



INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO E DO ENVELHECIMENTO MAGNÉTICO EM LAMELAS DE DIFERENTES TIPOS DE AÇO ELÉTRICO¹

Mariana Corrêa Assis²
 Nilza Cristina Sabioni Boechat Zwirman³
 Bárbara Oliveira Monteiro⁴
 Júlio César Lopes da Silva⁵
 Renata Cristina Lentini Nascimento⁶
 Guilherme Maximiliano Reichert Negri⁷
 Alex Bruno Batista⁸

Resumo

O trabalho tem a finalidade de conhecer o desempenho de três diferentes aços elétricos, visando subsidiar ajustes das condições de processamento industriais em fabricante de equipamento elétrico. Foram selecionados três aços de grão não-orientado, sendo dois semiprocessados e um totalmente processado. Foi realizado tratamento térmico a seco e a úmido e, posteriormente, as amostras tratadas foram envelhecidas em três temperaturas, por 25 horas. Analisou-se a vida útil dos aços em relação aos diferentes tipos de tratamento.

Palavras-chave: Aços elétricos; Tratamento térmico a úmido; Tratamento térmico a seco; Envelhecimento magnético.

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT AND MAGNETIC AGING IN LAMELLAE OF DIFFERENT TYPES OF ELECTRICAL STEEL

Abstract

The work aim is to understand the performance of three different steels, to support adjustments at processing conditions in industrial electrical equipment manufacturer. We selected three non-oriented grain steels, two semi-processed, and one fully processed. There was the heat treatment for dry and wet atmospheres. Subsequently, the treated samples were aged at three temperatures for 25 hours. We analyzed the life of steels in relation to different types of treatment.

Key words: Electrical steel; Heat treatment for dry; Heat treatment for wet; Magnetic aging.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Estagiária de Engenharia Metalúrgica, Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional.

³ Engenheira Metalúrgica, Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional.

⁴ Engenheira Química, Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional.

⁵ Técnico de Desenvolvimento, Laboratório de Tratamentos Térmicos do Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional.

⁶ Engenheira de Vendas, Companhia Siderúrgica Nacional.

⁷ Engenheiro Eletricista Especialista de Produtos do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Embraco.

⁸ Especialista da Garantia da Qualidade de Fornecedores da Embraco.

1 INTRODUÇÃO

Aços elétricos movimentam dois segmentos econômicos no Brasil, a siderurgia e a indústria de equipamentos elétricos. Sendo uma interface de duas fortes engenharias, muitos estudos são gerados a respeito do tema que relaciona propriedades magnéticas dos aços e desempenho dos motores elétricos, principalmente com a crescente necessidade de redução do consumo de energia elétrica mundial.

Em motores e transformadores são utilizados aços semi e totalmente processados. Os semiprocessados são aqueles que necessitam de tratamento térmico nos consumidores para o desenvolvimento das propriedades magnéticas, visando principalmente diminuição das tensões residuais, crescimento de grão, formação de uma camada de óxido isolante e redução do teor de carbono. Já os aços totalmente processados, são aqueles com alto teor de silício, fornecidos pela usina com baixo teor de carbono e com recozimento final, estando prontos para utilização pelos fabricantes de equipamentos elétricos. Apesar disto, alguns fabricantes costumam tratar aços totalmente processados visando, entre outras coisas, recuperar as características elétricas e aliviar as tensões residuais causadas durante a estampagem das lamelas. Visando o conhecimento das propriedades e desempenho destes aços, com enfoque no envelhecimento magnético, selecionaram-se dois aços semiprocessados e um totalmente processado.

O consumidor, fabricante de motores, necessitava conhecer os aços em duas situações, tratados termicamente a seco e a úmido, objetivando uma melhoria das propriedades. Durante o tratamento térmico, a redução do teor de carbono é fundamental para as propriedades magnéticas, pois promove queda da perda no núcleo e eleva a permeabilidade, além de influenciar no envelhecimento magnético.⁽¹⁾ Atmosferas úmidas promovem maior nível descarbonetação se comparadas com atmosferas secas. A descarbonetação ocorre na superfície do aço e se dá, principalmente, pela reação do vapor d água da atmosfera com o carbono adsorvido na matriz metálica. O vapor adsorvido na superfície oxida tanto o carbono, que difunde do interior para a superfície da chapa, quanto o ferro.⁽²⁾ Em atmosferas secas, a descarbonetação ocorre principalmente devido à formação de hidrocarbonetos.

O envelhecimento magnético tem origem nas partículas finas de segunda fase presentes na matriz dos aços. Estas partículas são prejudiciais ao processo de magnetização por funcionar como obstáculos à movimentação dos domínios magnéticos, elevando a dissipação da energia magnética.^(3,4)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 apresenta as características dos três aços utilizados neste trabalho.

Tabela 1. Características dos aços utilizados. 09/08/2010

Aço	Tipo	Espessura	C	Mn [%]	Si [%]	Revestimento
Aço 1	semiprocessado	0,60 mm	40	0,16	0,25	sem
Aço 2	semiprocessado	0,60 mm	491	0,40	0,30	sem
Aço 3	Totalmente processado	0,50 mm	110	0,38	0,70	fosfatizado

Estes materiais foram estampados na forma de lamelas (280 mm x 30 mm), tanto no sentido longitudinal quanto transversal à direção de laminação, e tratados termicamente. Foram montados dois pacotes de cada aço, para serem tratados em duas situações: no processo a úmido, ou descarbonetante, e no processo a seco. A Figura 1 e Figura 2 mostram, esquematicamente, os ciclos de tratamentos térmicos empregados.⁽²⁾ No tratamento térmico à úmido, a temperatura de encharque foi de 770°C durante 2 horas em uma atmosfera de hidrogênio a 90% e nitrogênio 10%, com um ponto de orvalho de 22°C. Para o tratamento térmico a seco, a temperatura de encharque foi de 810°C, também durante 2 horas com atmosfera de hidrogênio e nitrogênio, porém sem atmosfera descarbonetante.

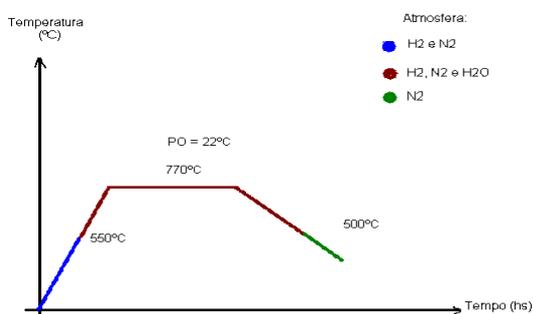


Figura 1. Ciclo Térmico a Úmido.

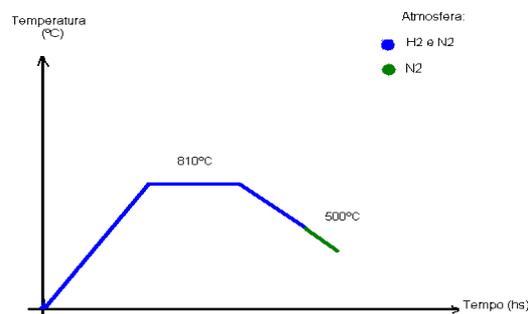


Figura 2. Ciclo Térmico à Seco.



Figura 3. Forno de tratamento térmico.

A Figura 3 apresenta o aspecto externo do forno de tratamentos térmicos, que permite o uso de atmosfera descarbonetante ou não, com um sistema de controle e medição da umidificação e temperatura, onde foram realizados os tratamentos térmicos relatados neste trabalho.

Foram realizadas análises de composição química, magnéticas e metalográficas, de todos os pacotes de lamelas, antes e após cada tratamento térmico, analisando a lamela da extremidade e do centro do pacote, a fim de verificar qualquer variação ou influência do processo. Com o objetivo de verificar o nível de descarbonetação em função do tratamento, medições do teor de carbono foram realizadas em cada material, sendo tomada a média de três resultados individuais. Foi utilizado um equipamento tipo Leco, modelo CS 444 e TC 436.

Para determinação do teor de fósforo, silício e alumínio, também foi tomada a média de três resultados individuais. Para isto, um equipamento a plasma, modelo Spectro Spectrum One, foi utilizado.

A perda magnética e a permeabilidade foram medidas através de um Quadro de Epstein, fornecido pela Brockhaus Messtechnik, modelo MPG100D, utilizando indução de 1T em frequência de 60Hz.

Todas as amostras foram analisadas em um microscópio óptico Zeiss Axiotho, previamente polidas e atacadas com Nital 3%, onde se obteve tamanho de grão (norma ASTM E112⁽⁵⁾), microscopia e metalografia.

Posteriormente, as amostras tratadas a seco e a úmido foram divididas em grupos e submetidas ao tratamento de envelhecimento magnético, para análise do comportamento de cada aço tratado em três temperaturas de trabalho, 190°C, 210°C e 230°C, por 25 horas.

O procedimento consistiu em aquecer as amostras, em um forno tipo mufla até a temperatura de trabalho (190°, 210° ou 230°C), mantê-las nesta temperatura por 5 horas e em seguida resfriá-las até a temperatura ambiente. Este ciclo foi repetido com cada material em cada temperatura por cinco vezes, até que completasse um tempo total de tratamento de 25 horas. A Figura 4 ilustra a combinação de tempo, temperatura e tipo de tratamento utilizado no estudo.

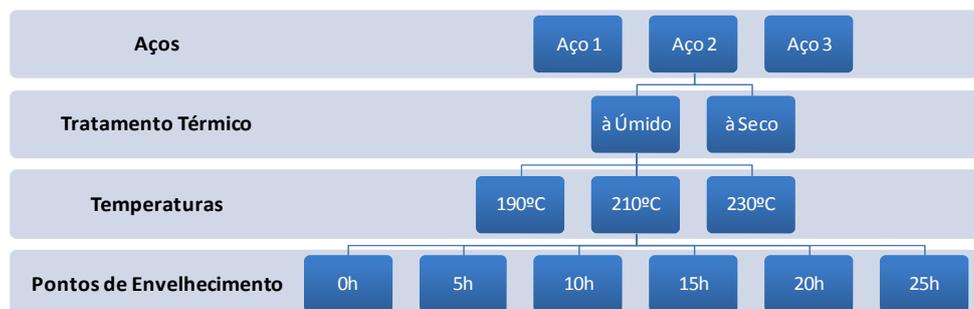


Figura 4. Ciclo de envelhecimento.

Nesta etapa avaliaram-se as características magnéticas, através de um módulo *single-sheet measuring coil*, utilizado em uma bancada Brockhaus Messtechnik, modelo MPG100D, visto que conforme IEC 60404-3,⁽⁶⁾ um dispositivo *single-sheet tester* pode ser utilizado como uma forma rápida e confiável de avaliar a perda total em lâminas de aço elétrico.^(7,8) Determinou-se a perda magnética e a permeabilidade com induções de 1T em frequência de 60Hz.

3 RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta as variações do teor de carbono nos aços 1, 2 e 3 antes e depois dos tratamentos térmicos, e em relação à posição da lamela no pacote, extremidade e centro.

Tabela 2. Variação do teor de carbono nas amostras analisadas. (TTS - Tratamento Térmico à Seco e TTU - Tratamento Térmico a Úmido). 09/08/2010

Identificação	Descrição	Análise Química		
		CARBONO [ppm]		
		Antes	TTS	TTU
Aço 1 (0,16%Mn0,25%Si)	Extremidade	40	20	31
	Centro		38	20
Aço 2 (0,4%Mn0,3%Si)	Extremidade	491	328	27
	Centro		330	27
Aço 3 (0,38%Mn0,7%Si)	Extremidade	110	35	43
	Centro		37	41

A Figura 5 mostra os resultados comparativos dos níveis de carbono nas amostras centrais do pacote de lamelas dos aços 1, 2 e 3, em relação a cada tratamento.

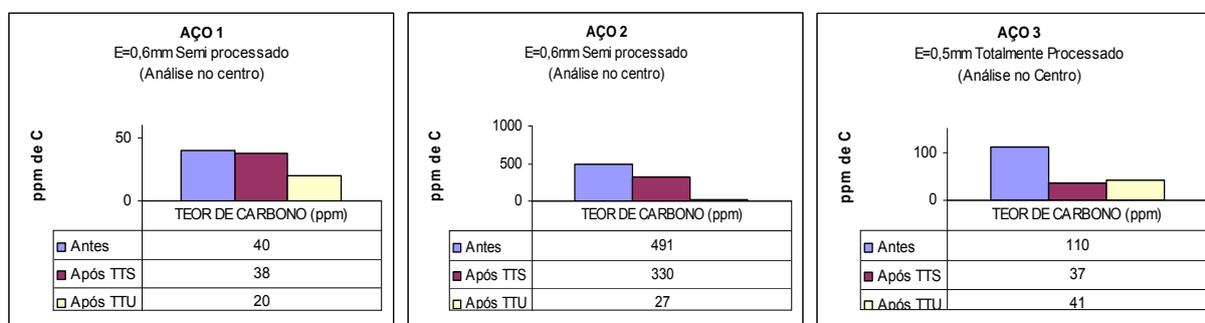


Figura 5. Gráficos Comparativos dos teores de carbono do Aço 1, 2 e 3, em relação aos tratamentos térmicos sofridos.

A Tabela 3 apresenta as variações do teor de silício, alumínio e fósforo, dos aços 1, 2 e 3, antes e depois dos tratamentos térmicos, e em relação à posição da lamela, extremidade e centro.

Tabela 3. Variação do teor de Silício, Alumínio e Fósforo, nas amostras analisadas. 09/08/2010

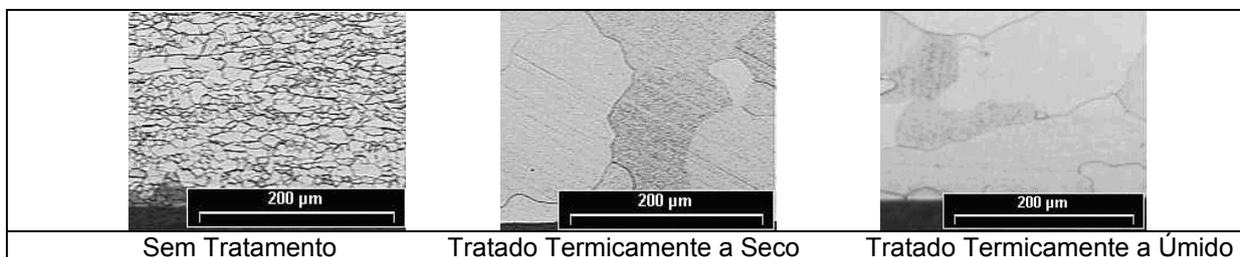
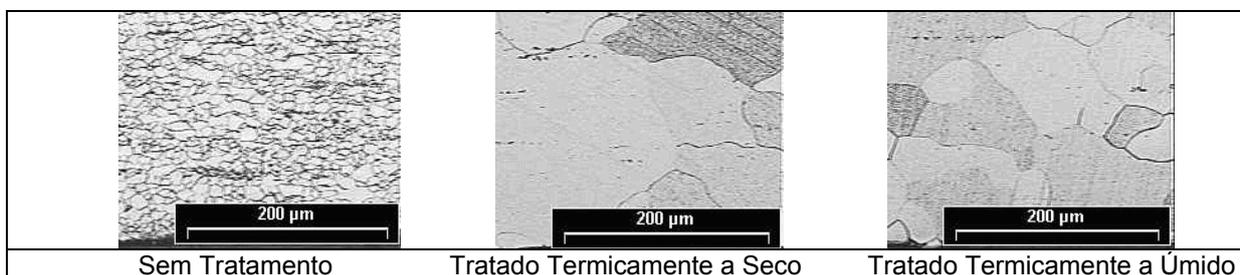
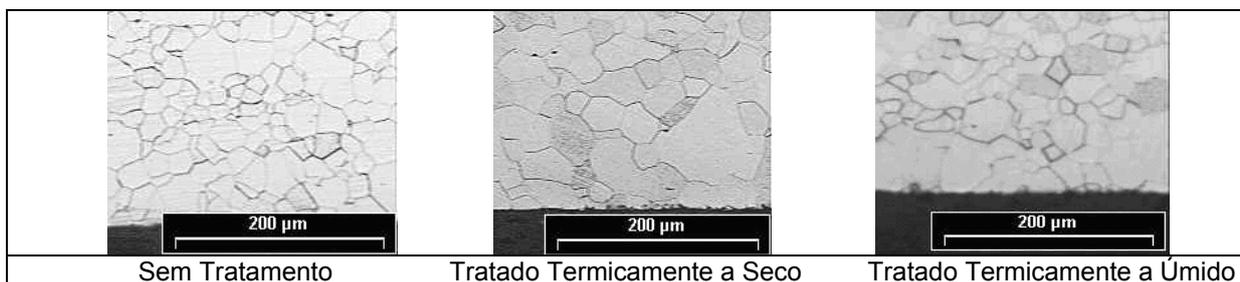
Identificação	Descrição	Análise Química			Análise Química			Análise Química		
		SILÍCIO [ppm]			ALUMÍNIO [ppm]			FÓSFORO [ppm]		
		Antes	TTS	TTU	Antes	TTS	TTU	Antes	TTS	TTU
Aço 1 (0,16%Mn0,25%Si)	Extremidade	2570	2600	2570	350	350	330	350	350	330
	Centro		2250	2450		300	310		300	310
Aço 2 (0,4%Mn0,3%Si)	Extremidade	2910	3000	2900	170	180	160	170	180	160
	Centro		2740	2980		160	160		160	160
Aço 3 (0,38%Mn0,7%Si)	Extremidade	6980	5600	6920	40	40	40	40	40	40
	Centro		6620	6950		40	40		40	40

A Tabela 4 indica o tamanho de grão dos aços antes e após os tratamentos térmicos.

Tabela 4. Tamanho de Grão nas amostras analisadas em cada tratamento. 09/08/2010

Especificação	Antes	Após TTU		Após TTS	
		Grão Grande	Grão Pequeno	Grão Grande	Grão Pequeno
Aço 1 (0,16%Mn0,25%Si)	8	262	46	220	55
Aço 2 (0,4%Mn0,3%Si)	7	131	28	185	28
Aço 3 (0,38%Mn0,7%Si)	14	19	19	156	28

As Figuras 6, 7 e 8 mostram respectivamente, as microscopias das amostras dos aços 1, 2 e 3, em cada situação de tratamento térmico, revelando em todos os casos, uma microestrutura formada por grãos ferríticos associados à cementita globular fina dispersa na matriz.

**Figura 6.** Fotomicrografia do Aço 1 (aumento de 100x).**Figura 7.** Fotomicrografia do Aço 2 (aumento de 100x).**Figura 8.** Fotomicrografia do Aço 3 (aumento de 100x).

A Tabela 5 mostra os resultados do Ensaio de Epstein dos aços 1, 2 e 3 em cada situação de tratamento.

Tabela 5. Perda e Permeabilidade Magnética dos Aços 1, 2 e 3, analisados em cada tratamento.
09/08/2010

Identificação	1T/60Hz	ANTES	TTU	TTS
Aço 1 (0,16%Mn0,25%Si)	Perda W/Kg	8,37	3,34	3,11
	Permeabilidade	1308	5097	5648
Aço 2 (0,4%Mn0,3%Si)	Perda W/Kg	9,40	3,65	4,14
	Permeabilidade	1079	4450	3272
Aço 3 (0,38%Mn0,7%Si)	Perda W/Kg	3,58	3,24	2,77
	Permeabilidade	3635	5606	6410

A Figura 9 mostra a variação das perdas em relação ao valor sem envelhecimento e a permeabilidade magnética do aço 1 tratado a seco, em 1T/60Hz, durante cada estágio de envelhecimento, em cada temperatura, 190°C, 210°C e 230°C.

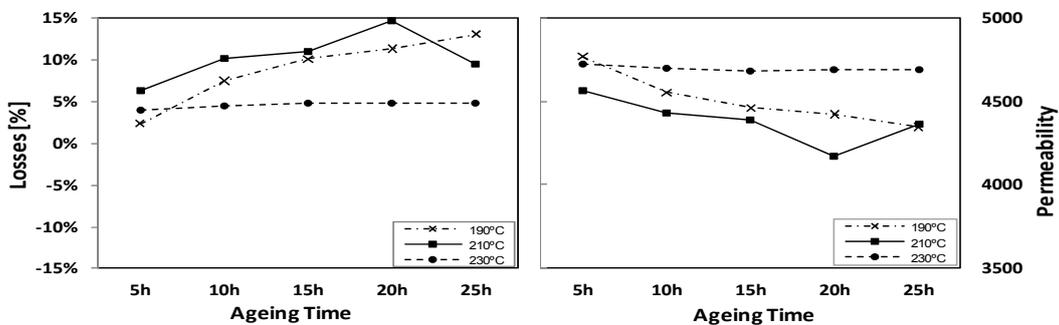


Figura 9. Gráfico comparativo com as perdas magnéticas e permeabilidades do Aço 1 tratado a seco, em 1T/60Hz, durante cada estágio de envelhecimento, em cada temperatura.

A Figura 10 mostra a variação das perdas em relação ao valor sem envelhecimento e a permeabilidade magnética do aço 1 tratado a úmido, em 1T/60Hz, durante cada estágio de envelhecimento, em cada temperatura, 190°C, 210°C e 230°C.

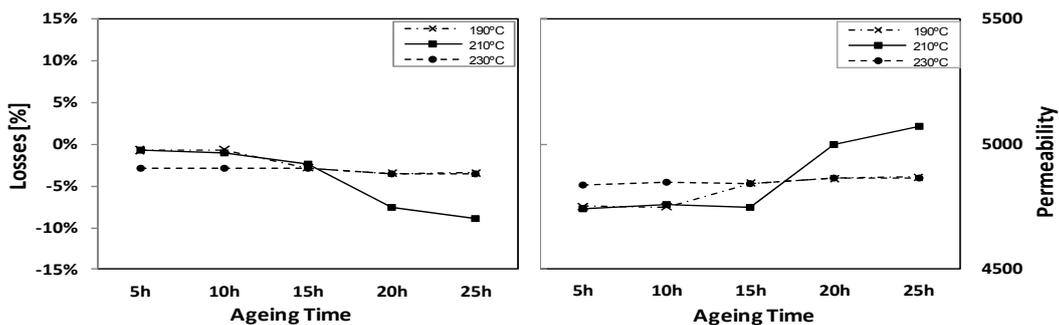


Figura 10. Gráfico comparativo com as perdas magnéticas e permeabilidades do Aço 1 tratado a úmido, em 1T/60Hz, durante cada estágio de envelhecimento, em cada temperatura.

A Figura 11 mostra a variação das perdas em relação ao valor sem envelhecimento e a permeabilidade magnética do aço 2 tratado a seco, em 1T/60Hz, durante cada estágio de envelhecimento, em cada temperatura, 190°C, 210°C e 230°C.

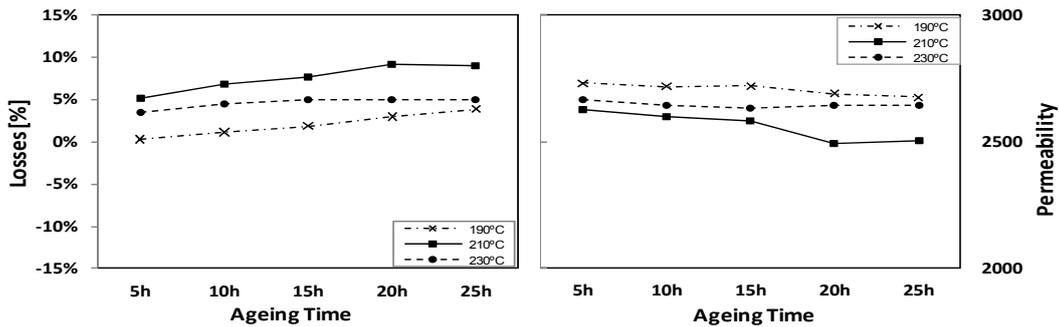


Figura 11. Gráfico comparativo com as perdas magnéticas e permeabilidades do Aço 2 tratado a seco, em 1T/60Hz, durante cada estágio de envelhecimento, em cada temperatura.

A Figura 12 mostra a variação das perdas em relação ao valor sem envelhecimento e a permeabilidade magnética do aço 2 tratado a úmido, em 1T/60Hz, durante cada estágio de envelhecimento, em cada temperatura, 190°C, 210°C e 230°C.

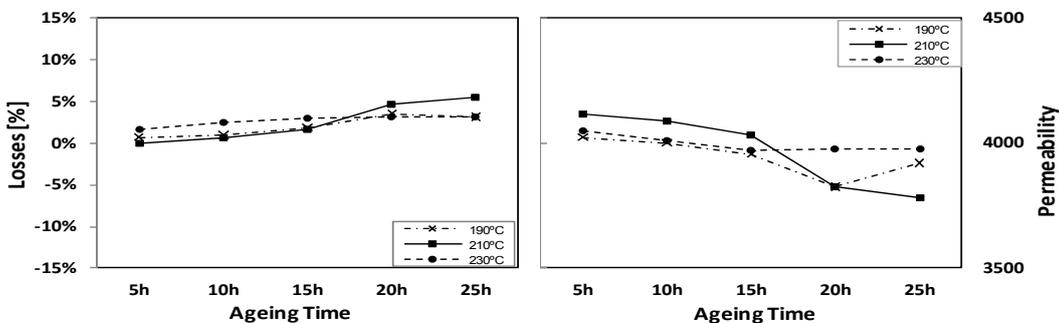


Figura 12. Gráfico comparativo com as perdas magnéticas e permeabilidades do Aço 2 tratado a úmido, em 1T/60Hz, durante cada estágio de envelhecimento, em cada temperatura.

A Figura 13 mostra a variação das perdas em relação ao valor sem envelhecimento e a permeabilidade magnética do aço 3 tratado a seco, em 1T/60Hz, durante cada estágio de envelhecimento, em cada temperatura, 190°C, 210°C e 230°C.

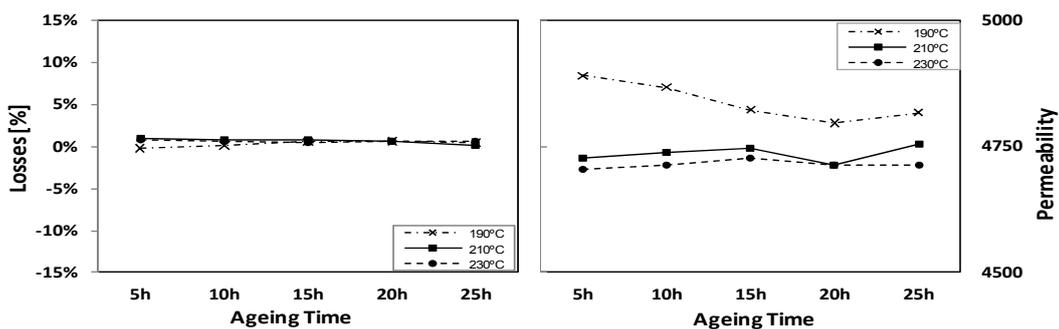


Figura 13. Gráfico comparativo com as perdas magnéticas e permeabilidades do Aço 3 tratado a seco, em 1T/60Hz, durante cada estágio de envelhecimento, em cada temperatura.

A Figura 14 mostra a variação das perdas em relação ao valor sem envelhecimento e a permeabilidade magnética do aço 3 tratado a úmido, em 1T/60Hz, durante cada estágio de envelhecimento, em cada temperatura, 190°C, 210°C e 230°C.

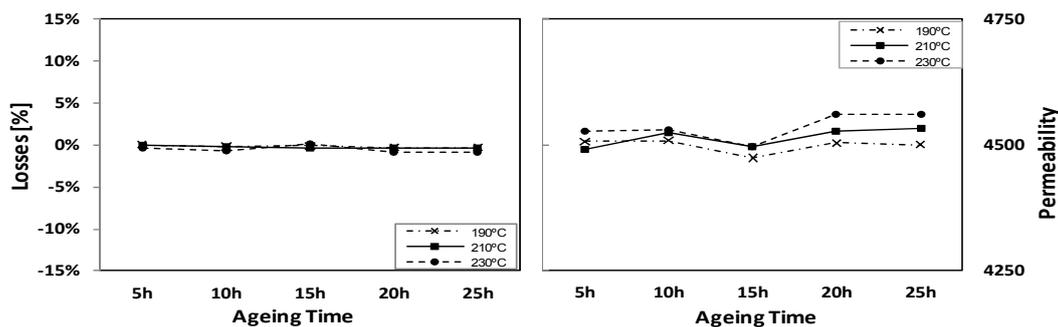


Figura 14. Gráfico comparativo com as perdas magnéticas e permeabilidades do Aço 3 tratado a úmido, em 1T/60Hz, durante cada estágio de envelhecimento, em cada temperatura.

As Tabelas 6 e 7 resumem o comportamento de perdas e permeabilidade magnética dos aços avaliados neste trabalho, para tratamento a seco e a úmido respectivamente. Foi adotado como limiar de envelhecimento 5% de aumento nas perdas.⁽¹⁾

Tabela 6. Características para o tratamento térmico a seco, após 25h de envelhecimento. 09/08/2010

Identificação	Perdas			Permeabilidade		
	190°C	210°C	230°C	190°C	210°C	230°C
Aço 1 (0,16%Mn0,25%Si)	13%	10%	<5%	4348	4366	4691
Aço 2 (0,4%Mn0,3%Si)	<5%	9,0%	<5%	2674	2504	2641
Aço 3 (0,38%Mn0,7%Si)	<5%	<5%	<5%	4817	4754	4713

Tabela 7. Características para o tratamento térmico a úmido, após 25h de envelhecimento. 09/08/2010

Identificação	Perdas			Permeabilidade		
	190°C	210°C	230°C	190°C	210°C	230°C
Aço 1 (0,16%Mn0,25%Si)	<5%	<5%	<5%	4867	5072	4866
Aço 2 (0,4%Mn0,3%Si)	<5%	5,8%	<5%	3919	3779	3975
Aço 3 (0,38%Mn0,7%Si)	<5%	<5%	<5%	4499	4533	4560

4 DISCUSSÃO

4.1 Efeitos da Composição Química

O efeito da composição química é importante nos aços de grão não-orientado, pois eles são diferenciados basicamente pelo seu teor de silício, alumínio e fósforo. A adição destes elementos afeta diretamente a resistividade elétrica dos aços, e as perdas são afetadas.⁽⁹⁾ Quanto maior a adição destes elementos, maior a resistividade do aço em questão, o que reduz a intensidade das correntes elétricas parasíticas, e assim reduz fundamentalmente as perdas.

O aço 3 apresenta teor de silício cerca de três vezes maior, e fósforo, aproximadamente dez vezes maior do que os outros aços. Isto permitiu que este aço possua resistividade



elevada, e como consequência, há redução das correntes parasíticas, levando a menores perdas quando comparados aos outros aços.

Outros elementos que são impurezas, como o carbono, afetam propriedades essencialmente por formarem partículas no interior dos aços, carbonetos, que são responsáveis pelo envelhecimento. Os aços elétricos com teor abaixo de 30 ppm praticamente não sofrem envelhecimento. Aqueles com teores mais altos são susceptíveis, pois podem estar dissolvidos no interior da estrutura cristalina durante o recozimento, mas à temperatura ambiente caem para 1 ppm. Se o resfriamento for relativamente rápido, nem todo carbono é precipitado, parte fica retido em solução sólida, e à temperatura ambiente, ou quando aquecidos em trabalho, passam a se precipitar.⁽¹⁰⁾

Através dos estudos e simulações realizadas anteriormente, foi observado que não somente acontecia descarbonetação no processo a úmido, mas também isso ocorria no processo a seco. E esse fator, aliado ao resfriamento lento, permitiu a melhoria das propriedades magnéticas e diminuição das perdas em todos os aços, quando tratados termicamente. Sendo essa descarbonetação mais efetiva nos aços semiprocessados, 1 e 2, durante o tratamento a úmido, e no aço totalmente processado, 3, no tratamento a seco.

4.2 Efeitos da Espessura

As perdas magnéticas são muito sensíveis à espessura da chapa, através do efeito das perdas parasíticas. Por isso o efeito absoluto da espessura da chapa, depende muito da resistividade do aço, pois altera as perdas por efeito de correntes parasíticas. Assim, quanto maior a espessura maior o valor das perdas, e quanto menor a resistividade do aço, maior o valor das perdas.

A combinação de uma maior resistividade e menor espessura, no aço 3, resultou em menores perdas e maiores permeabilidades quando comparados aos aços 1 e 2.

4.3 Crescimento de Grão

O tamanho de grão é a variável mais conhecida no controle do valor das perdas magnéticas totais. Os contornos de grão são centros de ancoramento, pois, a estrutura de domínios de um grão está acoplada à do seu grão vizinho, e uma parede de domínio em um grão só se moverá se a do grão vizinho mover-se acopladamente. Quanto maior o tamanho de grão, maior a movimentação das paredes de domínio, e, portanto maior a permeabilidade. Porém, há estudos que mostram que o tamanho de grão prejudica algumas propriedades magnéticas, estando associado à deterioração da textura no processo de obtenção de grãos grandes por passe de encruamento antes do recozimento final, como é o caso dos semiprocessados. Há estudos que demonstram a existência de um tamanho de grão ótimo, em torno de 150 μm .⁽¹¹⁻¹³⁾

Nos aços em questão, o aço 3 melhor se encaixou nesta faixa no tratamento térmico à seco. O aço 2 manteve uma aproximação deste valor nos dois tratamentos térmicos. Já o aço 1 ficou um pouco acima desta faixa.



4.4 Recozimento

O recozimento nos aços semiprocessados (aços 1 e 2) diminui muito as perdas, pois além de eliminar os defeitos cristalinos, aumenta o tamanho de grão, melhora a textura e promove a redução do teor de carbono. A redução da perda nestes aços foi em torno de 50%, e a permeabilidade teve um aumento de 300% a 400%.

Este efeito é bem menor nos aços totalmente processados, como o aço 3. A principal função do recozimento, neste caso, é o de alívio de tensões. A redução na perda foi de 10% e o aumento na permeabilidade de foi de 100%.

4.5 Formação de Óxidos

O recozimento em atmosfera oxidante provoca um aumento da espessura de óxido do material. O aço com revestimento fosfatizado também sofre alteração microestrutural na superfície, alterando o tipo de fosfato presente, mesmo quando tratado em atmosfera de nitrogênio pode ocorrer esta oxidação.

O aço 3, que possui camada fosfatizada, adquiriu após o recozimento a seco e a úmido, um óxido de ferro e silício chamado de faialita ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$), que é prejudicial nas aplicações no cliente, visto que interfere no isolamento magnético.

O tratamento térmico a seco reduz a camada de óxidos, o que aumenta a seção efetiva de aço e tende a melhorar o desempenho magnético dos materiais.

4.6 Envelhecimento

O envelhecimento magnético dos aços, quando submetidos a aquecimento, aumenta o nível de perdas e também reduz sua permeabilidade magnética. Sabe-se que isto está associado à precipitação de carbeto e nitreto, que afetam a movimentação das paredes de domínio.

Para o tratamento a seco, o comportamento dos aços foi distinto entre si, e também variou com a temperatura de envelhecimento. O aço 1 envelheceu em 190°C e 210°C, e não apresentou envelhecimento em 230°C. O aço 2 envelheceu apenas em 210°C. O aço 3 não apresentou envelhecimento.

Para o tratamento a úmido, com exceção do aço 2 em 210°C, não houve variação de permeabilidade e nem envelhecimento magnético para nenhum aço, mesmo tendo o aço 3 apresentado teor de carbono acima de 30ppm.

Os resultados de permeabilidade magnética forma melhores para os aços 1 e 2 tratados a úmido, e para o aço 3 tratado a seco.

5 CONCLUSÃO

O tratamento térmico influenciou diretamente o desempenho elétrico dos aços. Os resultados mostram que os aços 1 e 2 tiveram melhor rendimento quando tratados termicamente a úmido. Já o aço 3, por ser um aço totalmente processado, e se apresentar de maneira distinta, teve um melhor rendimento quando tratado a seco.

Estes mesmos materiais, quando submetidos a envelhecimento por aumento de temperatura, apresentaram características distintas. Os aços 1 e 2, quando tratados a úmido e envelhecidos apresentam características melhores que quanto tratados a seco



e envelhecidos. Já o aço 3 não sofreu aumento de perdas devido ao envelhecimento, contudo, sua permeabilidade ficou maior quando tratado a seco e envelhecido. Foi observado que para a temperatura de envelhecimento de 230°C, tanto a seco quanto a úmido, não houve envelhecimento nos aços avaliados.

Agradecimentos

Durante o desenvolvimento deste projeto contamos com os auxílios técnicos e financeiros do Centro de Pesquisas da CSN. Ainda agradecemos o apoio do Cliente Embraco na parceria deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 MARRA, K.M.; BUONO, V.T., Variação das perdas magnéticas durante envelhecimento de um aço elétrico, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.3. n.1, p. 36-39, jul-set.2006.
- 2 MARRA, K.M.; MELO, E.G., VIEIRA, S.L., Influência das Condições de Descarbonetação nas Propriedades magnéticas do Aço Usicore 260, Revista Metalurgia e Materiais, vol.58, nº524, agosto 2002.
- 3 LANDGRAF, F.; CAMPOS, M. F.; TEIXEIRA, J.C.; CONCILIO, G.; MURANAKA, C.; TSCHIPTSCHIN, A.; WOLGIEN, V.; ZWIRMAN, N.; CORTES, C. Modelamento das perdas magnéticas de aços elétricos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS DA ABM, 2., 1997, São Paulo.
- 4 SLANE, J. A.; LABUN, P. A. The relationship of magnetic properties to carbide distribution in a continuous annealed 2,3% silicon electrical steel. In: THE AMERICAN INSTITUTE OF MINING METALLURGICAL, AND PETROLEUM ENGINEERS. Energy efficient electrical steels. NewYork, 1981. p. 193-204.
- 5 Copyright ASTM International, E112. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, December 2010.
- 6 Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester (IEC 60404-3:1992 + A1:2002 + A2:2009), Corrigendum to DIN IEC 60404-3:2010-05
- 7 DRAKE A E, AGER C. Specific total power loss measurements using an IEC single-sheet tester. IEE Proceedings A Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews. 1987;134(7):601.
- 8 YAMAMOTO T, OHYA Y. Single sheet tester for measuring core losses and permeabilities in a silicon steel sheet. IEEE Transactions on Magnetics. 1974;10(2):157-159.
- 9 LANDGRAF, F. Aços Carbono e Aços Silício para fins elétricos. Curso organizado pelo Laboratório de Metalurgia do pó e Materiais Magnéticos. Educação Continuada - IPT. 2000, S.Paulo.
- 10 EMURA, M., LANDGRAF, F.J.G., FILIPINI, M.A. Efeito do Envelhecimento nas propriedades magnéticas de um aço elétrico. In: ANAIS DO VI SEMEL – Seminário de Materiais Elétricos, Curitiba, Dezembro de 1998. v. CD-ROM, p.711-718 (1998).
- 11 SHIMANAKA, H.; ITO, Y.; MATSUMURA, K; FUKUDA, B. Recent development on non-oriented electrical steel sheets. J.Magn. Mag. Mat., v.26, p. 57-64, (1982).
- 12 BERTOTTI, G.; SCHINO, G. D.; MILONE, A.F.; FIORILLO, F. On the effect of grain size on magnetic losses of 3% non-oriented SiFe. Journal De Physique, V.9, P. 385-388 (1985).
- 13 MAGER, A. About the influence of grain size on the coercivity. Ann. Phys. Leipzig, pp. 11-15 (1952).