

Caracterização de aços elétricos especiais de GNO aplicados a motores e equipamentos elétricos¹

Átilla Pinheiro Nunes², Gabriel Corrêa Guimarães³, Henrique Lacerda Eleutério⁴, Matheus Calonge Spitale⁵, Alexandra Ancelmo Piscitelli Mansur⁶, Herman Sander Mansur⁷

A caracterização dos aços elétricos industriais é uma prática de grande importância, pois, a partir dela, poderemos determinar se o aço está apto a exercer as funções para o qual ele foi destinado, no nosso caso, aplicações em motores e em equipamentos elétricos. Com o uso das técnicas de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de dispersão de elétrons (EDS), microdureza Vickers, difração de raios-X, e análise química, foi-se possível chegar a algumas conclusões. Dentre elas estão: grande heterogeneidade no tamanho dos grãos, porém, sem nenhuma orientação preferencial, garantindo, assim, uma boa condução das propriedades magnéticas do material em qualquer direção da chapa; uma boa dureza, garantindo uma boa resistência mecânica ao material, o que é de grande importância no momento em que o material será usinado. Determinaram-se também os constituintes do aço (0,5% manganês e 1,98% de silício) e do revestimento do material (cobre e zinco). Com todas essas informações, concluiu-se que o aço pode ser aplicado em motores e/ou equipamentos elétricos. Estudos mais detalhados podem quantificar as propriedades magnéticas deste material e determinar a influência do revestimento no material.

Palavras-chave: aço elétrico, caracterização, motores e equipamentos elétricos.

1. Introdução

Aços elétricos são aços com teor de silício considerável. Apresentam propriedades magnéticas e propriedades mecânicas apreciáveis. Os aços elétricos são aços magneticamente macios, usados como núcleos de equipamentos para geração, distribuição e utilização de energia elétrica. Estes aços não conduzem energia elétrica, e sim, fluxos magnéticos. Daí a importância dele possuir boas características magnéticas. Este fluxo magnético circula pelo núcleo dos diversos tipos de equipamentos em que este aço pode ser aplicado. São alguns deles: pequenos, médios e grandes motores de corrente contínua ou alternada, transformadores de força, transformadores de distribuição, hidrogeradores, dentre muitos outros.

A presença do silício na composição química de um aço, aliada ao rígido controle de processo em todas as suas etapas de produção, garante-lhes ótimas propriedades magnéticas. Os aços ao silício podem ser de dois tipos: grão orientado (GO) e grão não orientado (GNO). O silício GO possui as propriedades magnéticas otimizadas

¹ 6° ENEMET – Encontro Nacional de Estudante de Engenharia Metalúrgica e Materiais 24 a 28 de Julho de 2006 – Rio de Janeiro/RJ

² Aluno de Graduação do curso de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG

³ Aluno de Graduação do curso de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG

⁴ Aluno de Graduação do curso de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG

⁵ Aluno de Graduação do curso de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG

⁶ Doutoranda do curso de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e Minas da UFMG

⁷ Professor do Depto. de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG, Doutor

na direção de sua laminação, enquanto o GNO apresenta boas propriedades em qualquer direção considerada.

As características magnéticas de um aço elétrico dependem da espessura do núcleo, e dentre elas estão: a perda magnética e a indução magnética. Estas características são válidas tanto para aços de GO como para aços de GNO.

Os aços elétricos de GO e de GNO são aços planos siliciosos, ou seja, ligados ao silício para uma melhor aplicabilidade elétrica. Os aços silício de GO possuem propriedades magnéticas otimizadas na direção de sua laminação e são geralmente utilizados em transformadores de potência e em transformadores de distribuição de energia elétrica. Já os aços silício de GNO possuem propriedades magnéticas em qualquer direção considerada, e suas aplicações são, principalmente, em motores elétricos, reatores de lâmpadas fluorescentes, freezers, ares-condicionados, geradores de usinas hidrelétricas e outros [1].

Há ainda, uma outra classificação para os aços elétricos. São os semi-processados e os totalmente processados. Os semi-processados são aços que ainda precisam de um tratamento térmico final para atingir as propriedades magnéticas desejáveis. Geralmente, este tratamento é feito pela indústria consumidora do produto. No caso do aço totalmente processado, este tratamento final é feito na própria usina siderúrgica.

Além de possuir, logicamente, as propriedades elétricas, os aços elétricos precisam ter, também, boas propriedades mecânicas. Isto para que o aço possa ser laminado e usinado sem comprometer as suas propriedades de maior interesse, as elétricas. Para isso, é feito a adição de alguns elementos de liga, onde o principal e mais usado deles é o manganês.

Uma outra consideração relevante que devemos nos ater para os aços elétricos é quando se diz respeito ao revestimento do material. O revestimento nesta classe de aços é de muita importância, pois, além de diminuir as correntes parasitas nos núcleos, será a sua composição que determinará a maior parte das propriedades destes aços.

Tendo em vista a composição química destes tipos de aços, além de ferro, carbono (baixo teor) e silício (baixo ou alto teor), podem aparecer outros elementos, como potássio e fósforo (impurezas) e manganês, que melhora as propriedades mecânicas e/ou elétricas.

A qualidade dos aços elétricos está relacionada a cinco fatores: o tamanho médio dos cristais que compõem a liga, o número de defeitos cristalinos, o número e o tamanho de microcristais de impureza (chamadas de inclusões) e a textura cristalográfica, ou seja, a orientação dos cristais no espaço. "Os fabricantes de aço já têm boas receitas para controlar as três primeiras variáveis e reduzir as perdas histeréticas. O problema reside em controlar a textura", diz Landgraf. "Pelo menos 30 grupos mundiais tentam descobrir um método que permita fabricar a textura ideal para minimizar essas perdas." [2].

Devido à grande procura e demanda desta classe especial de aços, e tendo em vista a sua importância para as indústrias e para a sociedade em geral, fez-se necessário um estudo que pudesse determinar as principais características deste material para a sua aplicabilidade em motores e equipamentos elétricos. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é determinar se o aço em questão está apto a ser empregado nas funções acima definidas, analisando e quantificando suas propriedades físicas, estruturais e constitucionais, através de técnicas conhecidas do meio acadêmico e industrial.

2. Material e Métodos

Para a caracterização do aço elétrico, as amostras foram devidamente preparadas para as seguintes análises: difração de raios-X (DRX), microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de dispersão de elétrons (EDS), análise química e microdureza Vickers.

A chapa da matéria-prima possui uma espessura de 0,5 mm, enquanto a chapa de ponte tem uma espessura de 1,5 mm. Na preparação para a difração de raios-X, cortou-se um pedaço de um 1cm² de área da chapa da amostra da matéria-prima. Para a análise química, um pedaço desta chapa foi limalhada, para facilitar o processo.

Já para a microscopia óptica, MEV e EDS, foram-se feitos dois preparos: uma amostra da chapa da matéria-prima e outra da chapa de ponte (material acabado e recoberto). Ambas foram embutidas à quente com baquelite, seguida de lixamento (100#, 240#, 300#, 400#, 600# e 1000#) e polidas (pasta de diamante). Tendo sido feito o polimento adequadamente, atacou-se a amostra com Nital, para delinear as imperfeições do material, como contornos de grãos e interfaces de fases, e logo em seguida, observou-se no microscópio óptico.

Utilizando ainda as mesmas amostras preparadas para micrografia, fez-se um novo polimento das amostras para retirada da camada de óxido. Depois disso, realizou-se a análise de microdureza das amostras. O equipamento utilizado foi a máquina de dureza Vickers (HV), a qual se utiliza de um pequeno diamante na forma de uma pirâmide. A impressão deixada depois do ensaio é um losango. Suas diagonais são medidas e faz-se uma média (Dm). Este número encontrado é então submetido à seguinte fórmula:

$$HV = (0,18909 \cdot P) / Dm ; \text{ onde } P = \text{ carga aplicada em N. (Equação 1)}$$

Fazendo-se três ensaios de microdureza para cada amostra e obtendo-se a média entre os valores encontrados, obteve-se o valor de microdureza para cada amostra.

3. Resultados e Discussões

3.1. Microscopia Ótica

A amostra da chapa da matéria-prima, tanto as seções longitudinal (100x e 200x) quanto transversal (100x e 200x), estão mostradas nas Figuras 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Em ambas as seções observa-se claramente a não orientação dos grãos. Vêem-se alguns “pits” de corrosão oriundos do preparo metalográfico. Colorações diferentes nos grãos são causadas por um ataque químico não uniforme [3].

A amostra da chapa de ponte, tanto as seções longitudinal (100x e 200x) quanto transversal (100x e 200x) são mostradas nas Figuras 5, 6, 7 e 8, respectivamente. Nesta amostra, apesar do ataque não ter ficado muito bom, também se observa a não orientação dos grãos. Vêem-se também “pits” de corrosão oriundos do preparo metalográfico. Nas figuras VII e VIII, observa-se a interface entre a matéria prima e o recobrimento. O uso do reagente Nital para peças recobertas com cobre e zinco não é adequado. Observa-se que a parte bege, referente ao recobrimento da amostra, não sofreu nenhum ataque químico em comparação à parte cinza [3].

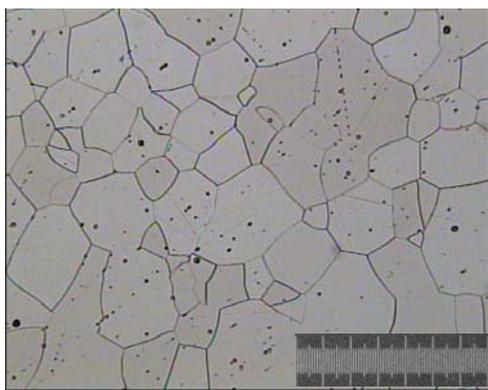


Figura 1: Micrografia da chapa da matéria-prima (100x, seção longitudinal).

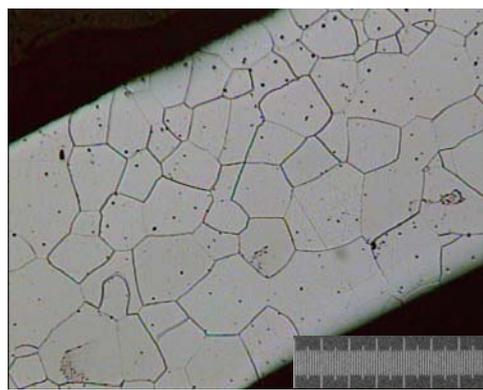


Figura 2: Micrografia da chapa de matéria-prima (100x, seção transversal).

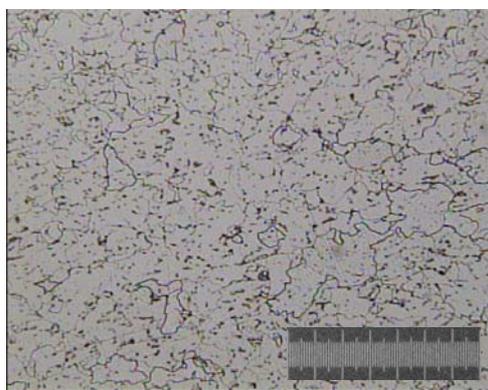


Figura 3: Micrografia da chapa de ponte (100x, seção longitudinal).

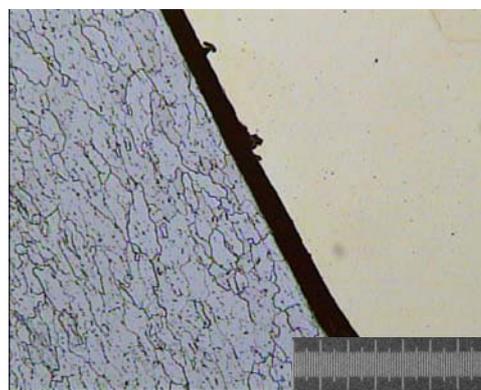


Figura 4: Micrografia da chapa de ponte (100x, seção transversal).

3.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de dispersão de elétrons (EDS)

Com o MEV é possível determinar o tamanho médio de grão e a microestrutura da amostra. Observa-se na Figura 9 que a amostra tem os contornos de grão bem definidos, alguns “pits” de corrosão (pontos brancos) e riscos provindos da falha do preparo da amostra. Observa-se ainda uma dispersão nos tamanhos dos grãos, ou seja, alguns grãos muito grandes e outros muito pequenos. Através desta figura pode-se estimar o tamanho médio dos grãos, obtendo-se um valor médio de $87 \pm 33 \mu\text{m}$.

Nas Figuras 10 e 11, com o uso dos elétrons secundários, foi-se possível avaliar a topografia das amostras. Para a da chapa de ponte não foi possível observar os contornos de grão e nem se fazer uma análise da amostra. Tudo isso, como já foi dito anteriormente, se deu devido o Nital não ser um bom reagente químico para a avaliação de superfícies recobertas com cobre e zinco. Na Figura 12 tem-se imagens de MEV para seção transversal da chapa de ponte, onde a seta indica claramente a interface do recobrimento com o aço. Nesta interface pode ser que tenha ficado um pouco da pasta de diamante ou, talvez, a baquelite tenha entrado no momento do embutimento.

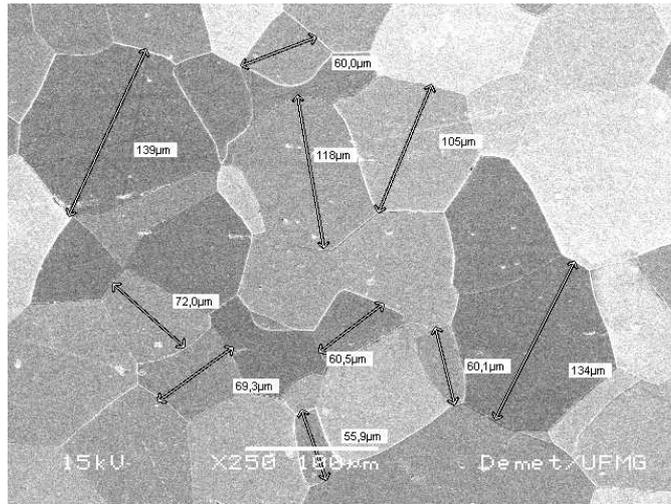
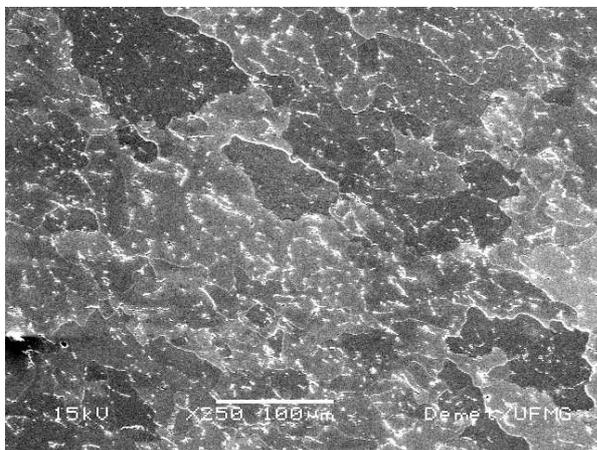
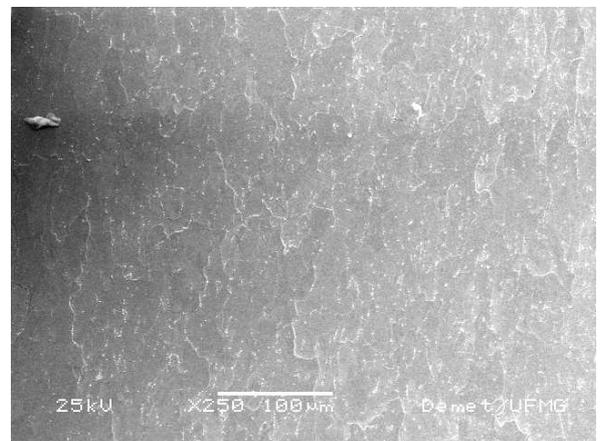


Figura 9: Micrografia da chapa da matéria-prima. Estimativa de tamanho de grãos da matéria prima (250x).



(a)



(b)

Figura 10: Topografia da chapa da (a) matéria-prima e da (b) chapa da ponte (250x).

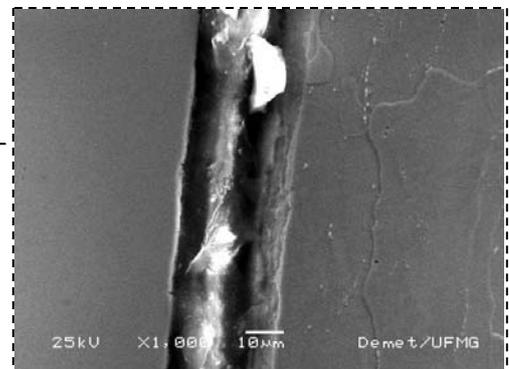
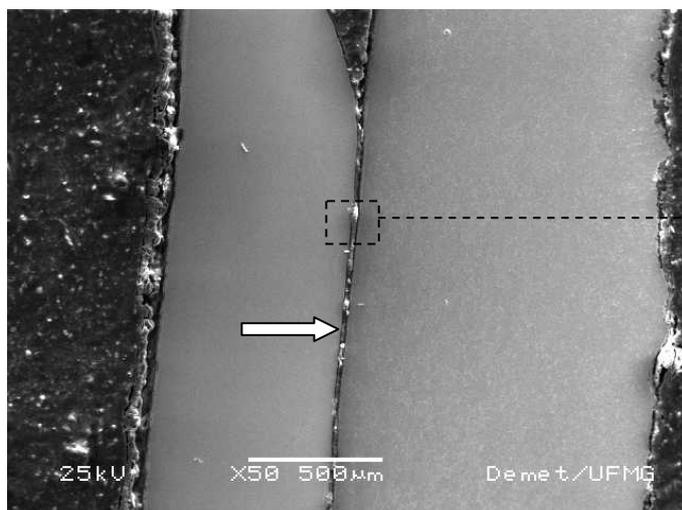
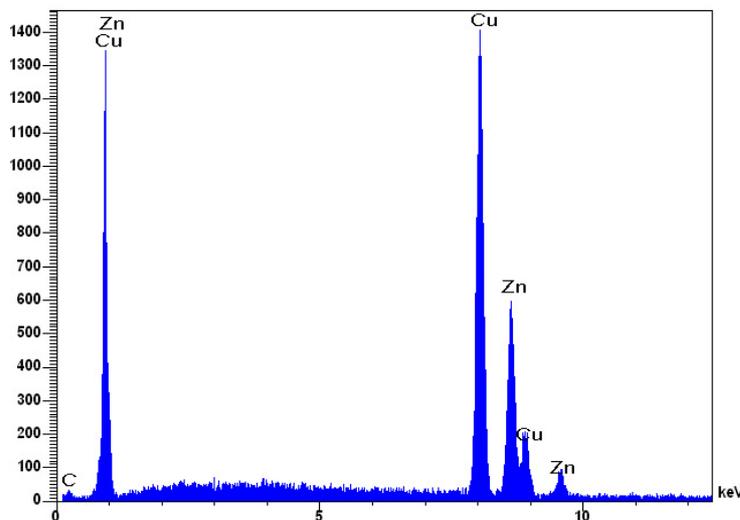


Figura 12 Micrografia da chapa de ponte (50x e 1000x, seção transversal).

Fez-se um EDS para cada amostra e os resultados são mostrados nos gráficos das Figuras 13 e 14.

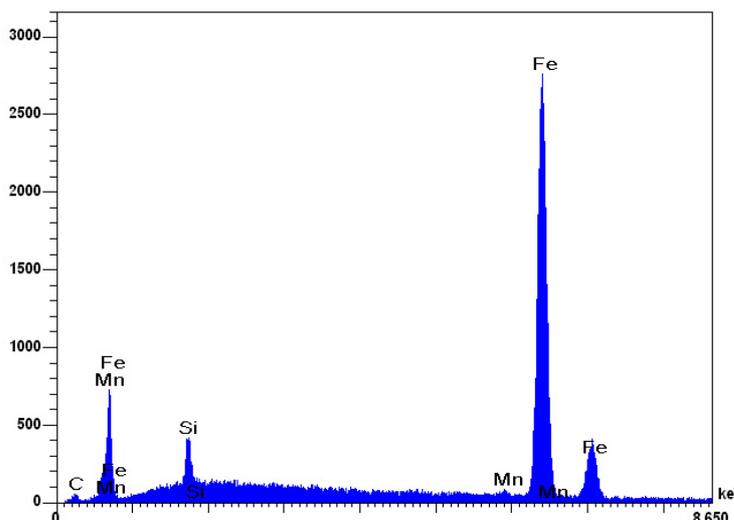


| Elemento | % Peso | % Atômico |
|----------|--------|-----------|
| Si | 0,7 | 1,6 |
| Mn | < 1 | < 1 |
| Fe | < 1 | < 1 |
| Cu | 66,0 | 66,0 |
| Zn | 33,1 | 32,2 |

Figura 13: Espectro de EDS da chapa de ponte (no recobrimento).

Como era de se esperar, encontrou-se, praticamente, como componentes do recobrimento, o cobre e o zinco (latão). A liga Cobre-Zinco nesta composição (66,6% de Cu e 33,4% de Zn, em massa) é chamado de fase alfa. Esta fase possui boas características de proteção contra corrosão e características mecânicas adequadas (alta ductilidade) para recobrimentos metálicos. Este recobrimento ainda tem a vantagem de diminuir as correntes parasitas que se formam nos núcleos dos equipamentos constituídos deste tipo de aço.

Para a chapa da matéria prima, encontrou-se uma boa quantidade de silício, o que nos leva a classificar este aço como alto silício, além de ser um aço baixo carbono (ver Figura 14). A quantidade de manganês (0,6%) encontrada é para melhorar as propriedades mecânicas do aço. O manganês, ao formar uma liga com o ferro e outros elementos de liga, age substitucionalmente, ou seja, ele ocupa o lugar do ferro nas células unitárias. A sua presença na estrutura faz com que a resistência mecânica aumente [4].



| Elemento | % Peso | % Atômico |
|----------|--------|-----------|
| Si | 2,8 | 5,4 |
| Mn | < 1 | < 1 |
| Fe | 96,6 | 94,0 |

Figura 14: Espectro de EDS para a chapa da matéria-prima.

3.3. Difractometria de Raios-X

A difração de raios-X desta amostra foi feita com o intuito de se determinar a estrutura cristalográfica da chapa da matéria-prima. A Figura 15 mostra o difratograma encontrado.

O difratograma da amostra indexa com a ficha do ferro α . No pico em 2θ igual a 99 não se foi possível fazer a indexação, por desconhecer a fase que se tem em menor quantidade. Sendo assim, o difratograma fornece as três principais direções cristalográficas do ferro α no aço. Uma outra difração foi feita com a mesma amostra, porém, girando-a de 90° . O resultado está mostrado na Figura 16.

Este procedimento é adotado para verificar se os grãos são realmente não orientados. Como a ficha de indexação encontrada foi a mesma, a do ferro α , confirma-se que a chapa é constituída por grãos não orientados.

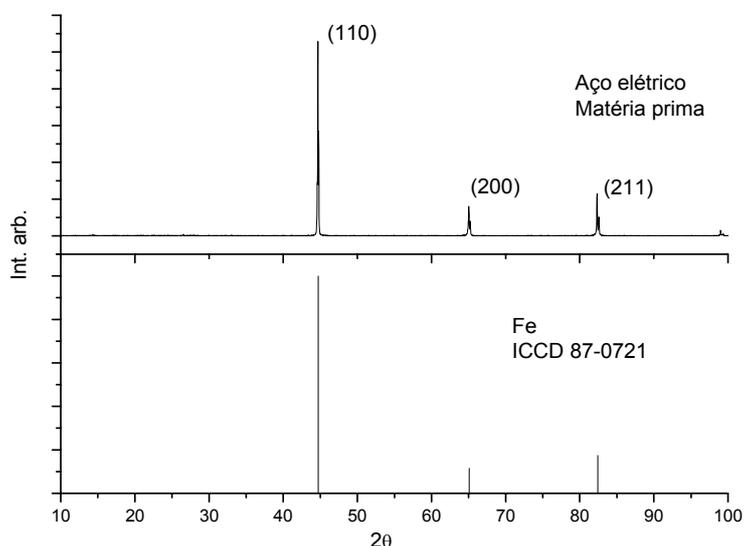


Figura 15: Difrátograma de raios-X para a amostra da chapa da matéria-prima.

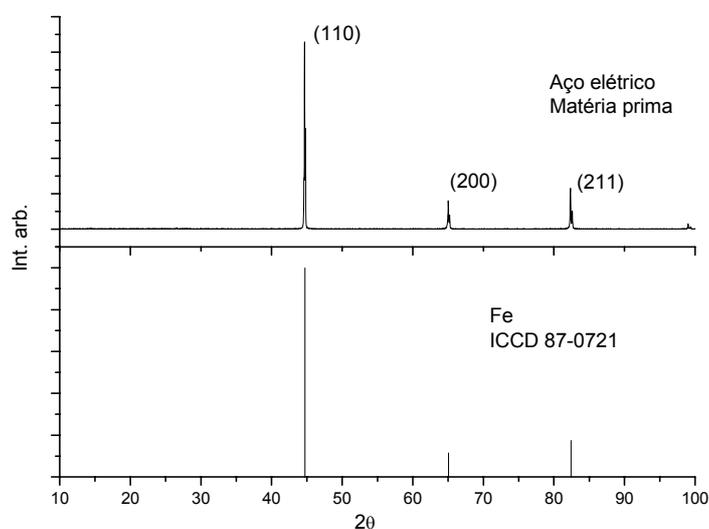


Figura 16: Difrátograma de raios-X para a amostra da chapa da matéria-prima girada de 90° .

3.4. Análise química

O resultado da análise química encontra-se na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Análise química da chapa da matéria-prima

| Elementos | S | Si | C | Mn | Fe | P |
|-----------|-------|------|-------|-------|--------|-------|
| % | 0,005 | 1,98 | 0,011 | 0,565 | 97,435 | 0,004 |

Este resultado nos dá quantitativamente a % de cada elemento presente na amostra. Como já havíamos constatado nas outras técnicas, a presença de silício é considerável, classificando o aço como um aço alto silício. O carbono presente é muito baixo, e ainda encontram-se algumas impurezas (enxofre e potássio). Estas impurezas prejudicam as propriedades mecânicas do aço. Por conseguinte, podem acabar por prejudicar as propriedades magnéticas. Mas devido à pequena quantidade destas impurezas no aço, acredita-se que não haverá nenhum prejuízo nas propriedades. A presença de manganês no aço, antes verificada no MEV, foi confirmada. Em média, para cada 1% de manganês, a resistência à tração aumenta 100 MPa [5].

A Tabela 2 faz um comparativo da influência de cada elemento químico nas propriedades mecânicas de um aço. Nela pode-se observar claramente a importância do manganês nos aços.

Tabela 2: Influência dos elementos químicos nas propriedades mecânicas de um aço [4].

| PROPRIEDADES | C | Mn | P | S | Si | Ni | Cr | Mo | V | Al |
|--|---|----|---|---|----|----|----|----|---|----|
| Aumenta dureza | X | X | X | | X | | | | | |
| Aumenta a resistência | X | X | X | | X | | | | X | |
| Diminui a ductilidade | X | | X | X | | | | | | |
| Aumenta a resistência ao impacto | | | | | | X | | | | |
| Aumenta a resistência à corrosão | | | | | | | X | | | |
| Aumenta a resistência abrasão | | | | | | | X | | | |
| Aumenta resistência altas temperaturas | | | | | | | | X | | |

3.5. Microdureza Vickers

Os valores de microdureza Vickers estão indicados na Tabela 3 a seguir. Foram feitos testes tanto para a chapa da matéria-prima quanto para a chapa de ponte.

Tabela 3: Microdureza Vickers para a chapa da matéria-prima e para a chapa de ponte.

| Amostra | Chapa da matéria-prima | | Chapa da ponte | | |
|--------------------------|------------------------|--------------|----------------|--------|--------------|
| | Transversal | Longitudinal | Transversal | | Longitudinal |
| Microdureza Vickers (HV) | 199 | 160 | c/ rec | s/ rec | 109 |
| | | | 126,4 | 165 | |

Observa-se que os valores de microdureza Vickers encontrados têm um valor menor nas seções longitudinais. Isso ocorre provavelmente pelo fato de se ter poucos grãos nessa direção. Ou seja, como o tamanho médio dos grãos é de $87\mu\text{m}$ e tem-se que a espessura da chapa é de 1,0mm aproximadamente, temos cerca de 11 grãos na seção longitudinal, um pequeno número para poder se avaliar com mais confiança a dureza da chapa. Observa-se também que o material é menos duro na área do recobrimento. Isso ocorre pelo fato de se estar avaliando, também, uma parte do recobrimento e não a chapa do material de imediato.

4. Conclusões

Baseado nos resultados conclui-se que, a matéria-prima em estudo possui características que são capazes de atender as especificações que se deseja para o seu uso final, ou seja, motores e equipamentos elétricos.

Observou-se que ela possui grãos não orientados, podendo, assim, ter suas propriedades magnéticas conduzidas em qualquer direção que se deseje. Para se determinar as perdas magnéticas e indução magnética deste material, seria necessário um estudo mais aprofundado, envolvendo experimentos adequados para a quantificação destas propriedades.

Averiguou-se também uma grande heterogeneidade nos tamanhos dos grãos, o que talvez tenha acontecido no processo de laminação da chapa.

A análise química nos deu com precisão os constituintes deste aço. Este teor de silício, cerca de 2,0%, caracteriza este material como alto silício, como já foi dito acima. A % de manganês detectada no MEV, e comprovada na análise química, tem sua justificativa, pois melhora as propriedades mecânicas dos aços. As % de impurezas (enxofre e potássio) encontradas são muito pequenas, não comprometendo assim, as propriedades do aço.

Os valores de microdureza Vickers encontrados tanto para a chapa da matéria-prima, como para a chapa de ponte, nos levou a concluir que o recobrimento é menos duro que a amostra, uma vez que, a parte que continha recobrimento apresentou uma menor dureza.

As análises por EDS foram de grande importância, pois através delas conseguiu-se determinar quais elementos compunham o recobrimento da chapa de ponte. Este recobrimento de cobre-zinco tem sua importância, pois diminui as correntes parasitas no núcleo, além de possuir boas características de proteção contra corrosão.

A difração de raios-X trouxe a confirmação de que este aço realmente possui grãos não orientados, oferecendo, assim, propriedades magnéticas em qualquer direção que se queira.

5. Referências Bibliográficas

1. ACESITA. Disponível em: <<http://www.acesita.com.br>>. Acesso em: 09/11/2005.
2. REVISTA PESQUISA. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br:2222/transform.php?lang=pt&xml=3/2/20031223/20040195/pt/SEC7_2.xml&xsl/pt/article.xsl&transf=normal&from=2&id=SEC7_2&issue=20040195>. Acesso em: 09/11/2005.
3. Coutinho, T.de A. Metalografia de não-ferrosos. Ed. Edgard Blucher, 1980.
4. DIFERRO. Disponível em: <<http://www.diferro.com.br>>. Acesso em: 05/12/2005.
5. MYSPACE. Disponível em: <http://www.myspace.eng.br/eng/mat/aco3.asp#ef_liga>. Acesso em: 05/12/2005.
6. Honeycombe, R. W. K. Steels Microstructure and Properties. London: Edward Arnold, 1981.

6. Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer aos Prof. Dagoberto Brandão e Prof. Vicente Buono pela disponibilização dos laboratórios de metalografia, MEV e Difração de raios x do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais. Agradecemos também às técnicas Joana, Patrícia e Andréia, que nos ajudaram no preparo e análises das amostras.

7. Abstract

The characterization of the industrial electric steels is a practice of great importance, because, starting from it, we can determinate whether the steel is capable to carry out the functions for which it was destined, in our case, applications in motors and in electric equipments. With the use of the techniques of optical microscope, scanning electron microscope (MEV), electrons dispersion spectroscopy (EDS), micro-hardness Vickers, diffraction of X-ray and chemistry analysis, it was possible to get some conclusions, which are: great heterogeneity in the size of the grains, however, without any preferential orientation, and then guaranteeing a good transport of the magnetic properties of the material in any direction of the foil; a good hardness, guaranteeing a good mechanical resistance to the material, which is of great importance when the material will be used. It was also determined the representatives of the steel (0,5% manganese and 1,98% of silicon) and of the covering of the material (copper and zinc). With all those information, we concluded that the steel can be applied in motors and/or electric equipments. More detailed studies can quantify the magnetic properties of this material and determinate the influence of the covering in the material.

Key-words: electric steel, characterization, motors and electric equipments.