

DESENVOLVIMENTO DAS NOVAS CLASSES DE AÇOS ELÉTRICOS E115-035 SIMILAR AO JIS 35A230 E E110-035 SIMILAR AO JIS 35A210¹

Márcio Ferreira Rodrigues²
Fabrício Luiz de Alcântara²
Hélcio Araujo Quintão²
Norma Elisabete F. Lima²
Sebastião da Costa Paolinelli³
Marco Antônio da Cunha²
Carlos Lovato Neto²
Claudimar Pereira dos Santos²
Ronie Magno Pinheiro⁴
Adriana Martinez Simões⁴
Nivaldo Ferreira⁵

Resumo

Desde 1997 a Arcelor Mittal Inox Brasil vem desenvolvendo os aços baixíssima perda, buscando otimizar a qualidade magnética a custos satisfatórios. Este trabalho visa desenvolver novos produtos para atender a necessidade e tendências de mercado, através da melhoria da qualidade magnética e superficial. Em 2006 iniciou-se no Centro de Pesquisas da AMIB, estudos para avaliação das propriedades magnéticas do aço P930P (3% Si) em função da redução da espessura, com o intuito de avaliar a potencialidade do aço em atingir perdas magnéticas mais baixas. Até então a Arcelor Mittal Inox Brasil possuía como produto padrão de espessura 0,35 mm, mais nobre ou de mais baixa perda o E125-035 (perda magnética de 3,20 W/kg a 1,5T e 60 Hz). A partir de resultados satisfatórios de Laboratório, iniciou-se em 2007 o desenvolvimento industrial no qual excelentes resultados magnéticos foram obtidos, proporcionando a inclusão de dois novos produtos comercializáveis, expandindo o portfólio da empresa com as novas classes de produtos desenvolvidos, o E115-035 (perda magnética de 2,90 W/kg a 1,5 T e 60 Hz) e o E110-035 (perda magnética de 2,65 W/kg a 1,5 T e 60 Hz). Este tipo de aço possui excelentes propriedades magnéticas permitindo conciliar baixa perda e elevada indução magnética. O desenvolvimento das novas classes de aços que são aplicados na produção de pequenos transformadores, geradores de energia e motores permitiu que a Arcelor Mittal Inox Brasil se destacasse como produtor de aços de altíssimo valor agregado, enobrecendo sua posição entre os maiores produtores mundiais de aços elétricos.

Palavras-chaves: Aços elétricos; Grão não orientado; Siliciosos.

DEVELOPMENT OF NEW ELECTRICAL STEELS GRADES E115-035 AND E110-035 SIMILAR JIS35A230 AND JIS35A210 IN ARCELOR MITTAL INOX BRASIL

Abstract

Since 1997 Arcelor Mittal Inox Brasil has been developing electrical steels with ultra low core losses, looking to optimize magnetic quality and satisfactory costs. This development is aimed at meeting the needs and trends of the market, by improving magnetic quality. In 2006 studies for evaluation of the magnetic properties of the P930P (3% Si) grade started at the Centre for Research at AMIB. Thickness was reduced in order to evaluate the capability of steel to achieve ultra lower core losses, which permit AMIB to offer new products with high electrical efficiency and high added value. Before 2006 AMIB had as the standard product with the lowest core losses grade E125-035 (core losses 3.20 W / kg at 1.5 T / 60 Hz). In 2007, with satisfactory laboratory results, we started the industrial development in which excellent magnetic results were obtained, leading to the inclusion of two new products on the market, expanding the company's portfolio with new grades of developed products, the E115-035 (magnetic core losses of 2.90 W / kg to 1.5 T/60 Hz) and E110-035 (magnetic core losses of 2.65 W / kg to 1.5 T/60 Hz). This type of steel has excellent magnetic properties, allowing the reconciliation of low core losses and high magnetic induction. The development of these grades, which are used in small transformers, generators and engine production, has allowed Arcelor Mittal Inox Brasil to become a great electrical steel producer of high added value, and has put us in a great position among the world's largest producers of electrical steels. Thus, Arcelor Mittal Inox Brasil has reached a higher level and is able to compete in the world market with high grade, low core loss electrical steels.

Key words: Electrical steel; Non oriented grain; Silicon steel.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Engº Metalúrgico M.Sc – Assistente técnico da Arcelor Mittal Inox Brasil*

³ *Engº Metalúrgico Ph.D – Consultor técnico da Arcelor Mittal Inox Brasil;*

⁴ *Engº Metalúrgico – Assistente técnico da Arcelor Mittal Inox Brasil;*

⁵ *Técnico Metalúrgico – Analista técnico da Arcelor Mittal Inox Brasil*

1 INTRODUÇÃO

A Arcelor Mittal Inox Brasil, como fabricante de aços para fins elétricos, vem sempre buscando aliar a qualidade dos produtos com as tendências e necessidades do mercado. Nos últimos anos a crise energética vem exigindo soluções relacionadas com a busca de alternativas racionais de redução de consumo de energia e com isto a produção de máquinas elétricas cada vez mais eficientes.

Os aços elétricos têm um papel muito importante na matriz energética do país e do planeta, pois se estima que 50% da energia elétrica produzida anualmente é utilizada por motores de tração, e parte desta energia, aproximadamente 4,5% é dissipada como perdas elétricas.⁽¹⁾

A contribuição da Arcelor Mittal Inox Brasil neste caso é o desenvolvimento de produtos de baixa perda magnética que permita a fabricação de máquinas elétricas de alta eficiência, objeto deste trabalho.

Perda magnética é o principal resultado avaliado no produto final e é um fator que prejudica o rendimento energético das máquinas elétricas. É medida em W/kg, ou seja quanto menor as perdas magnéticas melhor será o rendimento energético da máquina elétrica e menor o consumo de energia.

A permeabilidade que é a capacidade de amplificar ou multiplicar o campo magnético é um outro fator avaliado; quanto maior a permeabilidade melhor para o rendimento energético da máquina elétrica.⁽¹⁾

1.1 Aços Elétricos Produzidos pela Arcelor Mittal Inox Brasil

A Tabela 1 mostra as classes de aços de espessura 0,35 mm produzidas pela Arcelor Mittal Inox Brasil até 2006. As duas últimas classes E110 e E115 são objeto deste trabalho, desenvolvidas a partir de 2006.⁽²⁾

Tabela 1 - Classes de aços produzidos pela Arcelor Mittal Inox Brasil até 2006.⁽²⁾

Classe Arcelor Mittal Timóteo	Classe JIS 2552-2000	Espessura (mm)	Perda Magnética Máxima especificada (W/kg)	Perda Típica AMT (W/kg)	Indução Magnética Mínima especificada (T)	Indução Magnética Típica AMT (T)
			1,5 T / 60Hz	1,5 T / 60Hz	B5000	B5000
E170	35A 360	0,35	4,20	3,41	1,61	1,70
E157	35A 300		3,95	3,26	1,60	
E145	-		3,71	3,15	1,60	
E137	35 A 270		3,49	2,99	1,60	1,69
E125	35 A 250		3,20	2,83	1,60	
E115	35 A 230		2,90		1,62	
E110	35 A 210		2,65			

Estes aços, o E115-035 e o E110-035 são usados principalmente na fabricação de pequenos transformadores, geradores e motores.

A Figura 1 ilustra os valores de perda magnética típicos alcançados e a especificação na condição 1,5T/60 Hz para cada classe de aço, sendo que até 2006 o aço de espessura 0,35 mm mais nobre produzido pela Arcelor Mittal Inox Brasil era o E125-035.

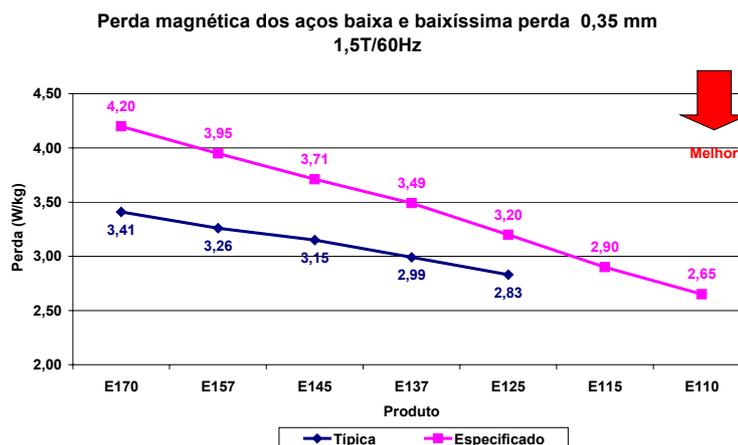


Figura 1 - Valores de perda magnética típicos alcançados e a especificação na condição 1,5T/60 Hz .

2 MATERIAL E METODOS

2.1 Planejamento Experimental no Centro de Pesquisa

Foram utilizadas amostras de BQ's (bobinas a quente) do aço P930P com teor de Si 3%, para processamento no Centro de Pesquisas. Estas amostras de BQ's foram submetidas ao recozimento inicial nas temperaturas de 900°C a 1.100°C e laminadas para espessura final de 0,35 mm no laminador piloto.

Após a laminação a frio no Centro de Pesquisas as amostras de BF foram submetidas ao recozimento final em forno contínuo em diferentes temperaturas (900°C a 1.100°C), atmosfera de 100% H₂ e ponto de orvalho menor do que -20°C.

Os testes magnéticos foram realizados em amostras de 305 x 30 mm, em quadro Epstein com 8 amostras, no sentido de laminação, 1,5 T e frequência de 60Hz.

Utilizou-se o software Minitab para avaliar a correlação entre as variáveis do processo em especial temperatura de recozimento inicial e temperatura de recozimento final e os resultados magnéticos e metalográficos.

2.1.2 Resultados do centro de pesquisas

A Figura 2 mostra o gráfico de indução magnética B₅₀ (mT) e perda magnética 1,5T/60 Hz (W/kg) em função da temperatura de recozimento inicial (°C). Observa-se que os melhores resultados de B₅₀ ocorreram com temperaturas de recozimento inicial mais elevadas. Os resultados de perda magnética praticamente não variaram com a temperatura de recozimento inicial.

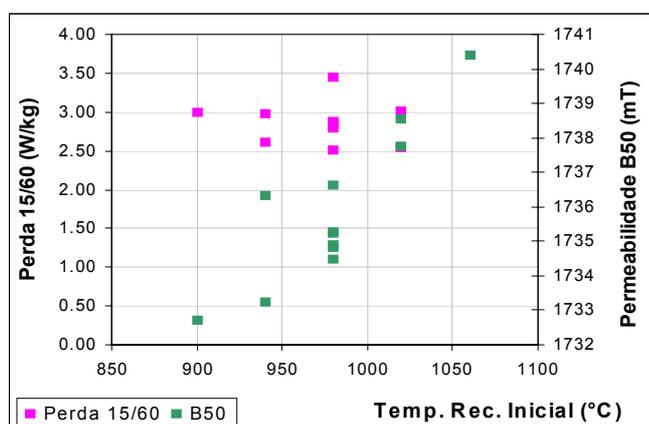


Figura 2 - Gráfico de indução magnética B₅₀ (mT) e perda 1,5T/60Hz (W/kg) em função da temperatura de recozimento inicial (°C)

A Figura 3 mostra o gráfico da perda magnética (W/kg) a 1,5T/60Hz em função da temperatura de recozimento final. Observa-se uma melhora das perdas com o aumento da temperatura de recozimento final, que está relacionada com o aumento do tamanho de grão final, conforme mostrado na Figura 4.

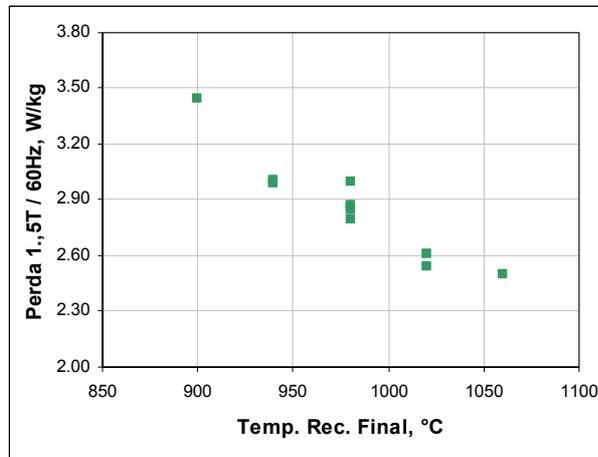


Figura 3 - Gráfico da perda magnética (W/kg) a 1,5T/60Hz em função da temperatura de recozimento final.

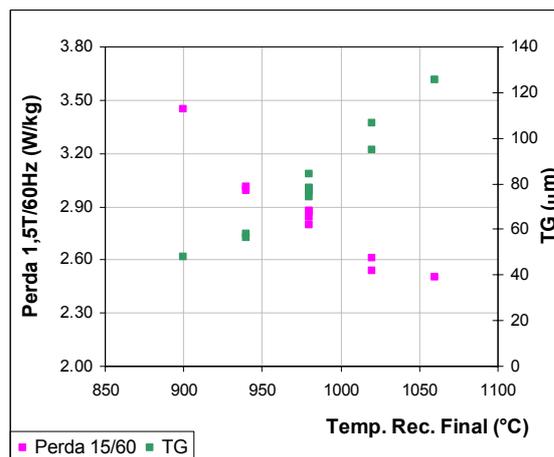


Figura 4 - Gráfico da perda magnética (W/kg) a 1,5T/60Hz e tamanho de grão final em função da temperatura de recozimento final.

2.2 Desenvolvimento Industrial

2.2.1 Planejamento do experimento industrial

A partir dos resultados obtidos no Centro de Pesquisas da Arcelor Mittal Inox Brasil, foi elaborado um procedimento experimental na área industrial para produção de lotes de E115-035/E110-035.

A liga P930P é uma liga desenvolvida pela Arcelor Mittal Inox Brasil em condições especiais de composição química,⁽³⁾ com foco na redução de perdas magnéticas e aumento da permeabilidade magnética, já que tais características têm sido exigidas pelos clientes, buscando maior eficiência de suas máquinas elétricas,⁽⁴⁾ e ainda permitindo melhor trabalhabilidade devido menores valores de dureza.

O desenvolvimento desta nova liga explora os benefícios do silício, aliado aos benefícios do manganês, com o mínimo de elementos residuais, pois o menor nível de residuais é de fundamental importância no atendimento das menores perdas e maiores induções / permeabilidade magnéticas.⁽⁵⁾

A partir dos resultados do primeiro lote produzido, iniciou-se avaliação dos parâmetros de processo de maneira a determinar as faixas otimizadas dos parâmetros críticos com foco na perda e indução magnética.

2.2.2 Resultado industrial

Durante a produção experimental, foi observado forte influência do ponto de orvalho, temperatura de recozimento final, teores de Si e residuais em especial o S e N₂ e espessura final.

A Figura 5 mostra os resultados de perda magnética versus ponto de orvalho nas zonas de descarbonetação, onde observa-se melhoria dos resultados de perda magnética com a redução do ponto de orvalho. Esta melhoria se deve a menor oxidação sub-superficial do aço durante o processo de recozimento final.

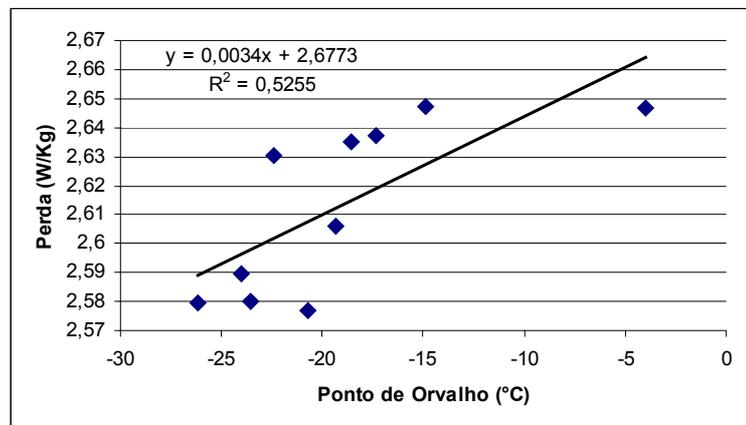


Figura 5 – Perda magnética a 1,5T/60Hz versus ponto de orvalho nas zonas de descarbonetação do forno de recozimento final.

Outro fator importante conforme constatado em laboratório é a temperatura de recozimento final. A Figura 6 mostra os resultados de perda magnética versus temperatura das zonas de recozimento final, onde observa-se melhores resultados após ajuste da temperatura para 1.050°C.

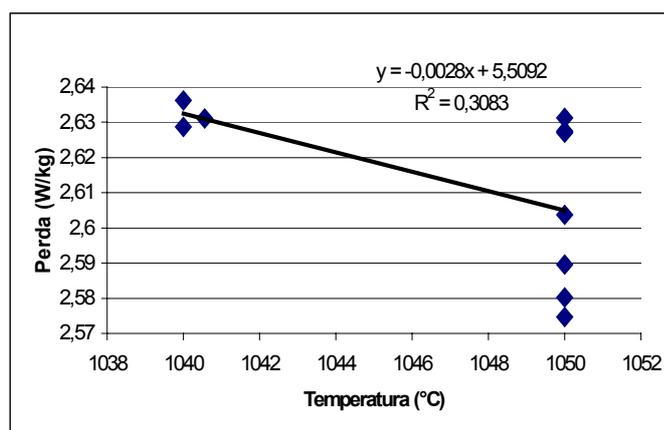


Figura 6 – Perda magnética a 1,5T/60Hz versus temperatura das zonas de recozimento final.

Foi analisado a influência dos elementos químicos, onde observou-se maior influência do Si, S e N₂, conforme mostrado respectivamente nas Figuras 7,8 e 9.

O aumento do teor de Si melhora a perda magnética devido a melhoria na resistividade elétrica.

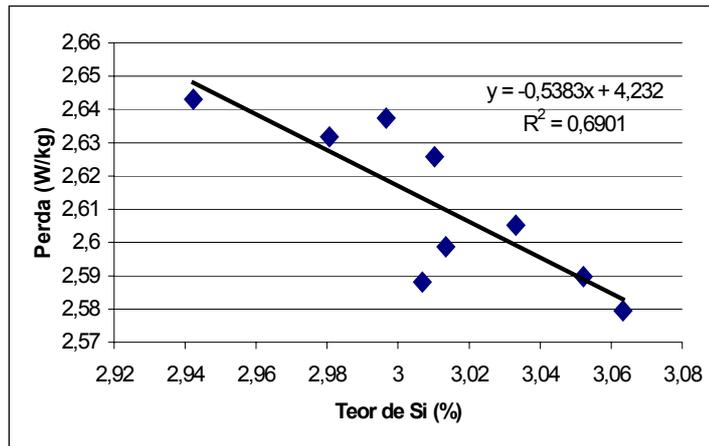


Figura 7 - Perda magnética a 1,5T/60Hz versus teor de Si.

O aumento do teor de S afeta negativamente a perda magnética devido a formação de sulfetos que impedem a movimentação dos domínios magnéticos.⁽⁵⁾ Este elemento deve ser mantido nos menores níveis possíveis principalmente devido a facilidade de combinar com o Mn formando MnS.

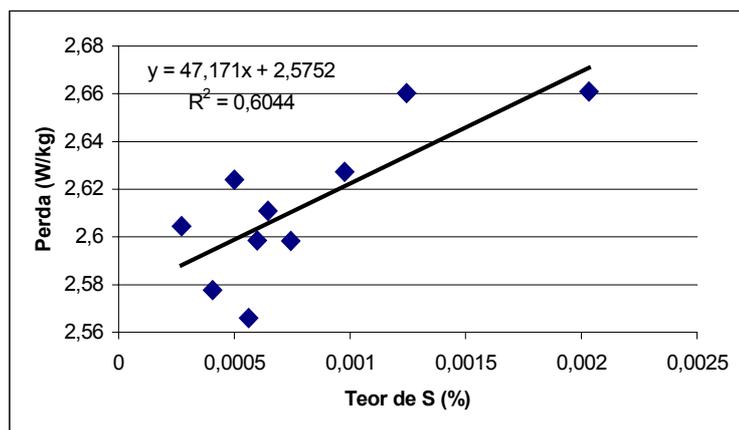


Figura 8 - Perda magnética a 1,5T/60Hz versus teor de S.

O N₂ deve ser mantido nos menores níveis possíveis de maneira a evitar a formação de nitretos que afetam a perda magnética negativamente da mesma maneira que o S.⁽⁵⁾

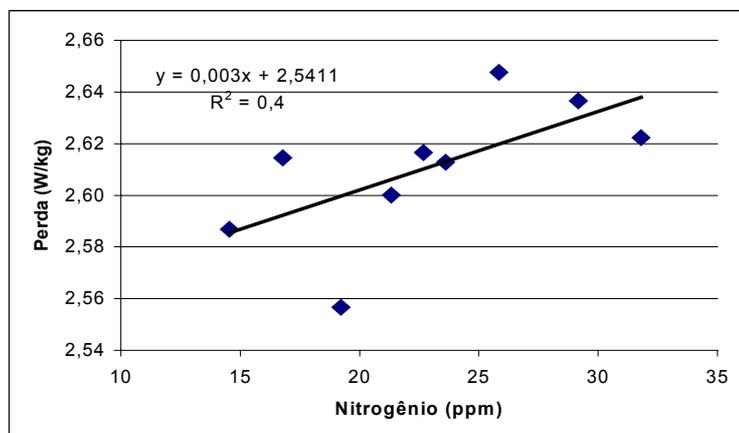


Figura 9 - Perda magnética a 1,5T/60Hz versus teor de N₂.

A Tabela 2 mostra as classes de aços de espessura 0,35 mm produzidas pela AMIB incluindo os resultados de perda e indução magnética das classes de aço E110 e E115.

Tabela 2 - Classes de aços produzidos atualmente pela Arcelor Mittal Inox Brasil.⁽²⁾

Classe Arcelor Mittal Timóteo	Classe JIS 2552-2000	Espessura (mm)	Perda Magnética Máxima especificada (W/kg)	Perda Típica AMT (W/kg)	Indução Magnética Mínima (T)	Indução Magnética Típica AMT (T)
			1,5 T / 60Hz	1,5 T / 60Hz	B5000	B5000
E170	35A 360	0,35	4,20	3,41	1,61	1,70
E157	35A 300		3,95	3,26	1,60	
E145	-		3,71	3,15	1,60	
E137	35 A 270		3,49	2,99		
E125	35 A 250		3,20	2,83	1,62	
E115	35 A 230		2,90	2,69		
E110	35 A 210		2,65	2,55		

A Figura 10 ilustra os valores de perda magnética típicos alcançados e a especificação na condição 1,5T/60 Hz para cada classe de aço produzido pela Arcelor Mittal Inox Brasil incluindo as novas classes E115 e E110. Observa-se na Figura 10, uma maior proximidade dos valores obtidos com os valores especificados de perdas magnéticas com a melhoria da classe magnética do produto, ou seja, quanto mais nobre o aço, mais difícil é o atendimento dos valores especificados de perda magnética. As classes são melhoradas no sentido do E170 (menos nobre) para o E110 (mais nobre).

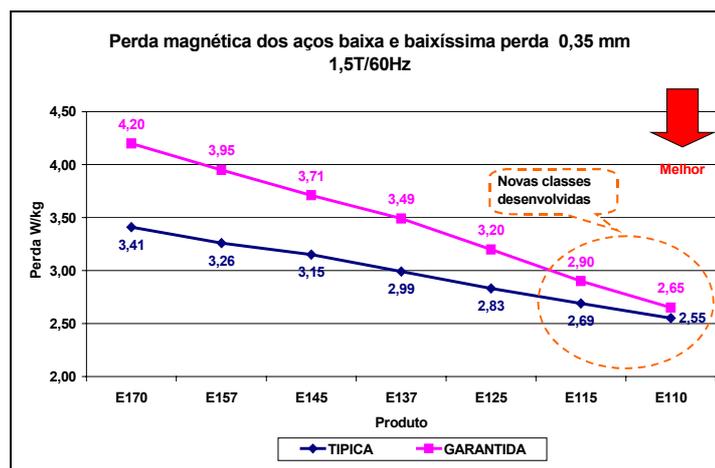


Figura 10 - Valores de perda magnética típicos alcançados e a especificação na condição 1,5T/60 Hz .

Os resultados obtidos permitiram a padronização do processo do E110-035 nas seguintes condições:

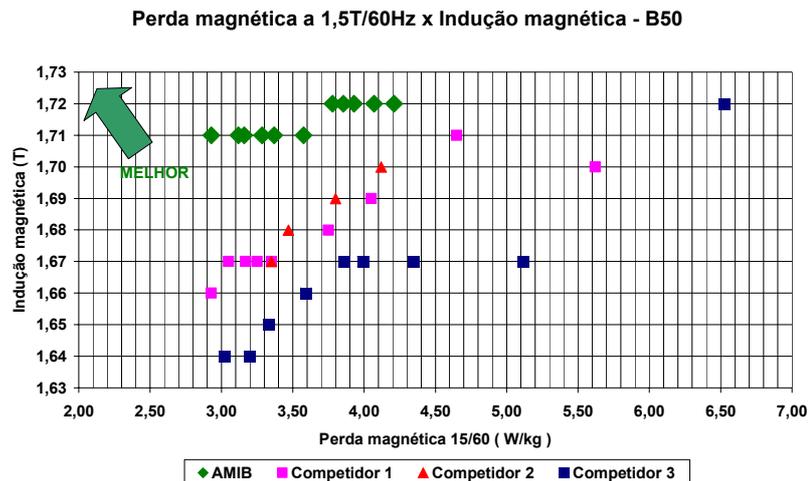
- O teor de Si afeta diretamente a resistividade e a densidade do aço, neste caso chegou-se a um resultado ótimo garantindo a densidade assumida de 7,65 g / Cm³;
- Teor de S – o mínimo possível;
- Teor de N₂ – o mínimo possível;
- Recozimento inicial na faixa de 1.000°C a 1.050°C.
- Quanto menor ponto de orvalho no forno de recozimento final melhor os resultados de perda;

Garantindo o atendimento dentro dos parâmetros indicados acima obtivemos após setembro/07 um resultado de 100% de atendimento a perda especificada, alcançando valores médios de 2,55 W/kg sendo o especificado 2,65 W/kg na condição 1,5T / 60Hz para o E110-035.

Para o E115-035 a única diferença é a velocidade de processo de 36m/min no recozimento final, sendo alcançado valores de perda típica de 2,69 w/kg para o especificado de 2,90 W/kg.

- **Posição da Acesita em relação aos produtores mundiais de aços elétricos**

A Figura 11 mostra a situação atual da Arcelor Mittal Inox Brasil em relação aos principais produtores mundiais de aços elétricos, onde observa-se que o desenvolvimento industrial dos aços baixíssima perda colocaram a Arcelor Mittal Inox Brasil em posição competitiva como fornecedor de aços de alta eficiência, que conciliam excelentes resultados de perda magnética com excelentes resultados de indução magnética, pois é sabido que quanto maior a indução e menor a perda, maior é a eficiência energética da máquina elétrica e menor o consumo de energia.



Fonte: Catálogos publicados dos principais produtores de aços elétricos no mundo.

Figura 11 – Posição da Arcelor Mittal Inox Brasil em relação aos principais produtores mundiais de aços elétricos.

3 CONCLUSÃO

O novo produto desenvolvido proporciona excelentes resultados de permeabilidade magnética permitindo conciliar baixa perda e elevada indução magnética.

Este produto atende aos padrões mais exigentes de eficiência energética dos equipamentos elétricos. Este tema se tornou objeto de lei em vários países, inclusive no Brasil, haja visto os problemas ambientais e desafios quanto à garantia de abastecimento sustentável de energia elétrica.

O desenvolvimento das novas classes de aço permitiu que a AMIB se destacasse como produtor de aços de altíssimo valor agregado, enobrecendo sua posição entre os maiores produtores mundiais de aços elétricos. Dessa maneira, a AMIB alcançou um patamar mais elevado ao estar apta a competir no mercado mundial de aços de baixíssima perda magnética.

Para garantia da qualidade magnética do produto final é de suma importância o controle dos teores de silício na faixa definida, aliado com os menores valores possíveis de residuais, em especial o teor de enxofre, ponto de orvalho no recozimento final menores possíveis e temperatura e tempo de recozimento inicial e final bem definidos.

Qualidade de corte das amostras para efetuar o ensaio de propriedades magnéticas no quadro Epstein.

Agradecimentos

Equipes do Controle de Processo, manutenção, operação e planejamento da Aciaria, Laminação a Quente e Laminação a Frio da Arcelor Mittal Inox Brasil.

REFERÊNCIAS

- 1 Landgraf, F.J.G. Aços carbono e aços silício para fins elétricos – outubro-2007;
- 2 Catálogo de aços elétricos da Arcelor Mittal Inox Brasil.
- 3 Paolinelli, S. C, Cunha, M. A. Estudo da Influência da Temperatura de Acabamento Sobre a Estrutura e Propriedades Magnéticas de Aços GNO com 2,0 e 3,0% de Si com Al e Mn Variados;
- 4 Alcantara, F.L, Cunha, M.A. Desenvolvimento de aço GNO para aplicação em altas frequências. 2007;
- 5 Santos, C.P. Textura de deformação e recristalização e propriedades magnéticas em um aço silício de grão não orientado com 3,2% de Si. 2000.