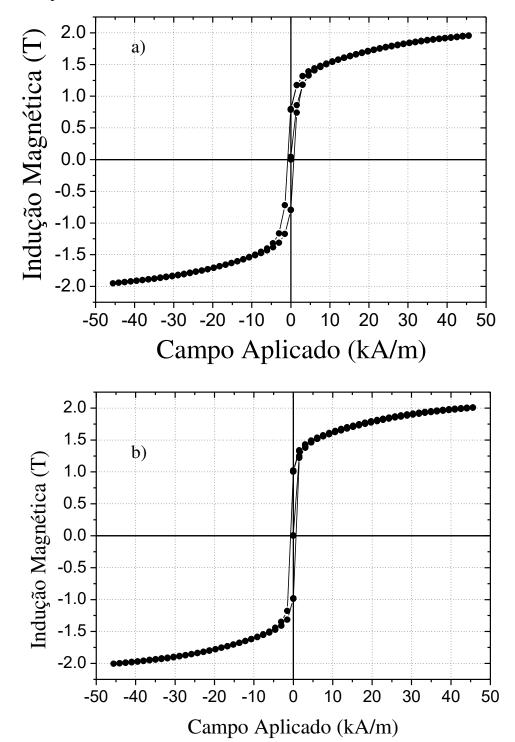
Figura 32 – Distribuição e frequência de tamanho de grão para a liga Fe-Ti tratada a 850 °C por 48 h.

### 4.2.2 Propriedades Magnéticas

### 4.2.2.1 Indução Magnética

Assim como foi feito na liga de Fe-Si, para medir a indução de saturação, foi feita uma medida com uma taxa moderada (1,5 kA/m/s) de aplicação de campo até o campo limite do dispositivo (45 kA/m). A Figura 33 mostra a curva de indução magnética para a liga Fe-3Ti após a laminação e após o tratamento a 850 °C por 48 h. O valor de indução máxima foi de 1,95 T para a liga como-laminada e 2,00 T para a liga tratada.

Figura 33- Curva de indução magnética da liga Fe-3Ti a) como-laminada e b) após tratamento térmico a 850 °C por 48 h.



O aumento de 2,5% no valor máximo de indução magnética no material como-laminado, se comparado ao material tratado, pode ser explicado pela presença de defeitos, principalmente discordâncias, na liga como-laminada, os quais interagem com as paredes de domínio, dificultando sua movimentação e retardando a saturação para campos mais altos. Além disso, a

largura da histerese da liga tratada, apresentada na Figura 33 (b) é menor que a da liga comolaminada, também devido à quantidade de defeitos. Tais resultados também foram observados na literatura. (25)

A Figura 34 mostra um detalhe das curvas de indução magnética para a liga de Fe-3Ti como-laminada e na sequência tratada a 850 °C por 48 h, feita com uma baixa taxa de aplicação de campo (0,6 kA/m/s), a fim de se obter mais pontos nas medidas, chegando até cerca de 18 kA/m. Verifica-se que o valor de campo coercivo para a liga como-laminada é de aproximadamente 784 A/m e para a liga tratada é de 249 A/m. Já o campo remanente foi de cerca de 0,76 T para a liga como-laminada e de, aproximadamente 0,97 T para a liga tratada.

Tais valores de campo coercivo e remanente são baixos, como era de se esperar de um material magneticamente macio, mas ambos os valores são muito superiores ao do Fe-Si. Porém, a liga como-laminada possui um  $H_c$  3,1 vezes maior que para a liga tratada, entretanto, vale lembrar que este material está deformado, com muitos defeitos estruturais que contribuem para o aumento de  $H_c$ . O tratamento térmico removeu os defeitos gerados na laminação, o que fez com que o campo coercivo diminuísse e o valor do campo remanente aumentasse, de forma que a área dentro da curva fosse menor. Uma comparação entre a liga tratada e a liga de Fe-Si será discutido no tópico 4.4.3.

A Figura 35 (a) mostra a curva da permeabilidade relativa, originada da derivada da curva de magnetização inicial da liga de Fe-3Ti na liga como-laminada e a Figura 35 (b) para a liga tratada a 850 °C por 48 h.

Como podemos observar na Figura 35 (a), a permeabilidade relativa inicial é de aproximadamente 657 ligeiramente menor que do Fe-Si, e na Figura 35 (b), o valor é de 1564. Podemos observar, também, o surgimento de um pico com um valor máximo de permeabilidade de 2726. Assim como no Fe-Si, atribui-se esse pico à anisotropia magnetocristalina da liga tratada, que agora se sobrepõe à anisotropia induzida pela deformação. Dessa forma, é necessário um campo magnético maior, ou seja, mais energia, para sobrepor a barreira gerada pela anisotropia, assim, surge um pico deslocado para maiores valores de campo. A partir desse ponto, o valor de permeabilidade magnética decresce exponencialmente. No caso da liga comolaminada, a dificuldade de movimentação das paredes de domínio era maior devido à presença de defeitos estruturais, consequentemente, o valor da permeabilidade relativa diminui. Essa resistência oferecida pelos defeitos pode ser maior que a oferecida pela anisotropia, de modo que não se consiga sobrepor a energia imposta pelos defeitos, dessa forma, a permeabilidade magnética cai até permanecer constante. (26)

Figura 34 - Detalhe da origem da curva de indução magnética da liga Fe-3Ti nas condições a) como-laminado, b) tratada a 850 °C por 48 h.

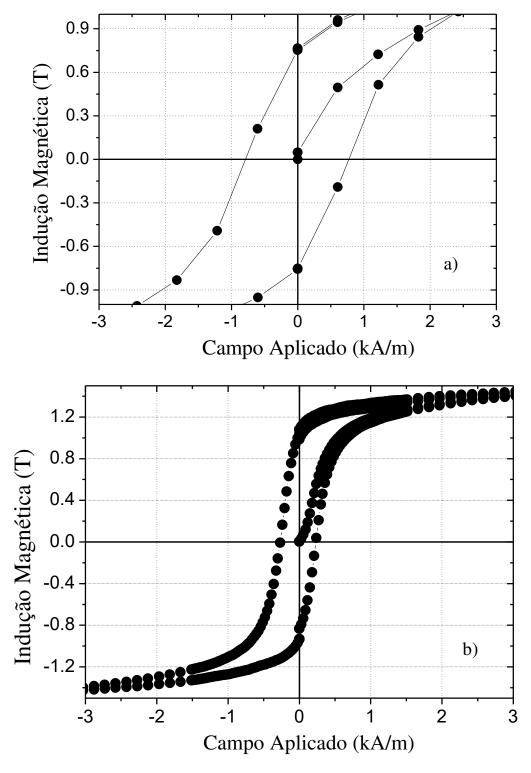
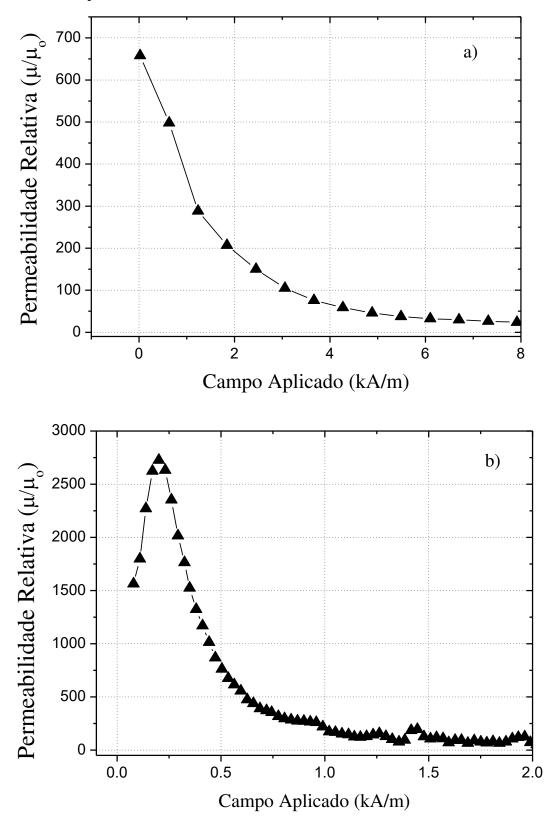


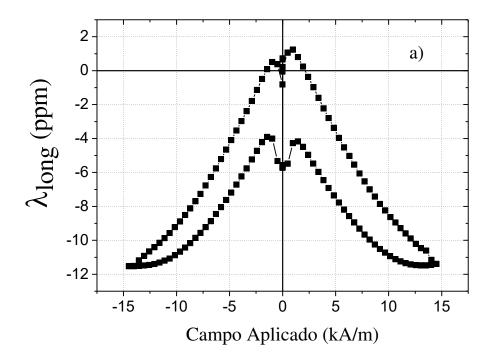
Figura 35 - Permeabilidade relativa da liga Fe-3Ti (a) como-laminada, (b) após tratamento térmico a  $850\,^{\circ}\text{C}$  por  $48\,\text{h}.$ 

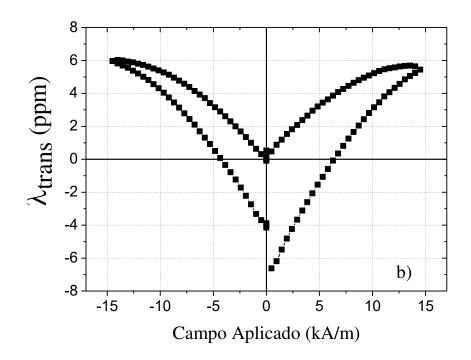


### 4.2.2.2 Magnetostricção

As Figuras 36 e 37 mostram as curvas de magnetostricção longitudinal e transversal para a liga Fe-3Ti como-laminada e tratada a 850 °C por 48 h, respectivamente.

Figura 26- Liga Fe-3Ti, como-laminada - Magnetostricção: (a) longitudinal e (b) transversal.





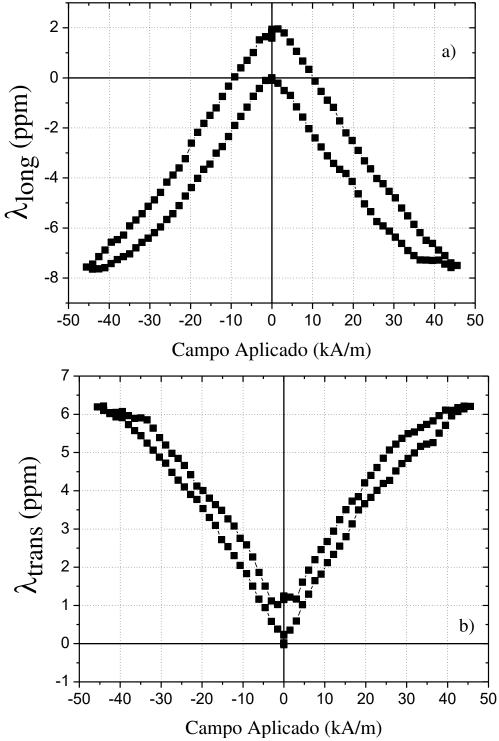


Figura 37 - Liga Fe-3Ti, tratada a 850°C por 48 h - Magnetostricção: (a) longitudinal e (b) transversal.

Na liga como-laminada, o valor da magnetostricção longitudinal máxima obtida de - 11,5 ppm e o da magnetostricção transversal é de, aproximadamente, 6,0 ppm. Utilizando a equação (1), o valor da magnetostricção total é de -17,5 ppm e a de saturação é -11,7 ppm. Já para a liga tratada, temos os seguintes valores:  $\lambda_{long} = -7,53$  ppm,  $\lambda_{trans} = 6,20$  ppm,  $\lambda_{total} =$ 

-13,7 ppm e  $\lambda_s$  = -9,13 ppm. Pode-se observar que, diferentemente do Fe-Si, a magnetostricção longitudinal é negativa e a transversal é positiva. Outro fato importante que pode se observar é que a magnetostricção longitudinal da liga tratada diminuiu, enquanto a transversal permaneceu quase igual.

Podemos perceber que a histerese na magnetostricção transversal da liga comolaminada é alta. Isso ocorre devido à alta quantidade de defeitos no material introduzidos devido à laminação a frio os quais dificultam a movimentação das paredes de domínios, causando esta histerese na magnetostricção. Após o tratamento térmico ainda podemos observar a existência de uma histerese, apesar de ela ser menor do que a liga como-laminada.

### 4.3 Liga Fe-4Ti

#### 4.3.1 Microestrutura

#### 4.3.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 38 mostra a micrografia da microestrutura da liga Fe-4Ti nas condições comolaminada, tratada a 1100°C por 3 h e 9 h e a 1200°C por 3 h.

Assim como observado para a liga Fe-3Ti, observamos na Figura 38 (a) que a microestrutura se encontra completamente deformada, com grãos alongados, isso devido à alta deformação a frio que foi imposta na laminação. Nas figuras 38 (b), (c) e (d) temos grãos bem definidos após os tratamentos térmicos. Podemos notar que existem grãos pequenos, médios e grandes coexistindo nas condições mostradas nas três micrografias, indicando uma distribuição normal de tamanho de grão.

Uma outra condição foi testada para esta liga realizando-se um tratamento térmico a 850°C por 5 h. A essa temperatura, a liga encontra-se na região bifásica. A Figura 39 mostra as micrografias para a liga Fe-4Ti nessas condições.

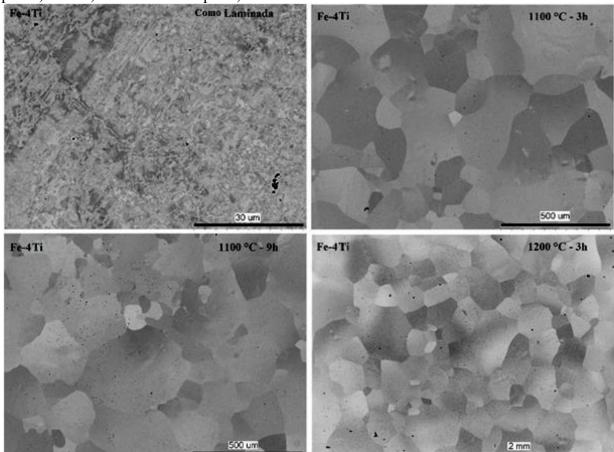


Figura 38- Micrografias da liga Fe-4Ti nas condições a) como-laminada, tratadas a 1100°C por: b) 3 h e c) 9 h e a 1200°C por d) 3 h.

A Figura 39 mostra que a liga possui grãos bem definidos. Podemos notar, também a existência de regiões de grãos finos e regiões de grãos grosseiros. Apesar do tamanho dos grãos não ser grande, nota-se que alguns cresceram significativamente mais em relação aos outros, o que indica que pode ter ocorrido o princípio do crescimento anormal de grão. Outra evidência é a presença de grãos ilhas que podem ser vistos na Figura 39 (b), indicados pelas setas vermelhas. Seria de se esperar que com um tempo de tratamento maior esses grãos crescessem mais, consumindo os menores. Dessa forma, um tratamento mais longo foi realizado.

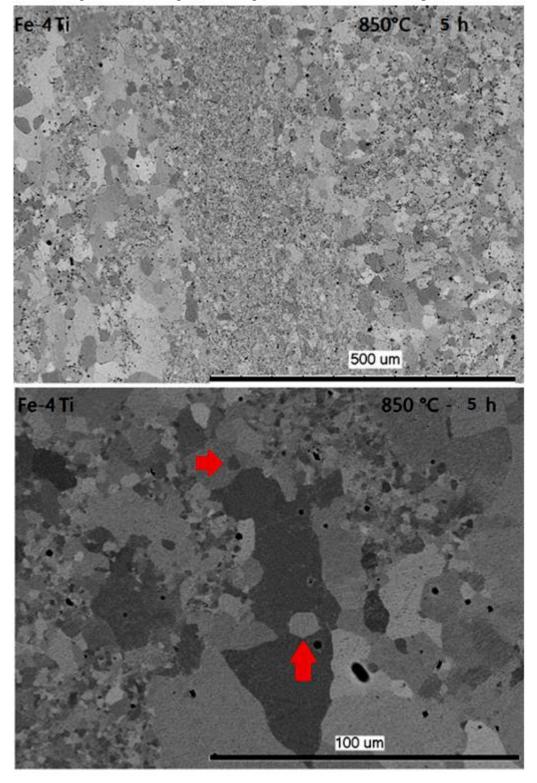


Figura 39- Micrografias da liga Fe-4Ti tratada a 850°C por 5 h.

A Figura 40 mostra as micrografias para a liga Fe-4Ti tratada a 850°C por 48h. A microestrutura da Figura 40 é muito semelhante à da Figura 39, ou seja, existem regiões de grãos finos e regiões de grãos grosseiros, além da presença de grãos ilha, indicados na Figura

40 (a) pela seta vermelha e grãos península, como indicado na Figura 40 (a) pela seta verde. Isso são evidências fortes de que crescimento anormal de grão tenha ocorrido. Comparando a Figura 40 (b) com a Figura 39 (a), que possuem a mesma escala, podemos perceber que os grãos da liga tratada por 48 h são no mínimo 5 vezes maiores que os da liga tratada por 5 h. O tempo de tratamento maior permitiu que os grãos crescessem mais. É importante observar que na Figura 40 (b) podemos notar a presença de pequenas partículas mais concentradas nos contornos de grão. Pela análise de EDS, constatou-se que se trata da fase TiFe<sub>2</sub>.

A Tabela 4 mostra os resultados de composição química obtidos por EDS para a liga de Fe-4 Ti.

Tabela 4 – Composição química da liga Fe-4 Ti tratada a 850 °C por 48 h.

| Fase     | Fe             | Ti              |
|----------|----------------|-----------------|
| Fe(Ti)-α | $97,2 \pm 0,3$ | $2,80 \pm 0,29$ |
| TiFe2    | $79,5 \pm 0,7$ | $20,5 \pm 0,7$  |

Figura 40 - Micrografias da liga Fe-4Ti tratada a 850 °C ro 48 h.

Fe-4Ti 850 °C ro 48 h

a)

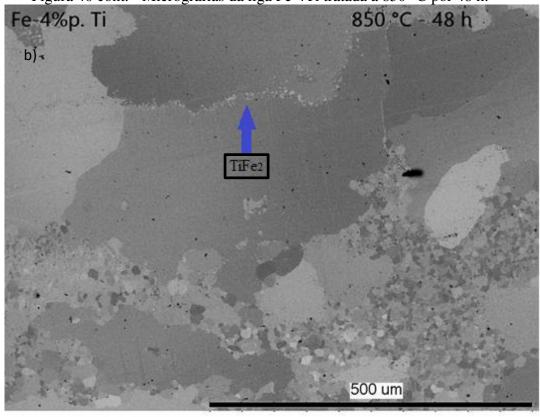


Figura 40 cont. - Micrografias da liga Fe-4Ti tratada a 850 °C por 48 h.

Fonte: Arquivo pessoal.

### 4.3.1.2 Difratometria de raios X (DRX)

A Figura 41 mostra os difratogramas da liga Fe-Ti com 4 de Ti nas condições comolaminada, tratada a 1100°C por 3 h e 9 h e a 1200°C por 3 h. A Figura 42 mostra o difratograma para a liga tratada a 850°C por 5 h.

Novamente, observando as Figuras 41 e 42 podemos identificar a presença majoritária da fase Fe(Ti)- $\alpha$ . Pelo diagrama de fases da Figura 8, a liga com 4 de Ti deve ter as fases Fe(Ti)- $\alpha$  e  $TiFe_2$  em uma fração muito baixa. Devido à baixa quantidade dessa fase, apenas alguns picos apareceram, sendo que, os picos mais intensos estão próximos a  $20,1^{\circ}$ , ou seja, coincidem com o pico do plano (110) da fase Fe(Ti)- $\alpha$ , isto é, os picos estão superpostos dificultando a identificação precisa nos difratogramas.

Devido à grande quantidade de defeitos presentes na liga como-laminada, a largura dos picos é maior do que para as ligas tratadas. Estas, apresentam picos mais intensos, mais finos e mais bem definidos, além de menor quantidade de ruído nos difratogramas.

Figura 41 - Difratogramas da liga Fe-4Ti nas condições a) como-laminada, tratadas a 1100°C por: b) 3 h e c) 9 h e a 1200°C por d) 3 h.

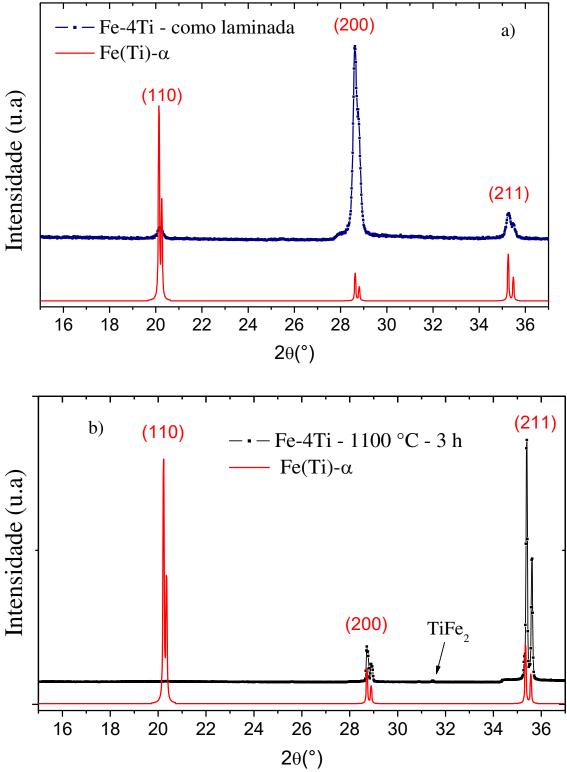
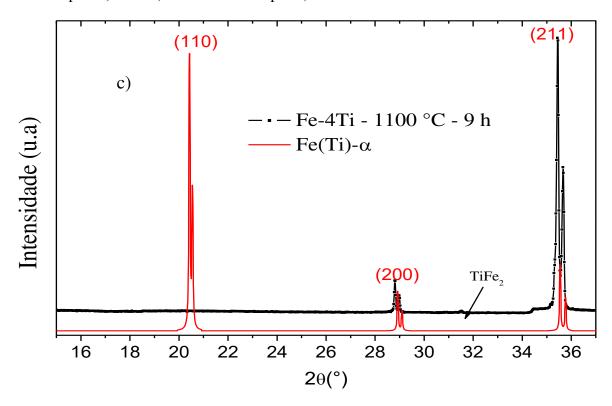
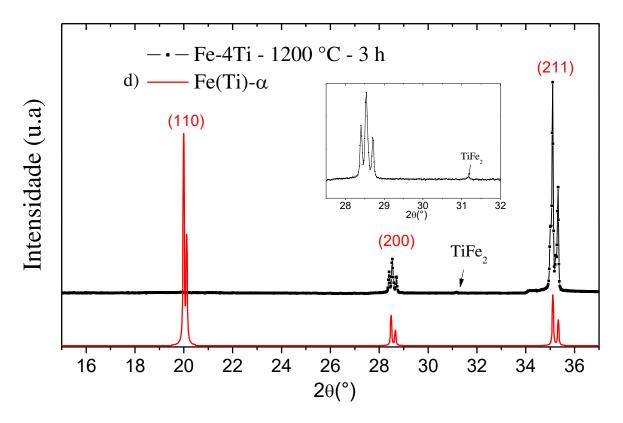


Figura 41 cont. - Difratogramas da liga Fe-4Ti nas condições: a) como-laminada e tratadas a 1100°C por: b) 3 h e c) 9 h e a 1200°C por d) 3 h.





Na Figura 41 (a) pode-se observar, que para a liga Fe-4Ti como-laminada, assim como para a liga Fe-3Ti, que a família de planos cristalográficos que possui a maior intensidade relativa é a (200), localizado a 28,5°. Isso pode indicar que a liga possui uma textura de laminação. A intensidade relativa do pico a 35,3° é praticamente igual à do padrão e o pico a 20,1° possui uma intensidade relativa muito menor que a do padrão. Tais resultados foram muito similares ao da liga Fe-3Ti.

Nas Figuras 41 (b), (c) e (d), o pico mais intenso foi o localizado a 35,3°, referente ao plano (211), indicando que, após os tratamentos térmicos, a liga pode ter obtido uma textura para esse plano. O pico referente aos planos (110) praticamente desapareceu e o pico a 28,5° possui a mesma intensidade que o padrão para as três condições de tratamento térmico.

Já na Figura 42, para a liga tratada a 850°C por 5h, podemos observar que o pico com maior intensidade relativa é o localizado a 28,5°, referente ao plano (200). O plano a 35,3° possui a mesma intensidade que o padrão e o pico a 20,1° pode ser observado com baixíssima intensidade. Diferentemente das outras, pode-se observar um pequeno pico, bem definido, a 18,5° e outro em 25,62° além do localizado em 31,34°, referentes à fase TiFe<sub>2</sub>.

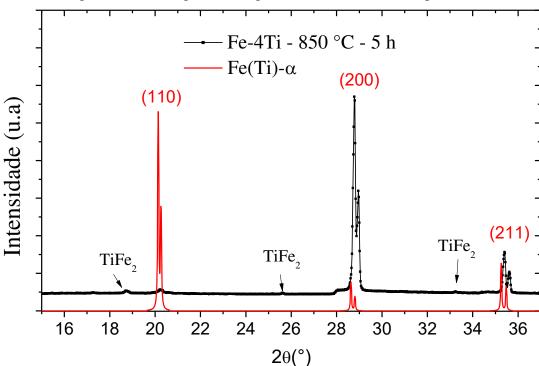


Figura 42- Difratograma da liga Fe-4Ti tratada a 850°C por 5 h.

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 43 mostra o difratograma da liga Fe-4Ti na condição tratada a 850 °C por 48 h. Os picos relativos aos planos (110) e (211) possuem praticamente a mesma intensidade, mas

isso pode ter ocorrido devido a alguma orientação preferencial, tendo em vista que a liga não está na forma de pó, mas sim, em formato de chapa. Neste difratograma não se observa a presença de picos relativos à fase TiFe<sub>2</sub>, pois provavelmente houve dissolução de grande parte destas partículas, devido ao longo tempo de tratamento térmico, pois a temperatura de 850°C para a liga Fe-4Ti, encontra-se no campo monofásico da liga.

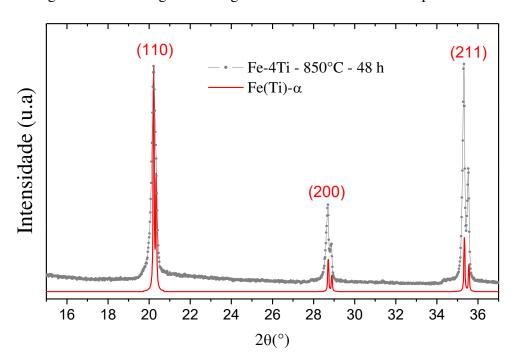


Figura 43 – Difratograma da liga Fe-4 Ti tratada em 850 °C por 48 h.

Fonte: Arquivo pessoal.

#### 4.3.1.3 Difração de elétrons retroespalhados (EBSD)

A Figura 44 mostra a ODF relativa a  $\varphi_2=45^\circ$ . A Figura 45 (a) mostra a imagem obtida através do EBSD e a Figura 45 (b) mostra os contornos de alto e baixo ângulo presente na liga de Fe-4Ti tratada a 850 °C por 48 h, indicados na legenda como BÂ, que são contornos de baixo ângulo que variam de 2 a 15° e AÂ, que são contornos de alto ângulo, que variam de 15 a 180°.

Pela ODF apresentada na Figura 44, assim como observado para a liga com 3% de Ti, percebemos a predominância de fibra alfa e fibra gama na liga de Fe-4% Ti tratada a 850 °C por 48 h, as quais não são ideais para as propriedades magnéticas desejadas por não possuírem componentes de textura com a direção de fácil magnetização.

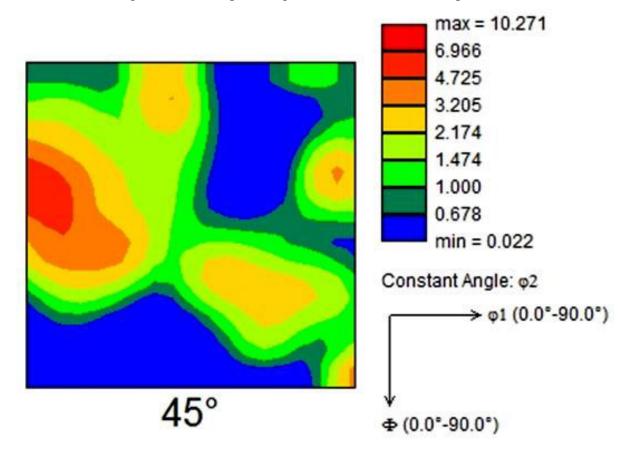
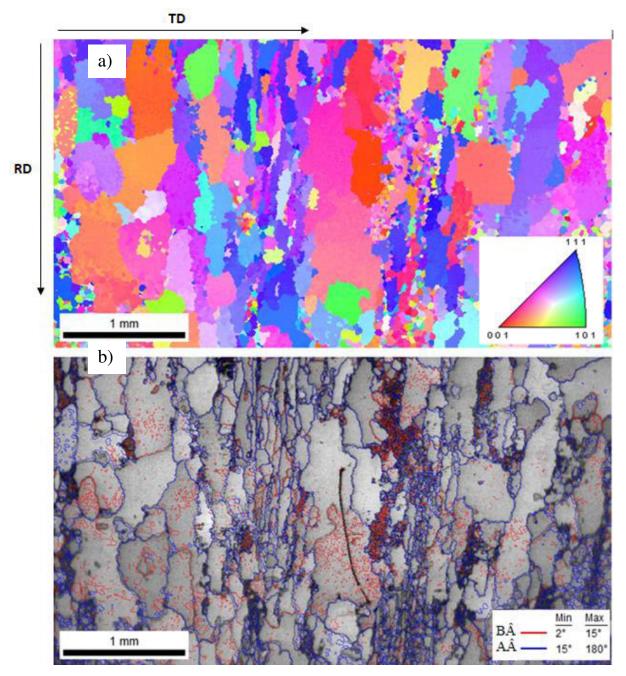


Figura 44 – ODF para a liga Fe-4Ti tratada a 850 °C por 48 h.

Através da Figura 45 (a), nota-se que existe a presença de grãos com orientações diversas, não existindo uma orientação preferencial. Pela Figura 45 (b), observamos a presença majoritária de contornos de alto ângulo, o que indica que os grãos possuem orientações distintas entre si, indicando a ausência de textura.

A Figura 46 nos mostra uma distribuição bimodal de tamanho de grão, indicando que houve crescimento anormal de grão, pois, existem grãos muito grandes e grãos pequenos, como já pôde ser constatado pela microscopia eletrônica de varredura. Percebe-se que existem dois picos, um com cerca de 250 μm e outro com 600 μm.

Figura 45 - a) Figura de Polo inversa e b) Contornos de grão para a liga Fe-4Ti tratada a 850 °C por 48 h.



0.16 0.14 0.12 Frequência (%) 0.10 80.0 0.06 0.04 0.02 0.00 0 200 300 400 500 100 600 700 800 Tamanho de grão (µm)

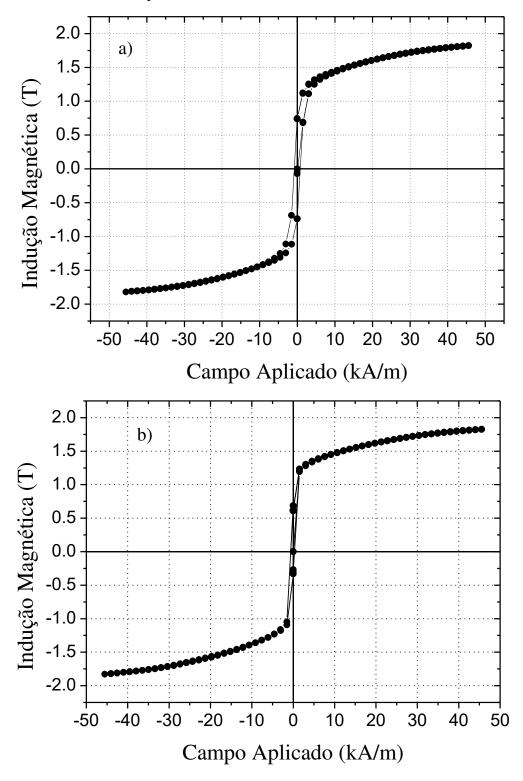
Figura 46 - Distribuição e frequência de tamanho de grão para a liga Fe-4Ti tratada a 850 °C por 48 h

## 4.3.2 Propriedades Magnéticas

### 4.3.2.1 Indução Magnética

Como realizado para as ligas Fe-3Ti e Fe-Si, para medir a indução de saturação, foi aplicada uma taxa moderada de variação de campo (1,5 kA/m/s) até o campo limite do dispositivo (45 kA/m). A Figura 47 mostra a curva de indução magnética para a liga Fe-4Ti após a laminação e após o tratamento a 850 °C por 48 h. O valor de indução máximo foi de 1,81 T para a liga como-laminada e 1,82 T para a liga tratada.

Figura 47- Curva de indução magnética da liga Fe-4Ti a) após a laminação e b) após tratamento térmico a 850 °C por 48 h.



A Figura 48 mostra a curva de indução magnética para a liga Fe-4Ti no estado comolaminada, feita com uma baixa taxa de aplicação de campo (0,6 kA/m/s) e até cerca de 18 kA/m a fim de medir os campos coercivo e remanente do material.

Com base na Figura 48, podemos verificar que o valor do campo coercivo é de 763 A/m para a liga como-laminada e 220 A/m para a liga tratada. O valor de campo remanente é de 0,73 T para a liga como-laminada e 0,57 T para a liga tratada sendo ambos menores que os valores para a liga Fe-3Ti. Tais valores são baixos, como era de se esperar de um material magnético macio, mas ambos os valores são muito maiores comparados ao do Fe-Si. A liga como-laminada possui um  $H_c$  3,5 vezes maior que para a liga tratada, porém, como já foi discutido para a liga Fe-3Ti o material está deformado, com uma densidade de defeitos estruturais muito grande, os quais contribuem para o aumento de  $H_c$ . O tratamento térmico removeu os defeitos gerados na laminação, fazendo com que o campo coercivo diminuísse.

A Figura 49 mostra a permeabilidade relativa para a liga Fe-4Ti após a laminação e tratada a 850 °C por 48 h, originada da derivada da curva de indução inicial

Como podemos observar na Figura 49 (a), a permeabilidade relativa inicial é de aproximadamente 559 sendo menor que do Fe-Si, e na Figura 49 (b), o valor é de 2682. Podemos observar, novamente, o surgimento de um pico com um valor máximo de permeabilidade de 3095. Esse pico pode ter surgido devido à anisotropia magnetocristalina da amostra tratada, indicando que as paredes de domínio magnéticos se movimentaram com dificuldade, fazendo com que precisasse de mais energia para sobrepor essa barreira gerada pela anisotropia, ou seja, foi necessário um campo magnético aplicado mais intenso, fazendo com que surja um pico deslocado para maiores valores de campo. A partir desse ponto, o valor de permeabilidade magnética diminui. No caso da liga como-laminada, as paredes de domínio magnéticos tinham dificuldade de movimentação devido à presença de defeitos cristalinos no material, consequentemente, o valor da permeabilidade magnética relativa inicial diminui. Essa resistência oferecida pelos defeitos pode ser maior que a oferecida pela anisotropia, de modo que não se consiga sobrepor a energia imposta pelos defeitos, dessa forma, a permeabilidade magnética cai até permanecer constante com o aumento do campo magnético. (26)

Figura 48 - Detalhe da origem da curva de indução magnética da liga Fe-Ti nas condições a) como-laminada, b) tratada a 850 °C por 48 h.

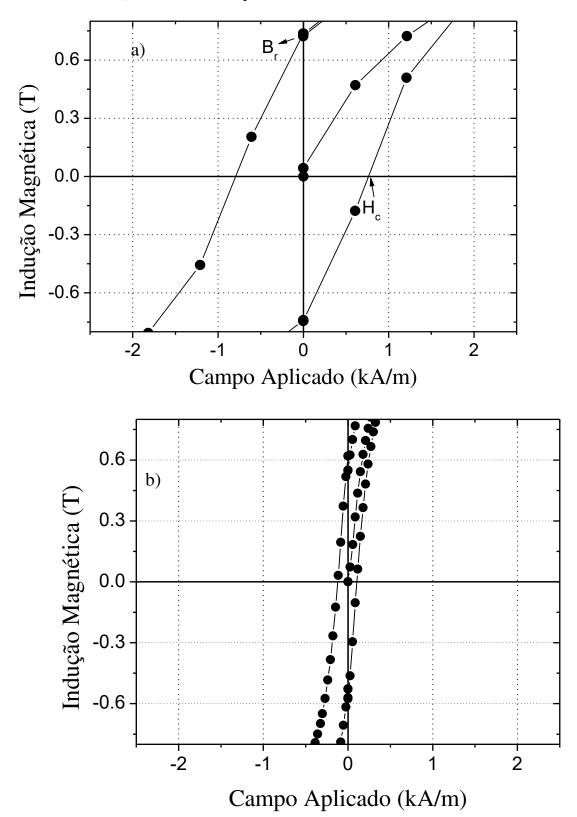
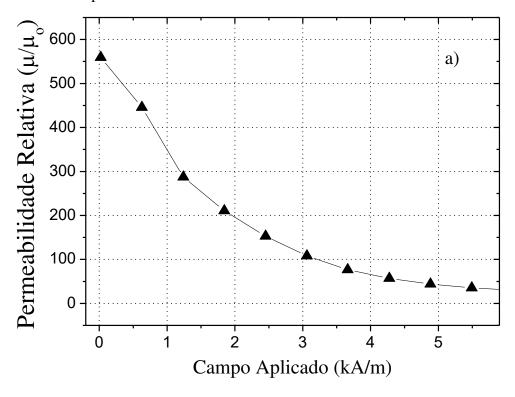
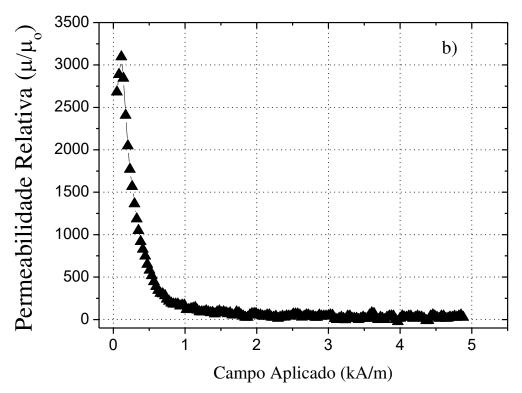


Figura 49 - Permeabilidade relativa da liga Fe-4Ti (a) como-laminada, (b) após tratamento térmico a  $850\,^{\circ}\mathrm{C}$  por  $48\,\mathrm{h}.$ 





## 4.3.2.2 Magnetostricção

As Figuras 50 e 51 exibem as curvas de magnetostricção longitudinal e transversal para as ligas de Fe-4Ti como-laminada e tratada a 850 °C por 48 h, respectivamente.

 $Figura\ 50\ -\ Fe-4Ti\ como-laminada-Magnetostricção:\ (a)\ longitudinal,\ (b)\ transversal.$ 

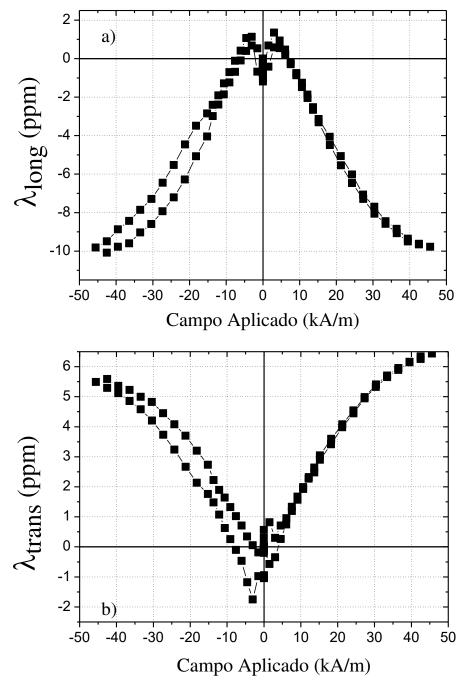
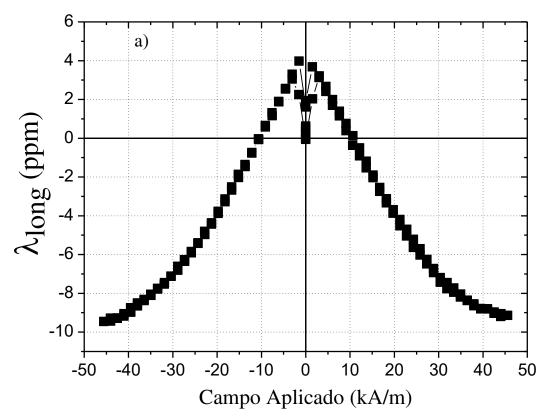
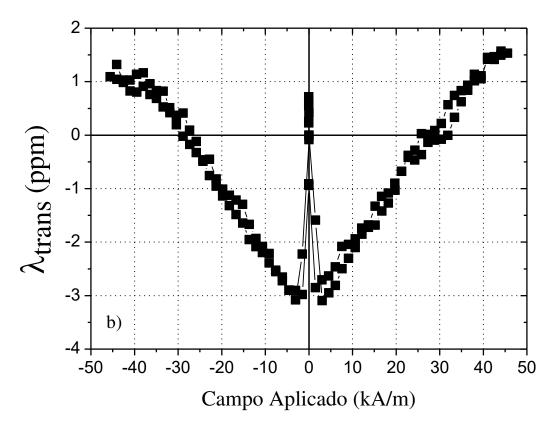


Figura 51 - Fe-4Ti tratada a 850°C por 48 h: Magnetostricção: (a) longitudinal, (b) transversal.





Através das Figuras 50 e 51, pode-se obter o valor da magnetostricção longitudinal máximo de -9,82 ppm e o da magnetostricção transversal de 5,92 ppm. Utilizando-se a equação (1), o valor da magnetostricção total é de -15,7 ppm e a magnetostricção de saturação 10,47 ppm. Já para a liga tratada, temos os seguintes valores máximos:  $\lambda_{long} = -9,3$  ppm,  $\lambda_{trans} = -3,08$  ppm. A magnetostricção total foi calculada em dois pontos, já que os máximos da transversal e longitudinal não ocorrem para o mesmo campo magnético aplicado. Um deles para  $\lambda_{long(máx)}$  e outro para  $\lambda_{trans(máx)}$ , resultando respectivamente em -10,4 ppm e 6,38 ppm, e a a magnetostricção de saturação foi de -6,93 ppm e 4,25 ppm Nota-se que a largura da histerese da liga como laminada Fe-4Ti é maior que a da liga tratada.

#### 4.4 Comparação dos Resultados de Propriedades Magnéticas e Microestrutura

Neste tópico, serão comparados os resultados obtidos para as ligas Fe-Si, Fe-3Ti e Fe-4Ti.

Com base nas micrografias apresentadas nas Figuras 26, 38 e 39, para as ligas Fe-3Ti e Fe-4Ti como-laminadas, podemos afirmar que as microestruturas são praticamente idênticas. Também para a condição tratada a 1100°C por 3 h, ambas as ligas possuem microestruturas muito semelhantes, com tamanhos e distribuição de grãos comparáveis. O mesmo ocorre para as condições de tratamento térmico a 1100°C por 9 h e a 1200°C por 3 h.

Para a liga Fe-4Ti tratada a 850°C por 5 h, podemos perceber a existência de regiões bem distintas entre grãos finos e grãos grosseiros. O tamanho de grão é menor que aqueles obtidos nas outras condições de tratamento térmico, porém pode-se notar que alguns grãos cresceram muito mais que outros e observa-se a presença de grãos ilha, sendo possível que tenha ocorrido crescimento anormal de grão.

Ao compararmos a liga Fe-Si com as ligas Fe-3Ti 3 Fe4Ti, tratadas a 850°C por 48 h, com base nas Figuras 18, 27 e 40, podemos perceber que as microestruturas das ligas de Fe-Ti são bem diferentes entre si. A liga Fe-4Ti possui região com grãos grandes e região com grãos muito pequenos, indicando um crescimento anormal de grão, enquanto que a liga Fe-3Ti possui grãos pequenos, médios e grandes coexistindo nas condições mostradas nas três micrografias, indicando uma distribuição normal de tamanho de grão. Essa diferença pode ter ocorrido devido à presença da fase TiFe<sub>2</sub> na liga de Fe-4Ti durante o tratamento térmico, a qual pode ter servido como barreira para o crescimento normal de grão, favorecendo, assim, o crescimento anormal.

A liga de Fe-Si comercial possui somente grãos grandes, com cerca de 1,8 mm de diâmetro, sendo essa a configuração ideal de tamanho de grão.

Apesar dos resultados de raios X sugerirem que as ligas Fe-3Ti e Fe-4Ti apresentassem textura, os resultados de EBSD não confirmaram este resultado. Pela análise das ODFs, é claro que a liga de Fe-Si de fato possui textura Goss forte. Já as ligas de Fe-Ti apresentaram as componentes fibra alfa e fibra gama, porém, esse resultado é comum para ligas CCC altamente deformadas, sendo que, após o tratamento térmico, é comum que as mesmas componentes sejam mantidas. (4).

Com relação ao tamanho de grão, a liga de Fe-Si apresenta grãos muito grandes e orientados, sendo eles que dão origem à textura Goss forte. Já a liga de Fe-3Ti apresentou uma distribuição monomodal de tamanho de grão, o que indica que o crescimento de grão foi normal. Já a liga de Fe-4Ti apresentou uma distribuição bimodal de tamanho de grão, indicando crescimento anormal de grão. Pode ser que, com outras rotas de deformação, intercalando diferentes graus de redução na laminação com tratamentos térmicos, a textura se modifique.

Com relação à propriedades magnéticas, primeiramente, faremos uma comparação com os resultados das ligas como-laminadas. A Tabela 5 mostra os valores de indução magnética e magnetostricção para as ligas Fe-3Ti e Fe-4Ti.

Hс  $\mu_r^0$  $\lambda_{long}(ppm)$  $\lambda_{trans}(ppm)$  $\lambda_{total}$  (ppm) Bmáx (T) Br (T) Liga (A/m) Fe-3Ti laminada 78,4 1,95 0.76 658 -11,5 6,00 -17,5Fe-4Ti laminada 76,4 1,81 0,73 559 -9,82 5,92 -15,74

Tabela 5 – Valores de propriedades magnéticas para as ligas Fe-3Ti e Fe-4Ti.

Fonte: Arquivo pessoal.

A liga Fe-3Ti possui um valor de indução máxima maior que a liga Fe-4Ti, o que é esperado tendo em vista a maior quantidade de ferro. Comparando as Figuras 34 e 48, observase que a diferença entre o campo coercivo das ligas de Fe-Ti foi pequena.

Os valores de magnetostricção da liga Fe-3Ti foram ligeiramente maiores do que a liga de Fe-4Ti.

A Tabela 6 apresenta os valores de campo coercivo, campo remanente e indução magnética máxima para as ligas de Fe-Si, Fe-3Ti e Fe-4Ti, ambas após o tratamento a 850 °C por 48 h.

Tabela 6 – Valores obtidos dos gráficos de B vs H para as ligas de Fe-Si, Fe-3Ti e Fe-4Ti, ambas tratadas a 850 °C por 48 h.

| Liga            | Hc (A/m) | Bmáx (T) | Br (T) | $\mu_r^0$ | $\mu_r^{mcute{a}x}$ |
|-----------------|----------|----------|--------|-----------|---------------------|
| Fe-Si           | 12,0     | 2,27     | 0,026  | 870       | 1728                |
| Fe-3Ti Tratada  | 249,0    | 2,00     | 0,76   | 1563      | 2726                |
| Fe-4 Ti Tratada | 220,0    | 1,82     | 0,57   | 2681      | 3095                |

Mesmo após o tratamento, o valor de indução magnética máxima do Fe-Si foi maior do que as ligas de Fe-Ti. Como esperado, a liga Fe-3Ti tratada possui um valor de indução maior que a liga Fe-4Ti tratada, devido a menor quantidade de ferro presente nesse liga.

Os campos coercivo e remanente do Fe-Si são muito menores do que os das ligas de Fe-Ti. As áreas das histereses das ligas de Fe-Ti diminuíram significativamente após o tratamento, mas devido aos maiores valores de campo remanente e campo coercivo, comparados aos do Fe-Si, a perda histerética das ligas de Fe-Ti serão maiores do que para a liga de Fe-Si. Os valores de H<sub>c</sub> e B<sub>r</sub> da liga Fe-4Ti tratada são menores do que da liga Fe-3Ti tratada, apesar da diferença ser pequena, isso indica que a Fe-4Ti terá uma perda histerética menor.

Em relação à permeabilidade relativa inicial, a liga de Fe-4Ti tratada apresentou um valor maior do que as ligas de Fe-Si e Fe-3Ti. Além disso, o valor de permeabilidade máximo também é maior para a liga de Fe-4Ti.

A Tabela 7 mostra os valores de magnetostricção máxima longitudinal e transversal para as ligas de Fe-Si e das Fe-3Ti e Fe-4Ti tratadas a 850 °C por 48 h.

Tabela 7 – Valores de magnetostricção máxima longitudinal e transversal das ligas de Fe-Si, Fe-3Ti e Fe-4Ti tratadas a 850 °C por 48 h.

| Liga            | $\lambda_{long}(ppm)$ | $\lambda_{tran}(ppm)$ |  |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|--|
| Fe-Si           | 19,0                  | -14,0                 |  |
| Fe-3Ti Tratada  | -7,53                 | 6,20                  |  |
| Fe-4 Ti Tratada | -9,30                 | -3,08                 |  |

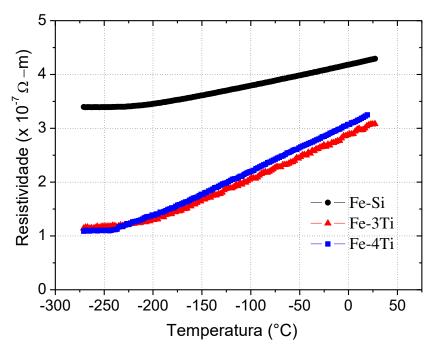
Em relação à magnetostricção, novamente, o Fe-Si obteve os maiores valores. A magnetostricção longitudinal da liga Fe-3Ti diminuiu em relação à como-laminada, apresentando o menor valor das três ligas. Entretanto, o valor da magnetostricção transversal foi maior do que para a liga Fe-4Ti. Além disso, a histerese da curva de magnetostricção da liga Fe-3Ti tratada foi muito maior do que para a liga Fe-4Ti.

As magnetostricções, tanto longitudinal quanto transversal da liga Fe-4Ti são significativamente menores que as da liga Fe-Si.

#### 4.4.1 Resistividade Elétrica

A Figura 52 mostra as curvas de resistividade em função da temperatura para as três ligas do presente estudo. Desta Figura, observa-se que a resistividade em baixas temperaturas da liga Fe-Si é maior que das ligas Fe-Ti, resistividade esta dominada por distorções da rede cristalina. Já na região linear, onde a contribuição dos fônons é importante, a inclinação das curvas das ligas Fe-Ti é maior que da liga Fe-Si.

Figura 52 – Curvas de resistividade elétrica vs temperatura para as ligas de Fe-Si, Fe-3Ti e Fe-4Ti, ambas tratadas a 850 °C por 48 h.

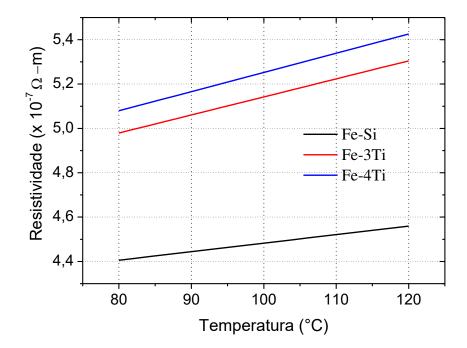


Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 53 apresenta uma extrapolação dos valores das resistividades medidas vs temperatura, para o intervalo de temperatura de operação de um transformador de potência, que

é entre 80°C e 120°C. (27) Ambas as ligas de Fe-Ti apresentam uma resistividade maior que a do Fe-Si, sendo que, a resistividade da liga com Fe-3Ti é menor, devido de ela possuir menos átomos de titânio e ausência de uma segunda fase. Esse resultado é positivo, pois as perdas magnéticas por corrente parasita serão menores nas ligas de Fe-Ti, principalmente na Fe-4Ti, do que para a liga de Fe-Si.

Figura 53 – Extrapolação das curvas de resistividade elétrica vs temperatura para as ligas de Fe-Si, Fe-3Ti e Fe-4Ti, ambas tratadas a 850 °C por 48 h no intervalo de temperatura entre 80 °C e 120 °C.



Fonte: Arquivo pessoal.

### 4.4.2 Perdas Histeréticas e Perdas por Corrente Parasitas

A Tabela 8 mostra os resultados de perdas histeréticas  $P_h$  e perdas por corrente parasita  $P_{cp}$  obtidos em temperatura ambiente para as ligas de Fe-Si, Fe-3Ti e Fe-4Ti tratadas a 850 °C por 48 h.

Para o cálculo de  $P_{cp}$  foram utilizadas as equação (4) e (5). Os valores da perda por corrente parasitas foram calculados para B=1,5 T, f=60 Hz, para a espessura das chapas de e  $=0,27\cdot10^{-3}$  m, as resistividades foram extraídas da Figura 52 para uma temperatura de 30 °C, aproximadamente, sendo de  $4,29\cdot10^{-7}$   $\Omega$ -m para o Fe-Si,  $3,08\cdot10^{-7}$   $\Omega$ -m para a liga Fe-3Ti e

 $3,25\cdot10^{-7}$   $\Omega$ -m para a liga Fe-4Ti. As massas específicas das ligas de Fe-Ti foram calculadas utilizando a equação (7).

$$d_{m\acute{e}dio} = \frac{100}{\frac{C_x}{d_x} + \frac{C_{Fe}}{d_{Fe}}} \tag{7}$$

Onde  $C_x$  é porcentagem em peso e  $d_x$  é a massa molar do silício ou do titânio. Os valores estimadas foram de 7746 kg/m³ para a liga Fe-3Ti e 7743 kg/m³ para a liga de Fe-4Ti. A massa específica da liga de Fe-Si foi obtida pela específicação, enviado pela Transformadores Jundiaí, tendo um valor de 7650 kg/m³.

Os valores do *skin depth* foram calculados utilizando os valores de permeabilidade inicial e permeabilidade máxima, mostrados na Tabela 6. Os valores das perdas histeréticas, perdas por corrente parasitas e os valores de *skin depth* são apresentados na Tabela 8

Tabela 8 – Valores de perdas histeréticas, perdas por correntes parasitas e *skin depth* para as ligas de Fe-Si, Fe-3Ti e Fe-4Ti tratadas a 850 °C por 48 h.

| Liga   | Ph<br>(W/kg) | Pcp<br>(W/kg) | Ph + Pcp<br>(W/kg) | Normalizado | $\delta_{m\acute{a}x}$ (cm) | $\delta_0$ (cm) |
|--------|--------------|---------------|--------------------|-------------|-----------------------------|-----------------|
| Fe-Si  | 4,66         | 0,30          | 4,96               | 1,00        | 1,4                         | 1,0             |
| Fe-3Ti | 9,07         | 0,41          | 9,48               | 1,91        | 0,9                         | 0,7             |
| Fe-4Ti | 6,52         | 0,39          | 6,91               | 1,39        | 0,7                         | 0,6             |

Fonte: Arquivo pessoal.

O valor da perda do Fe-Si tem uma diferença significativa do encontrado na literatura, onde a perda total, ou seja, a soma das três parcelas, chega a, aproximadamente 1 W/kg, pode ser que essa diferença esteja associada à maneira em que a perda histerética foi medido, visto que mede-se em corrente alternada, e em nosso experimento, foi medida em corrente contínua. Por esse motivo, os valores de perdas foram normalizados, dividindo-os pelo resultado encontrado para o Fe-Si. (5)

Com a análise da Tabela 8, podemos perceber que o valor das perdas aumentou com a adição titânio, sendo que foi quase o dobro para a liga com 3% em peso de titânio. Já a liga com 4% em peso de titânio apresentou um valor menor tanto para a perda histerética quanto para a perda por correntes parasitas, o que é um ponto positivo para o estudo em questão. Como foi mencionado, por causa de Hc e Br para a liga Fe-4Ti terem sido menores, a perda histerética

acabou sendo menor e, pelo fato de a resistividade elétrica ser maior do que a liga Fe-3Ti, a perda por corrente parasita também foi menor.

Todas as chapas utilizadas possuem uma espessura menor que o *Skin depth* calculado, isso garante que o fluxo magnético percorra quase todo o material. Os valores de *Skin depth* foram maiores para o Fe-Si. Já a liga Fe-4Ti obteve valores de *Skin depth* um pouco menores que a liga Fe-3Ti.

Para ter-se uma ideia das perdas de um transformador quando em trabalho, fizemos cáculos de  $P_{cp}$  a 80 °C, com os valores de resistividade de 4,4 x  $10^{-7}$   $\Omega$ -m para o Fe-Si, 4,9 x  $10^{-7}$   $\Omega$ -m para o Fe-3Ti e 5,1 x  $10^{-7}$   $\Omega$ -m para o Fe-4Ti. A Tabela 9 mostra os valores das perdas por corrente parasitas calculados para 80 °C

Tabela 9- Perdas por correntes parasitas a  $80\,^{\circ}\text{C}$  para as ligas de Fe-Si, Fe-3Ti e Fe-4Ti tratadas a  $850\,^{\circ}\text{C}$  por  $48\,\text{h}$ .

| Liga   | Pcp<br>(W/kg) |  |
|--------|---------------|--|
| Fe-Si  | 0,28          |  |
| Fe-3Ti | 0,24          |  |
| Fe-4Ti | 0,22          |  |

Fonte: Arquivo pessoal.

Pela análise da Tabela 9, percebe-se com o aumento da resistividade, as perdas por corrente parasitas para as ligas de Fe-Ti são menores do que para o Fe-Si, sendo um ponto positivo para essas ligas. Além disso, a liga Fe-4Ti possui uma perda menor do que a liga Fe-3Ti. Espera-se que, em 80 °C, as perdas histeréticas diminuam proporcionalmente para cada liga.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nas micrografias observadas nas Figuras 26, 38 e 39, para as ligas Fe-3Ti e Fe-4Ti, podemos observar que não houve crescimento anormal de grão, exceto para a liga Fe-4Ti tratada a 850°C por 5 h, que mostrou indícios de que para esta temperatura poderia ter havido crescimento anormal de grão. Já para o tratamento térmico a 850 °C por 48 h, a liga Fe-3Ti não apresentou crescimento anormal de grão, enquanto que Fe-4Ti apresentou crescimento anormal de grão, porém o tempo não foi o suficiente para que todos os grãos pequenos fossem consumidos.

Os difratogramas das Figuras 28 e 41, respectivamente para as ligas Fe-3Ti e Fe-4Ti, apontaram que pode ter sido gerada uma textura de laminação e também foi possível observar textura na liga Fe-4Ti tratada a 850°C por 5 h. Outra constatação é que a quantidade da fase TiFe<sub>2</sub> é muito baixa ou inexistente, não aparecendo nem nos difratogramas e nem nas micrografias. As ligas tratadas a 850°C por 48 h não apontaram a existência de uma textura forte, pois não havia todos os picos existentes no padrão.

Com relação às propriedades magnéticas, através dos resultados de indução magnética máxima, campo coercivo e permeabilidade inicial, pode-se concluir que o tratamento térmico aplicado às ligas Fe-Ti não teve grande efeito sobre a indução magnética máxima ao comparar os valores com aqueles do material como-laminado. Já os valores de H<sub>c</sub> e B<sub>r</sub>, medidos em temperatura ambiente, diminuíram extremamente, como era esperado devido à eliminação dos defeitos cristalinos. No entanto, ambas as ligas de Fe-Ti, mesmo após o tratamento térmico, apresentaram valores foram muito superiores aos encontrados para a liga de Fe-Si. Comparando-se as ligas Fe-Ti entre elas, a liga com maior quantidade de titânio apresentou valores mais satisfatórios.

Os valores de permeabilidade relativa foram maiores para a liga Fe-4Ti, isso pode indicar que a resposta magnética do material é melhor do que as outras duas ligas.

Os valores de magnetostricção das ligas de Fe-Ti após o tratamento térmico a 850°C por 48 h, resultou em valores de magnetostricção menores que da liga de Fe-Si, menos que a metade. A liga Fe-4Ti apresentou um valor menor de magnetostricção do que a liga Fe-3Ti, sendo que os valores foram satisfatoriamente baixos na faixa de atuação de um transformador.

Com relação à resistividade elétrica, a liga de Fe-Si apresenta valores muito maiores do que as ligas de Fe-Ti em temperatura ambiente, mas na temperatura de atuação de um transformador, as ligas de Fe-Ti apresentem valores de resistividade maiores do que a liga de Fe-Si. Isso se mostra benéfico, pois diminuiria a perda por corrente parasita em,

aproximadamente 57% para ambas as ligas de Fe-Ti, sendo que ambas possuem valores menores do que a liga de Fe-Si.

Em relação às perdas magnéticas, as ligas obtiveram valores muito maiores do que a liga de Fe-Si em 30 °C, sendo que a que mais se aproximou desses valores foi a liga Fe-4Ti, cujo valor foi 1,39 vezes maior. Na extrapolação feita para 80 °C, essa liga obteve um valor 1,2 vezes menor que o Fe-Si. Maiores estudos devem ser feitos em relação à essas perdas, pois, as medições não foram em corrente alternada nem à temperatura de atuação dos transformadores. Além disso, como as medidas foram em corrente contínua, não foi possível calcular a perda anômala.

Por fim, podemos analisar que, de um modo geral, a liga Fe-4Ti possui propriedades mais satisfatórias que a liga Fe-3Ti. Os pontos positivos desta liga, se comparada à liga de Fe-Si são:

- i) possui maiores valores de permeabilidade magnética inicial e máxima o que resultaria em enrolamentos menores e volumes menores dos transformadores,
- ii) possui magnetostricção da ordem da metade dos valores do Fe-Si, o que diminuiria o ruído gerado,
- iii) a resistividade desta liga é maior que a de Fe-Si na temperatura de operação dos transformadores o que é importante para a diminuição de perdas por corrente parasita.

Ainda há que melhorar a microestrutura da liga, para atingir o crescimento anormal de grão completo, assim serão eliminados muitos contornos de grão e os valores de H<sub>c</sub> também deverão diminuir, ainda que a resistividade também. A diminuição e H<sub>c</sub> contribuirá para a diminuição das perdas histeréticas na liga Fe-4Ti.

# 6 PRÓXIMOS PASSOS

- Fabricação de novas ligas com composição de 4%p. e 8%at. de Ti;
- Testes de laminação intercalado com tratamentos térmicos;
- Tratamento térmico posterior a uma temperatura maior que 850 °C;
- Realização de medidas de indução magnética e magnetostricção em corrente alternada.

# REFERÊNCIAS

- (1) ELECTRICAL CONSTROCTION & MAINTENANCE. The Basics of transformers, Disponível em:. http://ecmweb.com/archive/basics-transformers. Acesso em: 03 mar. 2016.
- (2) RAABE, D. http://www.dierk-raabe.com/electrical-steels-fe-3-si/. Acesso em: 12 jul. 2016.
- (3) CULLITY, B. D., GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. second. Hoboken, New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc., 2009.
- (4) HUMPHREYS, J., HATHERLY, M. Recrystallization and Related Annealing Phenomena. 2nd. Amsterdam: 2003.
- (5) LANDGRAF, F. J. G. Microestrutura e Histerese Magnética nos Aços para Fins Eletromagnéticos. 2007. (Livre Docência). Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- (6) SHOKROLLAHI, H. The magnetic and structural properties of the most important alloys of iron produced by mechanical alloying. **Materials & Design,** v. 30, n. 9, p. 3374-3387, 2009.
- (7) BUREAU OF LAND MANAGEMENT. http://blm.gov/style/medialib/blm/ca/pdf/pdfs/palmsprings\_pdfs/montainview4.Par.16 378.File.dat/Chapter%203.8%20Noise.pdf. Acesso em: 03 maio 2016.
- (8) SHILYASHKI, G. et al. Spatial distributions of magnetostriction, displacements and noise generation of model transformer cores. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 118, p. 188-194, 2016.
- (9) BORMIO-NUNES, C. et al. Near zero magnetostriction of Fe-Ti alloys. **Journal of Physics D-Applied Physics**, v. 42, n. 16, Aug 2009.
- (10) TURTELLI, R. S. et al. Magnetostriction of Fe-Ti Alloys. **Ieee Transactions on Magnetics**, v. 46, n. 2, p. 498-501, Feb 2010.
- (11) LYSZKOWSKI, R., BYSTRZYCKI, J. Hot deformation and processing maps of a Fe-Al intermetallic alloy. **Materials Characterization**, v. 96, p. 196-205, OCT 2014.
- OLABI, A. G., GRUNWALD, A. Design and application of magnetostrictive materials. **Materials & Design,** v. 29, n. 2, p. 469-483, 2008.
- (13) BENYOSEF, L., STAEL, G. C., BOCHNER, M. Optimization of the Magnetic Properties of Materials for Fluxgate Sensors. **Materials Research-Ibero-American Journal of Materials,** v. 11, n. 2, p. 145-149, 2008.
- (14) EC&M, E. C. M. http://ecmweb.com/content/guidelines-installing-transformers-part-1. Acesso em: 03/03/2016.
- (15) JANG, P., CHOI, G. Acoustic Noise Characteristics and Magnetostriction of Fe-Si Powder Cores. **Ieee Transactions on Magnetics**, v. 48, n. 4, p. 1549-1552, 2012.
- (16) GROSSINGER, R., TURTELLI, R. S., MEHMOOD, N. Magnetostriction of Fe-X (X = Al, Ga, Si, Ge) Intermetallic Alloys. **Ieee Transactions on Magnetics,** v. 44, n. 11, p. 3001-3004, 2008.
- (17) MEHRER, H. et al. Diffusion in intermetallic phases of the Fe-Al and Fe-Si systems. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, v. 240, p. 889-898, 1997.
- (18) AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS. Disponível em: http://mio.asminternational.org/apd/index.aspx. 1990. acesso em 19 jan. 2017.

- (19) IKEDA, O. et al. Phase equilibria and stability of ordered b.c.c. phases in the Fe-rich portion of the Fe-Ga system. **Journal of Alloys and Compounds,** v. 347, n. 1-2, p. 198-205, 2002.
- (20) PAN, H. J., ZHANG, Z. H., XIE, J. X. The effects of recrystallization texture and grain size on magnetic properties of 6.5 wt% Si electrical steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 401, p. 625-632, 2016.
- (21) PAN, H. J. et al. Strong < 001 > recrystallization texture component in 6.5 wt% Si electrical steel thin sheets by secondary cold rolling and annealing. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 419, p. 500-511, 2016.
- (22) CHEN, C.-W. **Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials**. New York: Dover Publicationsm Inc., 1986.
- (23) AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS. Disponível em: http://mio.asminternational.org/apd/index.aspx. Acesso em: 19 jan. 2017
- (24) SIDOR, J. J. et al. Through process texture evolution and magnetic properties of high Si non-oriented electrical steels. **Materials Characterization**, v. 71, p. 49-57, Sep 2012.
- (25) RANJAN, R., BUCK O., THOMPSON R. B. A Study on the effect of dislocation on the magnetic properties of nickel using magnetic NDE methods. Journal of/ Applied Physics, v. 61, p. 3196 3198, 1987.
- (26) ATULASIMA, J., FLATAU, A. B., CULLEN, J. R. Analysis of the effect of gallium content on the magnetomechanical behavior of single-crystal FeGa alloys using an energy-based model. Smart Materials and **Structures**, v.17, 2008.
- (27) WEG, Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-a-%C3%93leo/30-a-300-kVA/c/GTD\_TO\_TOD\_PEQ?ff312378, Acesso em 24 nov. 2017.