

DESCARBONETAÇÃO DE AÇOS ELÉTRICOS EM LÂMINAS EMPACOTADAS¹

*Eduardo Cavalcante da Silva²
Fernando José Gomes Landgraf³
Nicolau Castro Apoená²
Gustavo José Souza Suto³
Marcos Flávio de Campos⁴*

Resumo

Um dos grandes problemas industriais é a produção de aços elétricos em grandes quantidades e para tal esses aços são recozidos em atmosfera descarbonetante próximos um do outro no sentido de obter em um só tratamento térmico um número máximo de lâminas. Este trabalho visa à análise e discussão de tal processamento, já que muitas lâminas são prejudicadas magneticamente por tal processamento. Verificou-se que dependendo do tempo de tratamento obteve-se que grãos pequenos no interior da amostra das lâminas que se encontravam no meio dos pacotes que devido a interferência na cinética da descarbonetação, e também grãos pequenos em série em um dos lados das amostras que se encontram no pacote, devido ao fator “empacotamento”.

Palavras-chave: Descarbonetação; Perdas magnéticas; Microestrutura; Pacote.

DECARBURIZATION OF ELECTRICAL STEELS IN PACKAGES

Abstract

One of the bigger industrial problems is the electrical steels production in huge amounts in that case these steels are annealed in decarburizing atmosphere close to each other to produce in only one heat treatment a maximum number of sheets. This work aims to study and to discuss that method, because a lot of sheets are prejudiced magneticly for that method. Checked depending on the time of heat treatment got small grains inside sample of middle of sheets package and serial smalls grains in a sample sides that were in package, because of effect “Packetment”.

Key words: Decarburization; Losses magnetics; Microstructure; Package.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; e-mail: ecs1979@hotmail.com*

³ *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*

⁴ *EEIMVR - Universidade Federal Fluminense*

INTRODUÇÃO

Os “aços elétricos” interessam a dois importantes segmentos econômicos onde o Brasil tem engenharia forte, a siderurgia e a indústria da eletricidade. Cerca de 1% do volume total de aço produzido no Brasil anualmente é utilizado por suas propriedades magnéticas (± 7 milhões de toneladas). Aproximadamente 2 milhões de toneladas corresponde a produção de aço tipo 1006.^[1]

Os aços de grão-orientado são utilizados em transformadores. São aços com 3% de silício, produzidos de maneira a induzir uma forte textura cristalográfica do tipo $\{110\}\langle 001\rangle$, ou seja, quase a totalidade dos cristais que compõem a chapa têm seus planos $\{110\}$ paralelos à superfície da chapa, com direção $\langle 001\rangle$ paralela a direção longitudinal da chapa. Nesta condição suas propriedades magnéticas são excelentes, mas apenas em uma direção. No caso de transformadores grandes, onde o circuito magnético pode ser montado sempre alinhando o fluxo magnético na direção longitudinal da chapa, o uso de aços de grão-orientado é a melhor solução.^[2]

Por outro lado, muitas aplicações exigem isotropia de propriedades no plano da chapa, onde o melhor uso é de aços do tipo grão-não-orientado. Essa é uma característica crítica para a aplicação em motores elétricos, que é o principal consumidor de aços elétricos, seguido pelo uso em pequenos transformadores.

Três subfamílias de aços elétricos de grão-não-orientado são utilizadas.

Os aços siliciosos “totalmente processados”, ou seja, prontos para estampagem e uso, entregue pela usina já com baixo carbono e com recozimento final.^[2]

Os aços “semi-processados”, siliciosos ou não, comprados por empresas que fazem o tratamento térmico final em casa e que são preparados para ter grande crescimento de grão nesse recozimento final, onde ocorrerá eliminação das tensões residuais, descarbonetação e recristalização com grande tamanho grão final e que são, em geral, de custo mais baixo.^[2]

As mudanças microestruturais que ocorrem durante o recozimento de um metal a frio acontecem de maneira a diminuir a energia armazenada na deformação. Essa diminuição de energia se dá por mecanismos de rearranjo e eliminação de defeitos cristalinos. As principais mudanças microestruturais que ocorrem durante o recozimento são: (1) reação entre os defeitos puntiformes levando a uma diminuição da quantidade dos mesmos; (2) aniquilação de discordâncias de sinais opostos; (3) rearranjo de discordâncias de modo a formar configurações de menor energia; (4) formação de contornos de alto ângulo; (5) absorção de defeitos puntiformes e discordâncias por contornos de alto ângulo em migração; e (6) redução da área total de contornos de grão.^[3]

Vários fatores têm influência direta nas perdas magnéticas, dentre os quais composição química, tamanho de grão, textura, partículas de segunda fase e discordâncias. As perdas energéticas presentes nos motores devem-se principalmente a três fontes importantes: às perdas magnéticas nas lâminas, às perdas no cobre e às perdas mecânicas devidas ao atrito. Uma das melhores formas de reduzir o consumo de energia elétrica é diminuindo as perdas magnéticas nas chapas de aço.^[4]

Os contornos de grão são centros de ancoramento para o movimento dos domínios magnéticos. Mager propôs um modelo que faz uma correlação entre tamanho de grão e campo coercivo, levando em consideração que os contornos são centros de ancoramento das paredes de domínio. Quanto menor o tamanho de grão, maiores as perdas.^[5]

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado foi um aço semi-processado pré-deformado cedido pela empresa Fitas Metálicas fabricado pela Cosipa, sendo o aço do tipo “Cos Core 550” com a seguinte composição química: 0,06%C-0,40%Mn-0,34%Si-0,05%Cr-0,014%P-0,01%Ni-0,005%Al-0,006%S. Em relação ao último passe, ou seja, o Skin pass é de 4 a 6% laminado convencionalmente. Este aço entregue em lâminas com a espessura de $\pm 0,6$ mm, 30mm de largura e 300mm de comprimento em lâminas transversais e longitudinais, porém só foram analisadas as lâminas longitudinais. Para o tratamento essas lâminas foram cortadas ao meio, ou seja, comprimento de 150mm. seis tratamentos foram realizados variando-se o tempo e o ponto de orvalho, sendo a temperatura de patamar igual a 760°C para todos os tratamentos térmicos, já que esta é temperatura mais usual a nível de indústria, sendo estes nomeados com os números que são utilizados no IPT, “7600” é a amostra sem sofrer tratamento térmico. Foram utilizados dois pontos de orvalho, 15 e 25°C, seus correspondentes respectivamente em razão P_{H_2O}/P_{H_2} são 0,17 e 0,31. Os tempos utilizados foram 10, 20 e 60 minutos. Em cada experimento há quatro lâminas, uma encontra-se sozinha (denominada **solitária**) e as outras três lâminas encontram-se fixas umas às outras através de parafusos.

O forno utilizado foi um forno elétrico da marca Lindberg especialmente adaptado para trabalho em regime descarbonetante, no qual se pode realizar tratamentos térmicos com ou sem umidade. Sendo este forno apropriado para suportar os gases N_2 e H_2 . Mediu-se o ponto de orvalho através do método do espelho, considera-se que este varia $\pm 2^\circ C$. Os gases são forçados a passar em um recipiente contendo água somente durante o tempo que o forno se mantém na temperatura de patamar, 760°C. Ou seja, a descarbonetação ocorre somente na temperatura e no tempo de patamar.

A curva tempo x temperatura dos tratamentos térmicos e as atmosferas utilizadas em cada etapa é a seguinte:

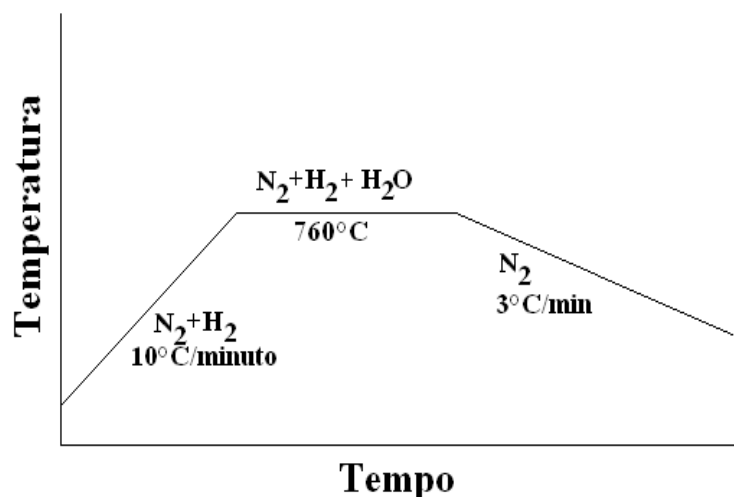


Figura 1-Gráfico térmico dos tratamentos térmicos utilizados

Após a realização da purga com nitrogênio somente, o material é aquecido a uma taxa de 10°C/minuto até 760°C em atmosfera contendo 90%N₂ e 10%H₂. Atingida a temperatura de patamar, os gases (N₂ e H₂) são forçados a passar em um recipiente contendo água, de modo que esta seja arrastada para o interior do forno.

Passado o tempo de patamar para cada tratamento, o forno resfria a uma taxa de 3°C/minuto.

As medidas magnéticas foram feitas através de um ensaio de única lâmina, em um medidor de lâmina de aço elétrico “SOKEN”, instalado no Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo (IPT). Este é um instrumento utilizado para fazer medidas de perdas magnéticas e campo magnético utilizando um única lâmina.

A microscopia ótica e o tratamento térmico foram realizados ambos no IPT, o ataque químico foi realizado utilizando-se Nital a 5%. As micrografias correspondem a microestrutura do material na longitudinal e também em toda espessura da lâmina. As fotos foram tiradas utilizando-se um microscópio ótico metalográfico. Todas as fotos foram feito com aumento de 100x, exceto a primeira foto, ou seja, do material não recozido.

As micrografias estão nomeadas conforme as posições que as lâminas estavam dispostas no interior do forno:

- a lâmina que se encontra isolada será chamada de “**solitária**”;
- a lâmina que se encontra na parte acima da lâmina “**solitária**” será chamada de “**superior**”;
- a lâmina que se encontra no meio do pacote será chamada de “**intermediária**”;
- a lâmina que se encontra na parte debaixo da lâmina “**intermediária**”, será chamada de “**inferior**”.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O material entregue inicialmente pela Fitas Metálicas possuía esta seguinte microestrutura [7600]:

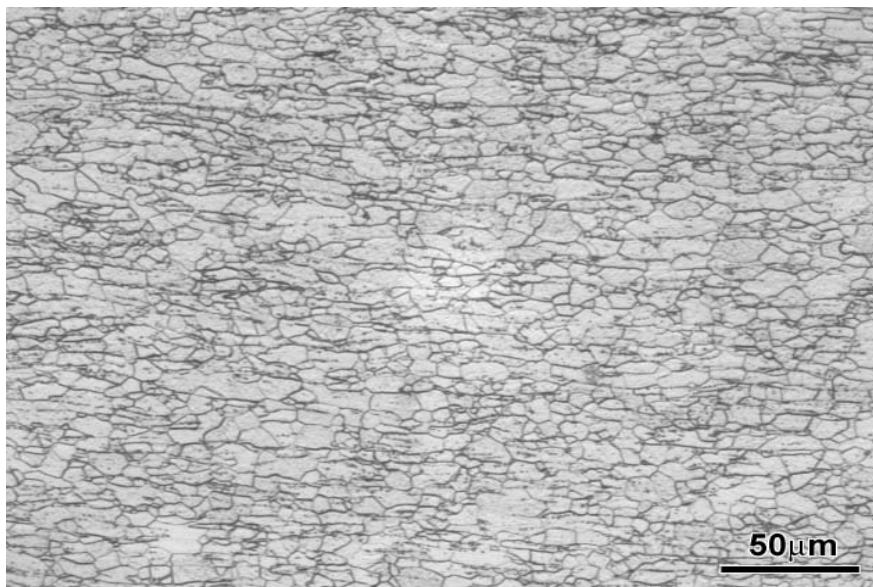


Figura 2-Micrografia do material cedido sem tratamento térmico

Este é um aço fabricado pela Cosipa do tipo “Cos Core 550”.

Abaixo se encontra uma tabela na qual os tratamentos térmicos estão classificados pela seguinte numeração está abaixo:

Tabela 1- Numeração dos tratamentos

	15°C	25°C
10'	7650	7669
20'	7601	7603
60'	7604	7602

A numeração mostrada no trabalho é mesma utilizada no IPT.

Quando foi realizado o tratamento térmico a 15°C de ponto de orvalho e tempo de 10 minutos, obteve se as seguintes micrografias [7650]:

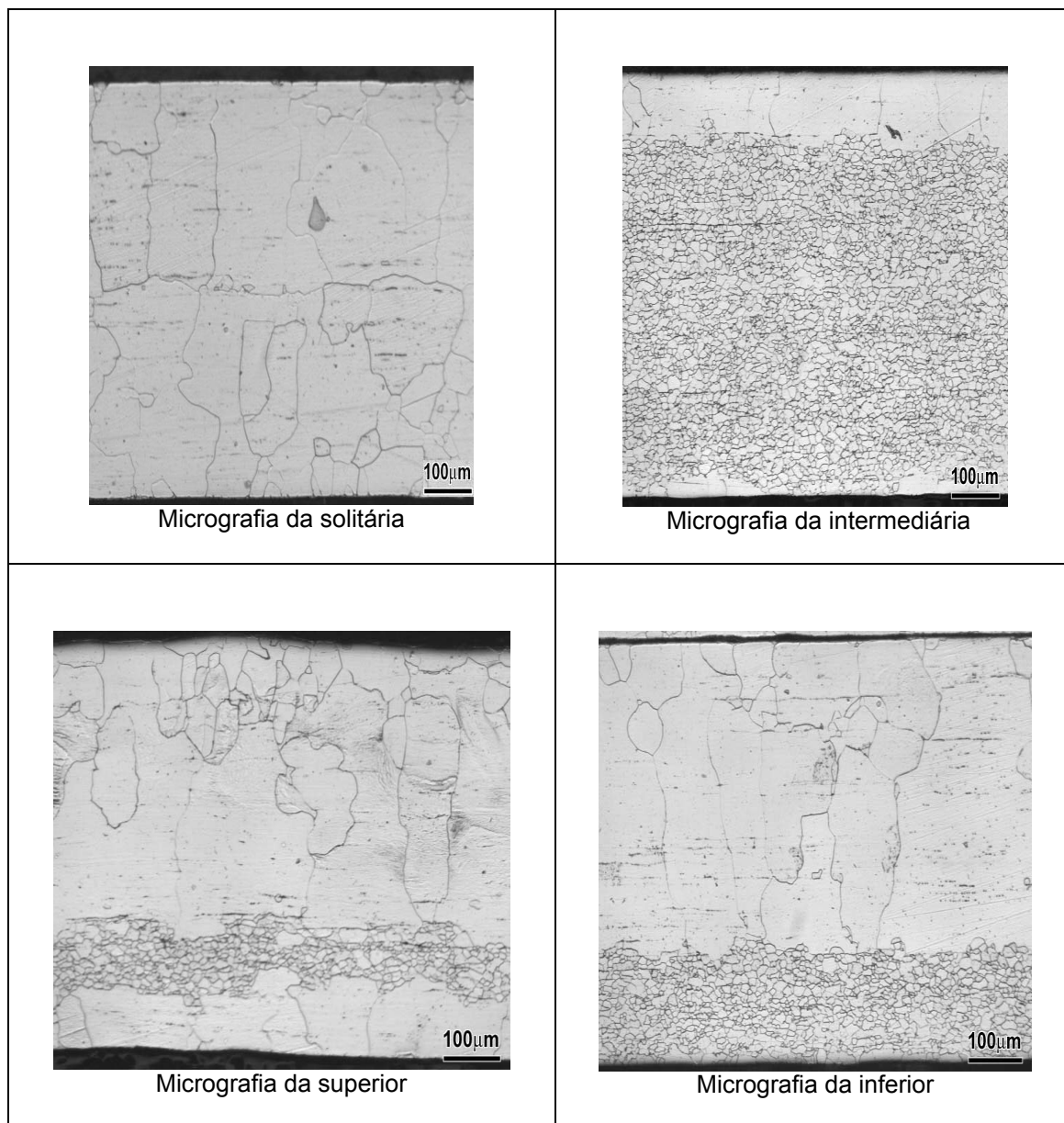


Figura 3- Micros dos tratamentos com as posições que as lâminas se encontravam no ensaio.

Verifica-se que a lâmina solitária é a única lâmina que descarbonetou completamente (os grãos cresceram ao longo de toda a espessura da amostra), portanto o empacotamento das lâminas influenciou de algum modo a cinética da descarbonetação das lâminas, diminuindo esta nos lados das lâminas que estão em

contato. Isto pode ser visto claramente na figura 5, um dos lados praticamente não houve descarbonetação, já que o grão cresce, ou recristaliza mais em um ambiente descarbonetante favorável.

A seguir será mostrado o tratamento no qual se manteve constante o ponto de orvalho (15°C) e duplicou-se o tempo de recozimento, para 20 minutos [7601]:

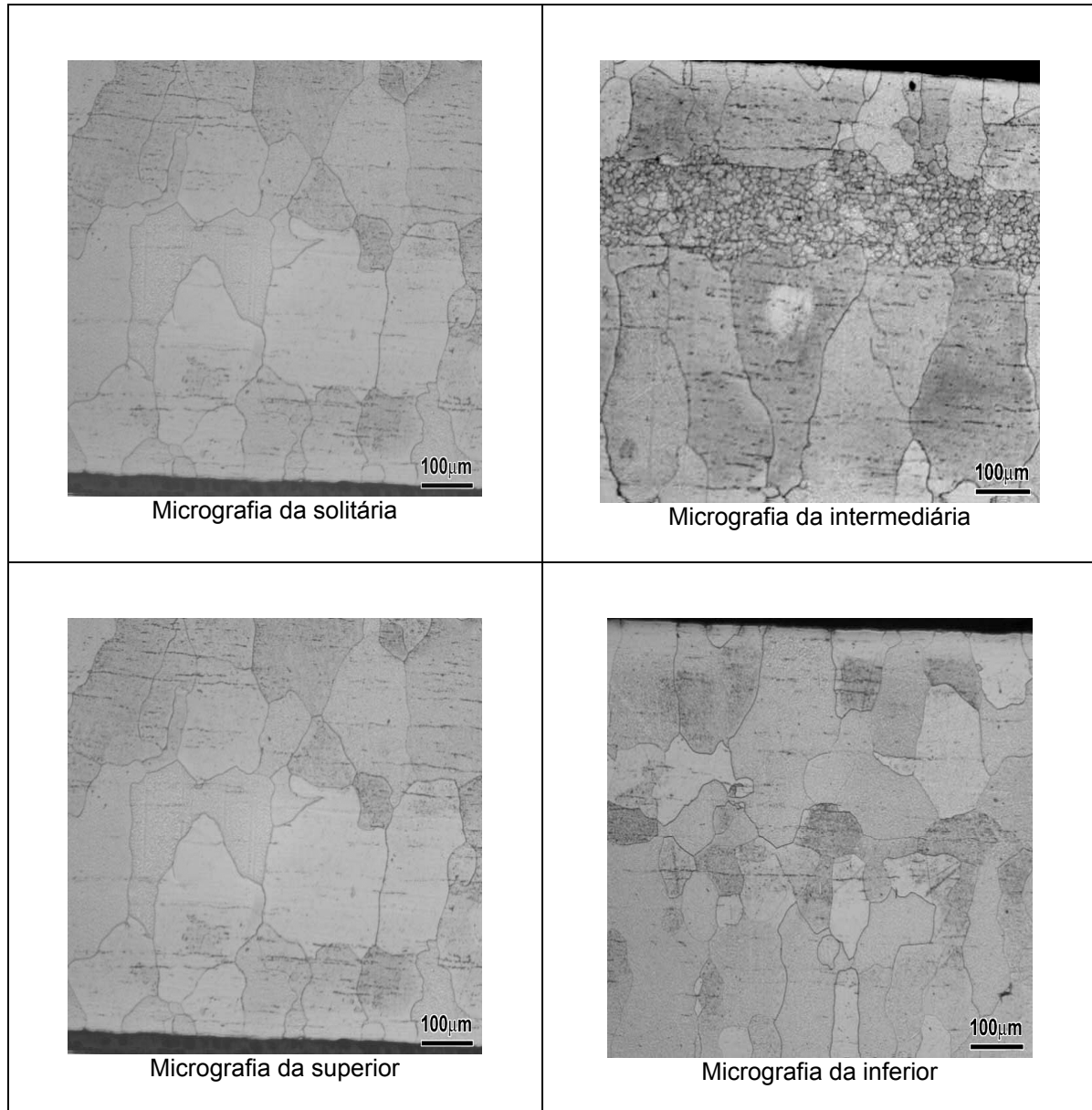


Figura 4- Micros dos tratamentos com as posições que as lâminas se encontravam no ensaio

Agora serão mostradas as micrografias dos tratamentos térmicos a 15°C com 60 minutos de tempo de recozimento [7604]:

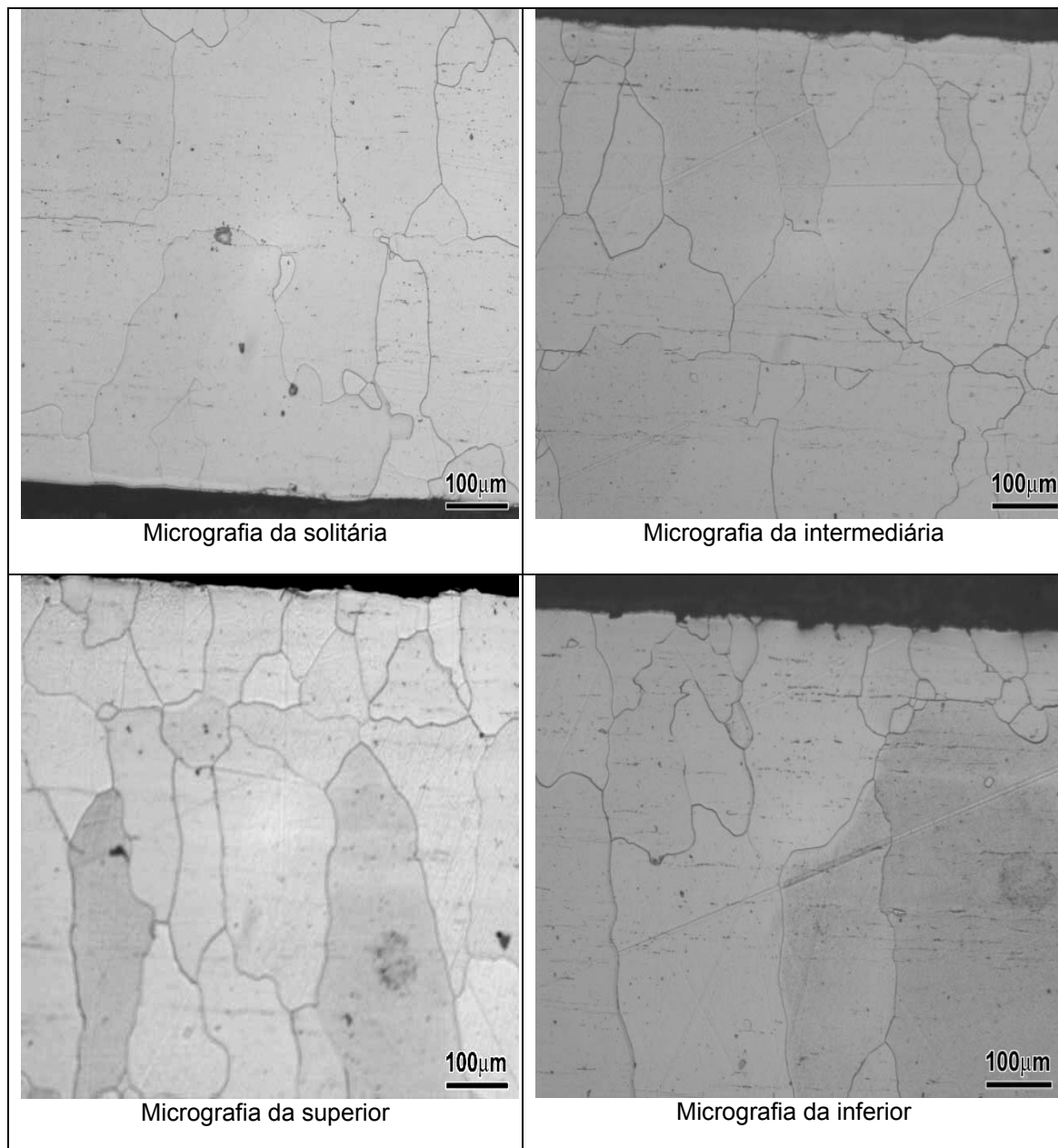
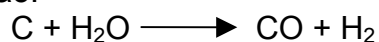


Figura 5- Micros dos tratamentos com as posições que as lâminas se encontravam no ensaio

Verifica-se que houve uma descarbonetação favorável em todas as lâminas, excepcionalmente na lâmina intermediária, e formação de grãos colunares. É notável o fato de que os grãos recristalizam-se menos devido ao contato entre as lâminas, sendo isto devido a questões de cinética, já que o empacotamento impede que o carbono seja retirado da mesma maneira em ambos os lados da lâmina e também se restringe a dispersão do monóxido de carbono formado pela reação de descarbonetação que forma uma camada limite, que pode ser uma das prováveis etapas lentas da descarbonetação.^[6]



Já que na lâmina a qual se encontra de maneira isolada a recristalização ocorreu normalmente em toda a seção.

Quando foi realizado o tratamento térmico a 25°C de ponto de orvalho e tempo de 10 minutos, obteve-se as seguintes micrografias [7669]:

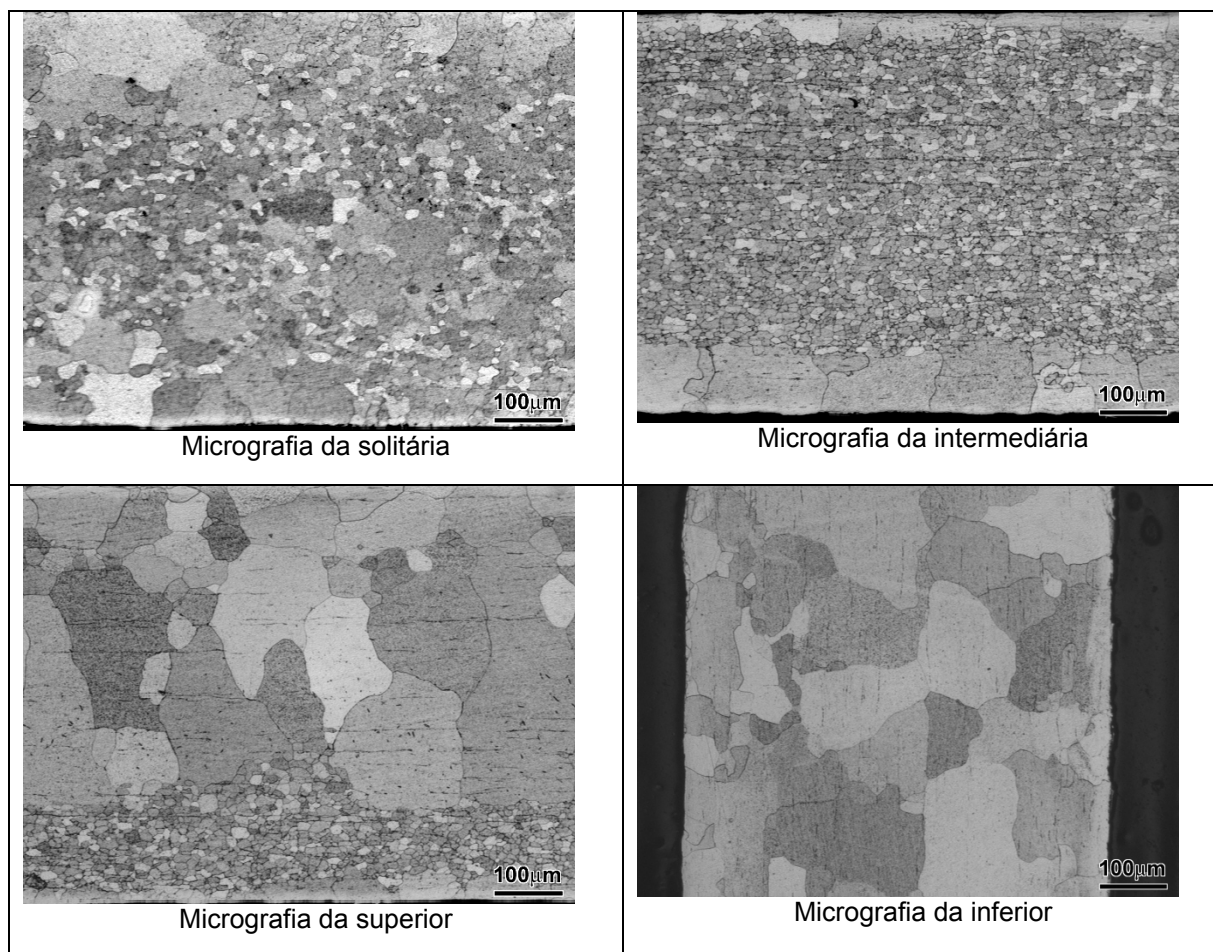


Figura 6- Micros dos tratamentos com as posições que as lâminas se encontravam no ensaio

Verifica-se que a lâmina inferior teve um comportamento anormal, mesmo em relação a lâmina solitária, pois nesta os grãos aparecem bastante heterogêneos enquanto naquela os grãos cresceram homogeneamente, verifica-se uma certa homogeneidade na micrografia da lâmina superior, o que não ocorreu e deveria ocorrer na lâmina solitária, pois esta encontra-se sozinha e a ação descarbonetante ocorre de maneira igual em ambos lados da lâmina.

O efeito “empacotamento” está muito claro demonstrado na lâmina intermediária, pois nota-se que somente no lado o qual ficou próximo da lâmina inferior houve recristalização. Enquanto no resto da amostra praticamente não houve recristalização, já que há somente a presença de grãos pequenos.

Agora o tratamento foi realizado a 25°C de ponto de orvalho e tempo de 20 minutos [7603]:

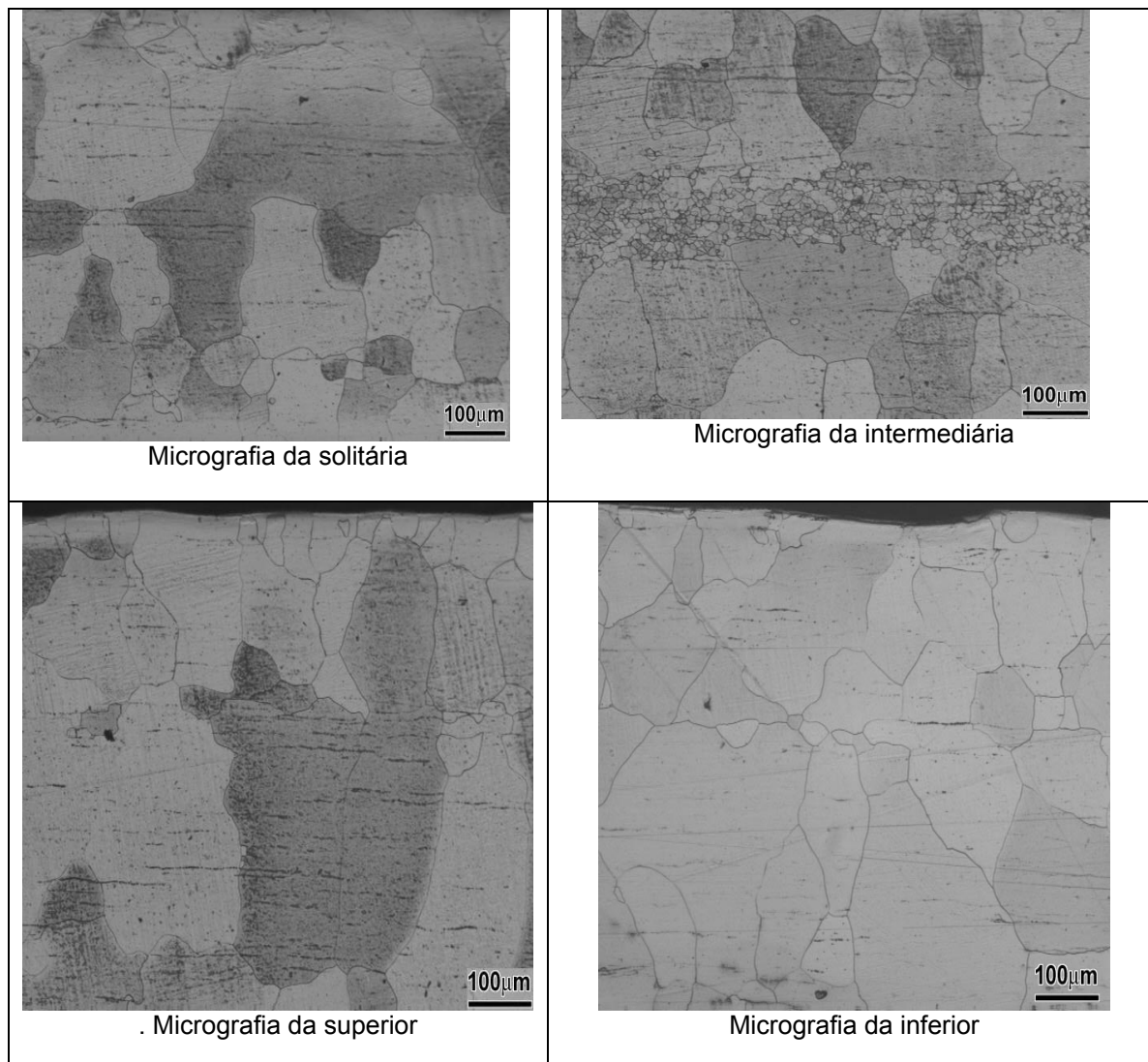


Figura 7- Micros dos tratamentos com as posições que as lâminas se encontravam no ensaio

Verifica-se que houve uma recristalização favorável em ambos os lados, no entanto não suficiente para formar grãos colunares, percebe-se que a lâmina mais afetada é a lâmina “intermediária”, ou seja, a lâmina que se encontra no meio do pacote. E notam-se grãos “médios” nas extremidades das lâminas “superior” e “inferior”, as quais devido ao empacotamento se encontram em contato com a “intermediária”. E grãos mais longos do lado contrário ao lado de contato. Demonstrando a ação do empacotamento sobre a cinética de recristalização do material.

Veja as micrografias dos tratamentos térmicos a 25°C com 60 minutos de tempo de recozimento [7602]:

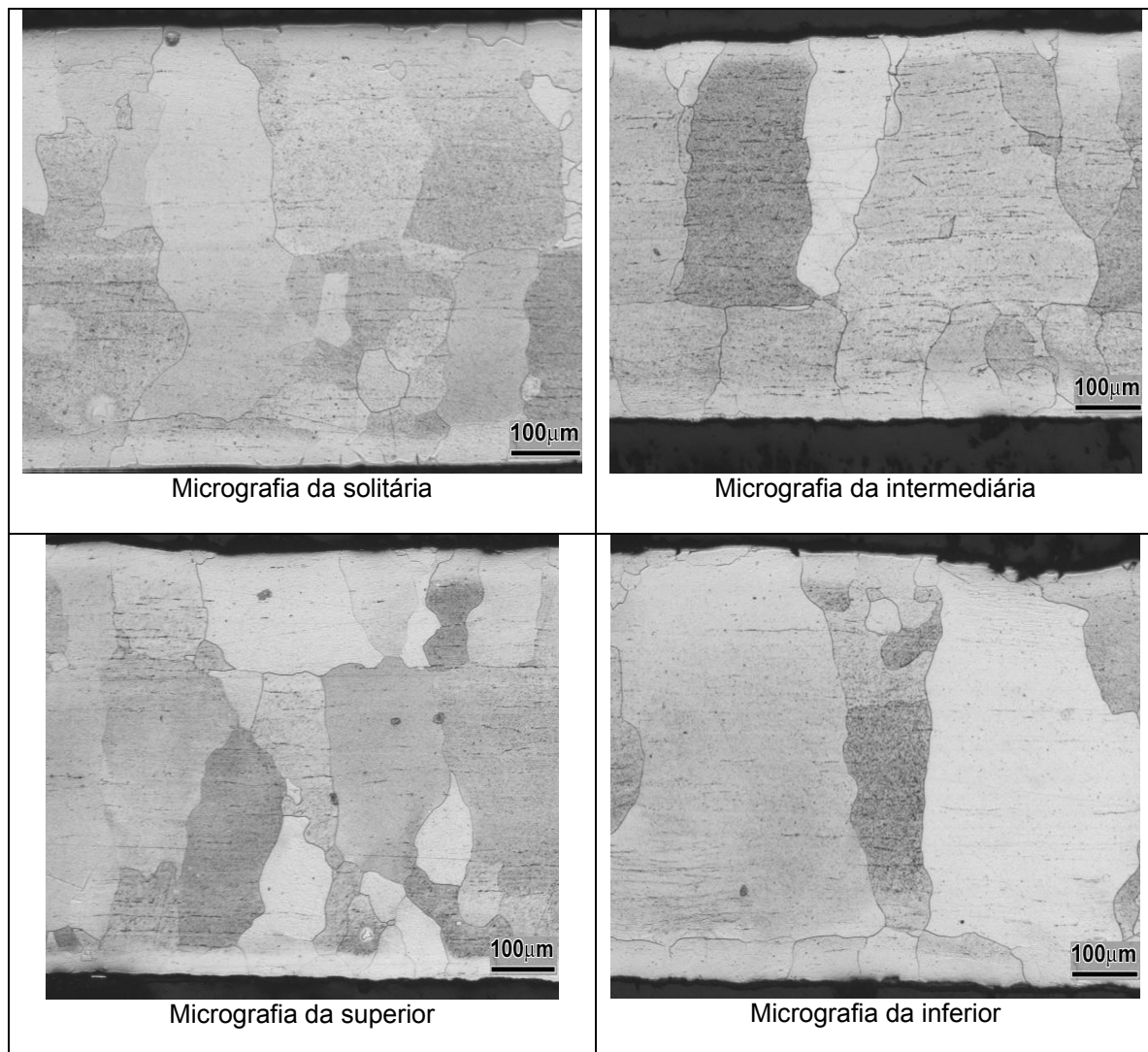


Figura 8- Micros dos tratamentos com as posições que as lâminas se encontravam no ensaio

Já com 60 minutos de recozimento verificou-se uma recristalização completa, mas um dos lados sempre crescia mais que o outro, certamente devido ao fator do contato das lâminas empacotadas já que a lâmina solitária demonstra em todos os casos. Verifica-se também que neste caso os grãos estão mais longos se comparado ao tratamento realizado no mesmo tempo (60 minutos), no entanto, com ponto de orvalho menor.

Abaixo se encontram os valores obtidos para perdas magnéticas a 1,0 e 1,5T em função da posição que as lâminas se encontravam no interior do forno, a unidade de perdas magnéticas é W/Kg.

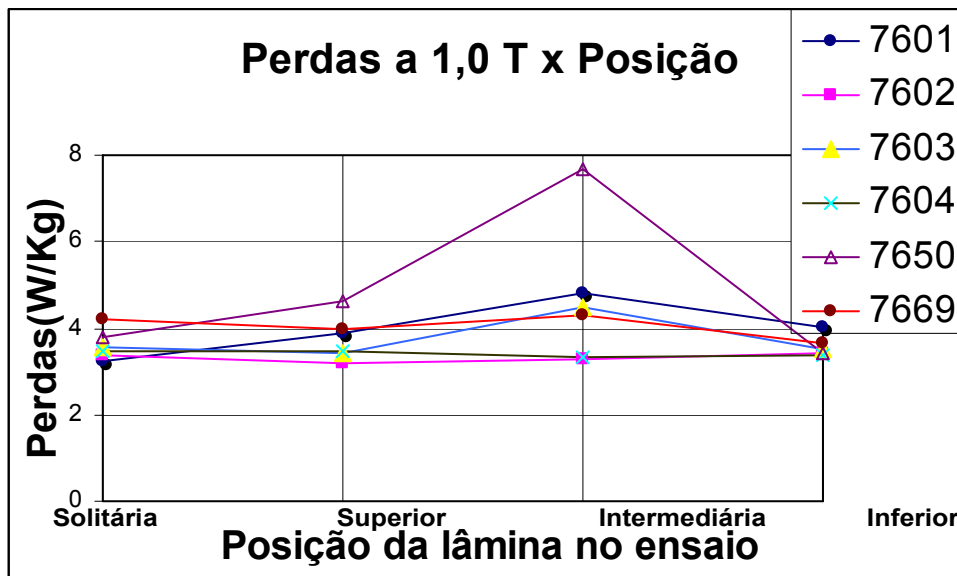


Figura 9- Gráfico de perdas magnéticas das lâminas conforme sua localização em cada ensaio

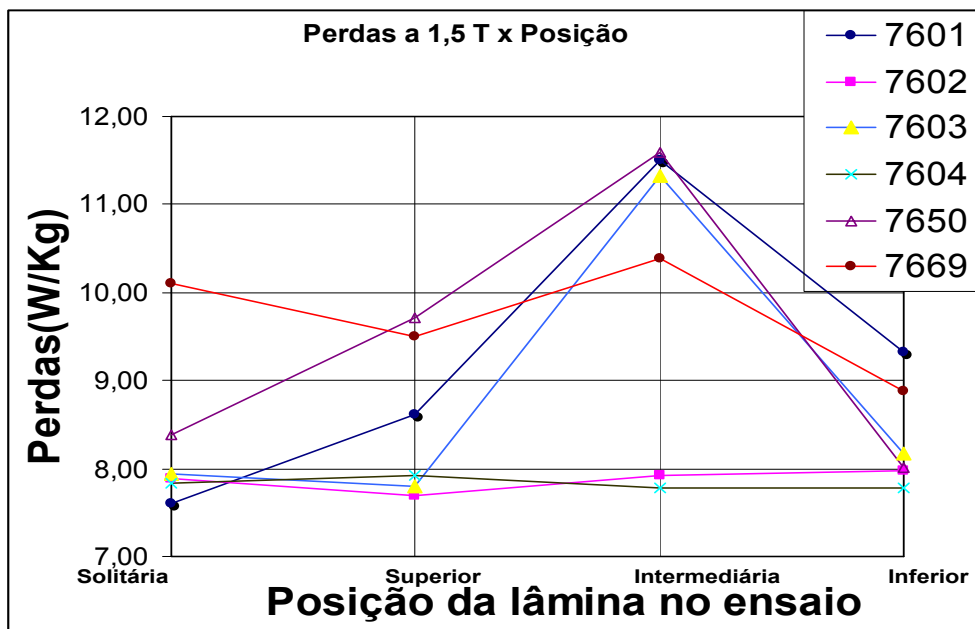


Figura 10- Gráfico de perdas magnéticas das lâminas conforme sua localização em cada ensaio

Comparando cada tratamento isoladamente, verifica-se que nas amostras 7650, 7669, 7601 e 7602, as lâminas intermediárias possuem as maiores perdas magnéticas em relação às outras. Isto se deve certamente a quantidade grande de grãos pequenos que estão presentes no material, pois os contornos de grãos presentes em maiores quantidades nestas amostras interferem na magnetização do material. Sendo isto visto nas micrografias. No caso das amostras 7602 e 7604, onde todas as amostras possuem homogeneidade nos tamanhos dos grãos (veja as micros), percebe-se uma semelhança entre os valores para perdas. Seus dados são quase uma reta.

Nota-se que mesmo a tempos baixos, como 20 minutos, obteve-se valores de perdas próximos aos valores obtidos para 60 minutos.

Esse gráfico demonstra que a lâmina intermediária possui maiores perdas nos experimentos realizados abaixo de uma hora, sendo isto explicado através das microestruturas resultante do recozimento descarbonetante já comentado.

CONCLUSÃO

Foi demonstrado que o empacotamento tem grande influência na descarbonetação de aços e conseqüentemente no crescimento do grão. O empacotamento varia cinética do processo tornando a camada de monóxido de carbono, que se forma entre as lâminas, como fator importante a ser analisado.

Nota-se que em relação às propriedades magnéticas, estas variam bastante em relação à microestrutura do material e que uma descarbonetação favorável é necessária para que as propriedades magnéticas sejam ótimas.

Conclui-se que o tamanho de grão deve-se ao processo descarbonetação do forno, o qual utilizado para o trabalho demonstrou muita competência. Já que mesmo a 10 minutos houve uma favorável descarbonetação. No entanto, em relação as perdas através dos dados, conclui-se que é possível obter as perdas correspondentes a um tratamento de 1 hora em um tempo menor, dependendo logicamente da capacidade descarbonetante do forno utilizado.

Agradecimentos

Ao prof.Landgraf e ao Nicolau Apoena Castro pela ajuda em diversos conteúdos do trabalho.

Ao IPT que forneceu toda a parte instrumental e física necessária para a realização deste.

REFERÊNCIAS

- 1 Landgraf,F.J.G. "**A evolução do mercado dos materiais magnéticos no Brasil**".M & M-Metalurgia e Materiais vol. 55,p.624-624,1999.
- 2 Landgraf, F.J.G "**Propriedades Magnéticas de Aços para fins elétricos**". Aços: perspectivas para os próximos 10 anos,p109-126,Rio de Janeiro,2002.
- 3 Padilha,A.F. "**Encruamento, recristalização,crescimento de grão e textura**",p.29.3ed. ABM, São Paulo, 2005.
- 4 Melquiades,S.R. "**Efeito do carbono no crescimento anormal de grãos e nas perdas magnéticas em aços elétricos**".EPUSP.
- 5 Mager,A. "**About the influence of Grain Size on the Coercivity**" Ann Physics Leipzig,p11-15(1952)
- 6 Marra,K.M. "**Decarburization kinetics during annealing of ao semi-processed electrical steel**".ISSJ Internatioanl,vol.44,n.3,pp618-622,2004