

DESENVOLVIMENTO DE AÇO GALVANIZADO PARA CAPACITAÇÃO TECNOLÓGICA DA LZC#3, NA CSN, PARA PRODUÇÃO DE AÇOS ULTRA BAIXO CARBONO (IF)¹

Flávia Tereza dos Santos Fernandes Tolomelli²

Fabio Moreira da Silva Dias²

Alexandre Pimentel Sampaio³

Renata Garcez⁴

Laurício Muniz Couto⁵

Resumo

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um aço ultra baixo carbono (IF), destinado à confecção de gabinetes e cavidade interna de fornos de microwaves para o segmento de linha branca. O objetivo principal do trabalho, além da produção de aços IF destinados ao segmento de linha branca, é capacitar a Linha de Zincagem Contínua nº 3 (LZC#3) da CSN para a produção de aços IF destinados ao segmento automotivo. Com isso pretende-se manter o cliente da linha branca (sem perder *market share* nesse segmento) e criar uma rota alternativa para a produção de aços de maior valor agregado e alta produtividade, devido à possibilidade de produção futura de aços da classe ultra baixo carbono para o segmento automotivo na LZC#3. Para a viabilização da produção desses aços na LZC#3 foram realizadas alterações na rota de produção do aço, na composição química e em outras condições de processamento, com posterior análise estatística dos resultados de propriedades mecânicas obtidos. Os resultados obtidos demonstraram viabilidade técnica e econômica de fabricação desses aços na LZC#3 da CSN, o que aumenta a flexibilidade de rotas de produção para segmento automotivo e linha branca.

Palavras-chave: Aço ULC (IF); Desenvolvimento; Capacitação; LZC#3.

DESENVOLVIMENTO DE AÇO GALVANIZADO PARA CAPACITAÇÃO TECNOLÓGICA DA LZC#3, NA CSN, PARA PRODUÇÃO DE AÇOS ULTRA BAIXO CARBONO (IF)

Abstract

This paper presents the development of an ultra low carbon steel (IF) for the manufacture of enclosures and internal cavity of microwave ovens for the segment of the white-goods appliances. The main objective of the work, besides the production of IF steels for the segment of the white-goods appliances, is to enable the Continuous Galvanizing Line nº 3 (LZC#3) of CSN for the production of IF steels for the automotive industry. The intention is to keep the customer of the white-goods appliances (without losing market share in this segment), making an alternative route for the production of new steels with higher added value and high productivity, due the future possibility to serve new demands of ultra low carbon steel for automotive industry in LZC#3. For the viability of the production of these steels in LZC#3 changes were made in production route, chemical composition and other process conditions, with statistical analyses of the mechanical properties. The results obtained showed technical and economic viability for the production of these steels in LZC#3 of CSN, increasing flexibility in the production routes for automotive industry and white-goods appliances.

Key words: IF ULC steel; Development; Productive capacity; LZC#3.

¹ *Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP.*

² *Gerência Geral de Desenvolvimento de Produtos - DEPRO/GGDP/GDZ. CSN – Companhia Siderúrgica Nacional*

³ *Gerência Comercial Linha Branca - DECO/DMI-II/GCLB. CSN.*

⁴ *Gerência Geral de Processos Siderúrgicos - DEPRO/GGPS/GLP. CSN.*

⁵ *Gerência Geral de Galvanizados e Laminados a Frio – DEPRO/GGGL/GRZ. CSN.*

1 INTRODUÇÃO

Em meados de 2009, com o aquecimento do segmento automotivo, foi realizado um trabalho na CSN para otimização do seu *mix* de produtos. Este trabalho teve como objetivo disponibilizar espaço nas linhas de galvanização com qualidade peça exposta para a produção de aços de maior valor agregado destinados ao segmento automotivo. Dessa maneira, houve a migração de materiais de outros segmentos, tais como a especificação NBR 7008 ZEE GR1, para produção nas plantas com qualidade peça interna. Entretanto, tendo em vista tratar-se de material com qualidade superficial mais exigente, com rota específica, o mesmo somente poderia ser produzido via LZC#3, onde entre as demais linhas de galvanização, mostrou-se mais apropriada. Anteriormente, já havia sido realizada uma primeira experiência em escala industrial. Porém, foi observado que as condições do equipamento não eram as mais adequadas na ocasião o que levou à realização de ações de melhoria no referido equipamento. Dentre as principais ações, pode-se destacar a implantação de instrumentos de monitoramento e controle o que permitiu que fosse realizado um melhor ajuste/regulagem dos parâmetros de processo do forno de recozimento contínuo, o que propiciou a obtenção das condições adequadas para a produção dos aços ultra baixo carbono (IF) no equipamento. Entretanto, somente essas ações não foram suficientes, pois quando teve início a produção do material IF na linha, foi observada a ocorrência de defeitos superficiais.

Assim, de forma a não deixar o cliente desabastecido, foi feita a migração da especificação NBR 7008 ZEE GR1 com utilização de um aço baixo carbono com adição de boro e com rota de *over-aging* no recozimento em caixa. Passado certo período, após a migração do material, foi constatado que o mesmo não estava atendendo plenamente as expectativas do cliente em termos de desempenho mecânico. Assim, novas ações foram postas em prática, dentre as quais pode-se destacar a alteração do tipo de aço (com substituição do aço baixo carbono ao boro pelo aço IF ao Ti) com o objetivo de eliminação do processo de envelhecimento apresentado pelo material de baixo carbono; redução da rota de fabricação com entrega direta da linha de galvanização e com conseqüente redução de custo na cadeia produtiva. Além disso, foi feita uma posterior migração para outro aço IF ao Ti com melhor *alloy design*, o que possibilitou um melhor ajuste das condições de processamento de forma a obter-se um melhor desempenho do produto final. O trabalho apresenta a metodologia de desenvolvimento, seguindo as etapas citadas, e os resultados obtidos.

1.1 Aços IF (*Interstitial Free*)

Os aços livres de intersticiais, LI, ou também chamados *Interstitial Free*, IF, são utilizados em uma gama de aplicações onde, principalmente, é requerida uma excelente conformabilidade, aliada também, à propriedade de não envelhecimento. A alta conformabilidade dos aços IF está associada à textura $\{111\}\langle u\ v\ w\rangle$ e, também, à baixa resistência mecânica apresentada por esses tipos de aços. Isso implica em menores valores para limites de escoamento e resistência (LE e LR, respectivamente) e conseqüentemente, elevados valores de alongamento total e coeficientes de anisotropia normal e de encruamento (AL , \bar{R} e n , respectivamente). Se os elementos intersticiais, C e N, estão estabilizados na forma de precipitados, o material não apresenta envelhecimento por deformação (*strain aging*). Isso é devido

à adição de elementos fortes formadores de carbonetos e nitretos, como titânio e nióbio.

Os aços IF modernos pertencem às categorias dos chamados aços ultra baixo carbono, *ULC (Ultra Low Carbon)*, e super ultra baixo carbono, *SULC (Super Ultra Low Carbon)*, onde para essas classes de aços os teores de carbono encontram-se menores que 50 ppm e 30 ppm, respectivamente.

O processo de precipitação nos aços IF, durante o processamento termomecânico, possui um efeito importante nas características microestruturais do material laminado a quente, e conseqüentemente, após laminado a frio e recozido, influenciando assim, na qualidade do produto final.

1.2 Estabilização dos Elementos Intersticiais Através do Processo de Precipitação nos Aços IF Ti

A adição dos elementos estabilizantes necessita ser bem definida, através de cálculos estequiométricos. A condição para uma completa estabilização dos aços IF ao titânio pode ser expressa pela seguinte equação:^(1,2)

$$Ti_{estab} = 4\%C + 3,42\%N + 1,5\%S \quad (1)$$

O aumento na concentração de Ti confere melhorias nas propriedades de conformabilidade dos aços IF. Assim, quando se trabalha com aços IF ao titânio, é usual acrescentar mais Ti que o necessário para promover a completa estabilização dos elementos intersticiais. A equação (2) abaixo apresenta como é calculada a quantidade de Ti em excesso, representada por Ti_{exc} :^(1,2)

$$Ti_{exc} = Ti_{total} - Ti_{estab} = Ti_{total} - (4\%C + 3,42\%N + 1,5\%S) \quad (2)$$

O ponto ótimo refere-se à 0,04 % de Ti em solução.⁽³⁾

2 MATERIAIS E METODOLOGIA

A seguir, serão apresentadas as características dos materiais envolvidos e a metodologia de desenvolvimento adotada para adequação da LZC#3 a produção da especificação NBR 7008 ZEE GR1 para atendimento ao cliente de linha branca.

2.1 Materiais

2.1.1 Composições químicas dos aços

A Tabela 1 apresenta as faixas de composição química para os aços utilizados ao longo de todo o desenvolvimento da especificação NBR 7008 ZEE GR1 na LZC#3 da CSN, inclusive a faixa especificada por norma.

Tabela 1. Faixa de composição química dos aços utilizados no desenvolvimento da especificação NBR 7008 ZEE GR1

Aço	Composição Química – Faixa Especificada (% em Peso)								
	C	Mn	P	S	Al	Ti	Nb	N	B
Baixo C (B)	0,08 máx.	0,5 máx.	0,08 máx.	0,025 máx.	0,015 min.	0,007 máx.	0,007 máx.	0,009 máx.	0,0050 máx.
IF Ti 1	0,0050 máx.	0,2000 máx.	0,0200 máx.	0,0150 máx.	0,0200 min.	0,1000 máx.	0,0050 máx.	0,0050 máx.	-
IF Ti 2	0,0030 máx.	0,2000 máx.	0,0200 máx.	0,0150 máx.	0,0200 min.	0,0700 máx.	0,0040 máx.	0,0050 máx.	-
Norma Técnica ⁽⁴⁾	0,08 máx.	0,45 máx.	0,03 máx.	0,03 máx.	0,01 min.	-	-	-	-

Como pode-se notar, primeiramente foi utilizado um aço baixo carbono com adição de B, com ciclo de *over-aging*, ou seja, inicialmente com processamento na LZC#3 com posterior passagem pelo recozimento em caixa. Após análises dos resultados obtidos (envelhecimento), optou-se pela utilização de aços IF estabilizados ao titânio, sendo o aço IF Ti com composição química 1 escolhido. Posteriormente, com o desenvolvimento do novo aço IF Ti de composição química 2, para o segmento automotivo, com excelentes resultados de requisitos de produto e conforto operacional, foi decidido migrar para este aço, haja visto que as aplicações para o produto no cliente requerem níveis de estampagem profunda (*DDQ – Deep Drawing Quality*), assim como no setor automotivo.

2.1.2 Características do produto

O desenvolvimento da especificação NBR 7008 ZEE GR1 contempla diversas dimensões:

- espessura 0,50 mm e larguras 760 mm, 960 mm, 1.010 mm, 1.050 mm e 1.132 mm;
- espessura 0,60 mm e larguras 1.086 mm, 1.142 mm e 1.178 mm;
- espessura 0,65 mm e larguras 877 mm, 915 mm, 1.100 mm e 1.200 mm.

A Tabela 2 apresenta os requisitos de propriedades mecânicas para a referida especificação.

Tabela 2. Propriedades mecânicas requeridas pela especificação NBR 7008 ZEE GR1⁽⁴⁾

LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento	
		Base de Medida (mm)	Valor Min. (%)
140/260	380 Máx.	50	31

2.2 Metodologia

O desenvolvimento para a especificação NBR 7008 ZEE GR1 na LZC#3 seguiu a metodologia *QC Story*, que é traduzida na CSN como MASP (Método de Análise e Solução de Problemas), clássica para desenvolvimento de produtos. A metodologia *QC Story*, é baseada no consagrado ciclo PDCA (Figura 1).

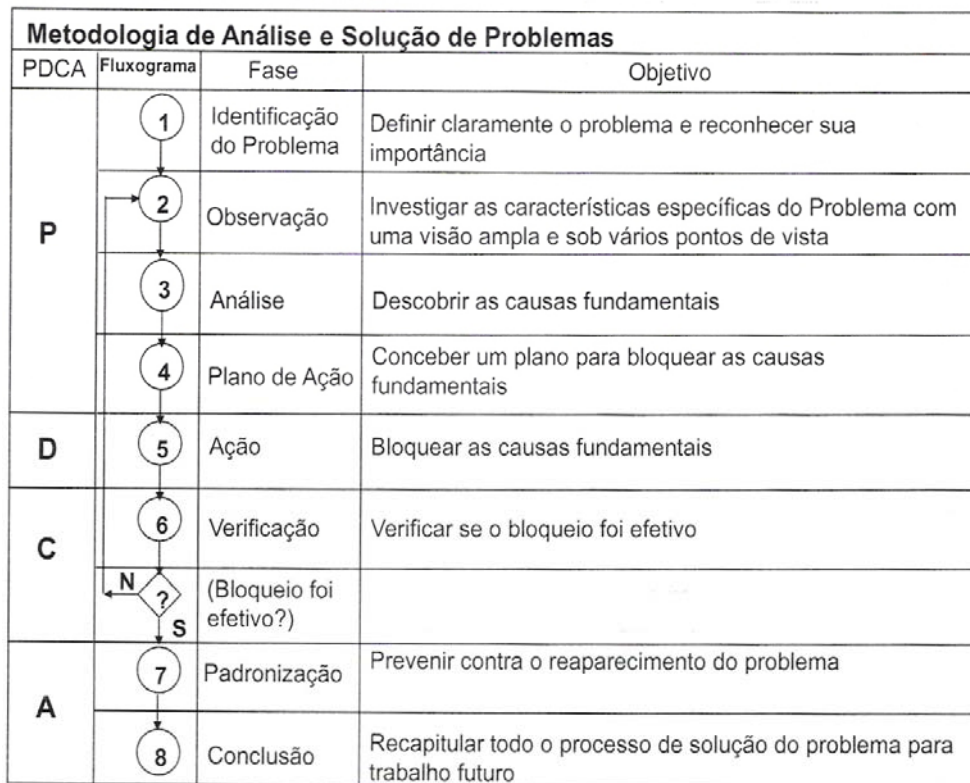


Figura 1. Metodologia QC Story empregada no desenvolvimento de produtos. O ciclo PDCA é um método gerencial de tomada de decisões para o alcance das metas estipuladas.⁽⁵⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todas as etapas de desenvolvimento da especificação NBR 7008 ZEE GR1 expostas a seguir, com seus respectivos resultados, baseiam-se na metodologia QC Story.

3.1 Planejamento das Ações

O planejamento das ações pode ser dividido, de maneira geral, em identificação do problema e elaboração do plano de ação, conforme descrição a seguir.

3.1.1 Identificação do problema – envelhecimento (utilização de aço baixo C com ciclo de *over-aging*)

Inicialmente, foi utilizado um aço baixo carbono ao boro, com ciclo de *over-aging*, ou seja, processamento na LZC#3 com posterior passagem pelo recozimento em caixa, com intuito de minimizar o risco de envelhecimento no cliente. As propriedades mecânicas apresentavam-se satisfatórias na liberação do material (Tabela 3). Contudo, tal via de processamento apresentava-se um tanto onerosa aliado ainda a ocorrência de envelhecimento, onde o material rompia durante os processos de conformação das peças quando processado no cliente após maior período no seu estoque.

Tabela 3. Propriedades mecânicas do aço baixo C ao B utilizado inicialmente

Propriedades Mecânicas	Faixa Especificada	Valores Médios	Desvio Padrão
LE (MPa)	140-260	207	15,4
LR (MPa)	380 Máx.	310	9,4
AI (%)	31 Min.	42	3,3

3.1.2 Plano de ação – introdução de aço ULC IF (capacitação tecnológica da LZC#3 e entrega direta)

Depois da referida análise da rota de processamento anterior, foi observado a necessidade de utilização de um aço que proporcionasse melhor desempenho (eliminação do envelhecimento) e diminuição dos custos associados à rota mais complexa empregada. Sendo assim, verificou-se a possibilidade de utilização de aços ULC IF, já que foram realizados investimentos anteriormente, como sistema de controle automático de tensões no forno que possibilita minimizar a incidência de rugas e analisador de gases para aumentar a eficiência de combustão dos gases nos tubos radiantes e eliminar a ocorrência de pontos quentes nas tubulações do forno. Porém, era necessário capacitar a LZC#3 para a produção do referido aço. Portanto, o desenvolvimento de aços IF na LZC#3 pode ser dividido em duas etapas macro.

3.1.2.1 Primeira etapa: utilização do aço IF Ti 1

O desenvolvimento de aços IF iniciou-se com a utilização da liga 1. Contudo, a LZC#3 apresenta limitações quanto às condições de processamento do forno de recozimento. Como esta linha de zincagem era até então demandada apenas para produção de materiais com qualidade comercial (os quais necessitam de temperaturas de encharque menores) os componentes do forno, como por exemplo, os tubos radiantes, são de qualidade adequada ao processamento dessa classe de materiais.

Uma vez que os aços IF apresentam maiores temperaturas de recristalização, devido à adição dos elementos estabilizantes Ti e/ou Nb, é gerado um desgaste acentuado de componentes do forno, como os citados tubos radiantes, em decorrência de ciclos térmicos mais altos, uma vez que a linha de galvanização passa a trabalhar próximo de seu limite operacional, referente às condições de forno. Isso gera instabilidade operacional em virtude de sucessivos rompimentos dos tubos radiantes. Outro fato relacionado ao emprego de maiores temperaturas de recozimento é a grande incidência de rugas, que são defeitos de superfície. Na tentativa de eliminá-las, parâmetros de processo são modificados, como o aumento na velocidade da chapa, com intuito de propiciar uma menor exposição do material no forno. Porém, isso gera um aumento na amplitude de dispersão das propriedades mecânicas, como conseqüência da variação da velocidade ao longo dos processamentos. Em alguns casos até resto de encruamento foi evidenciado.

3.1.2.2 Segunda etapa: migração para o aço IF Ti 2 e aumento de espessura do material laminado a quente

Conforme exposto anteriormente, a produção de aços IF requer trabalhar-se com temperaturas de encharque mais elevadas, assim, havia a necessidade de redução das temperaturas de recozimento da linha para obtenção da combinação de melhor conforto operacional (menor instabilidade) e eliminação ou minimização das rugas ocorrentes.

Portanto, foi proposta a migração para o aço IF Ti de composição química 2, com melhor *alloy desing* que representa uma nova geração de aços para altos níveis de conformação, o que proporciona a CSN uma maior competitividade, já que esta liga é hoje amplamente empregada para a produção das especificações do segmento automotivo, em função de sua melhor performance em termos de conformabilidade (*EDDQ* e *DDQ*). Este aço é balanceado estequiometricamente em termos de titânio em excesso e utilizando teor de carbono abaixo de 30 ppm. Assim, possibilita-se

trabalhar com menores temperaturas de recozimento, pois há uma diminuição da temperatura de recristalização decorrente do melhor *alloy desing*. Aliado a isso, com o objetivo de otimizar ainda mais as condições de processo na LZC#3, foi otimizado o percentual de redução a frio (Tabela 4).

Tabela 4. Alterações nas espessuras do material laminado a quente e efeito no percentual de redução a frio

Espessura a Frio (mm)	Esp. a Quente Anterior (mm)	Esp. a Quente Posterior (mm)	Redução a Frio Anterior (%)	Redução a Frio Posterior (%)
0,50	2,7	3,0	81	83
0,60	3,0	3,5	80	83
0,65	3,5	3,9	81	83

Com a maximização dos percentuais de redução a frio, foi possível trabalhar-se com menores ciclos de recozimento, em virtude da redução da temperatura de recristalização.

3.2 Aplicação do Plano de Ação – Bloqueio das Causas Fundamentais

Com a aplicação do plano de ação elaborado, que apresenta o efeito combinado de migração de liga e aumento da espessura do material laminado a quente, visando redução da temperatura de recristalização e melhoria das propriedades mecânicas (centralização das médias e diminuição da dispersão), foi realizada uma ação de bloqueio das causas fundamentais. A Figura 2 apresenta o efeito da migração de liga nas propriedades mecânicas do material, evidenciada pelo limite de escoamento, para um mesmo percentual de redução a frio.

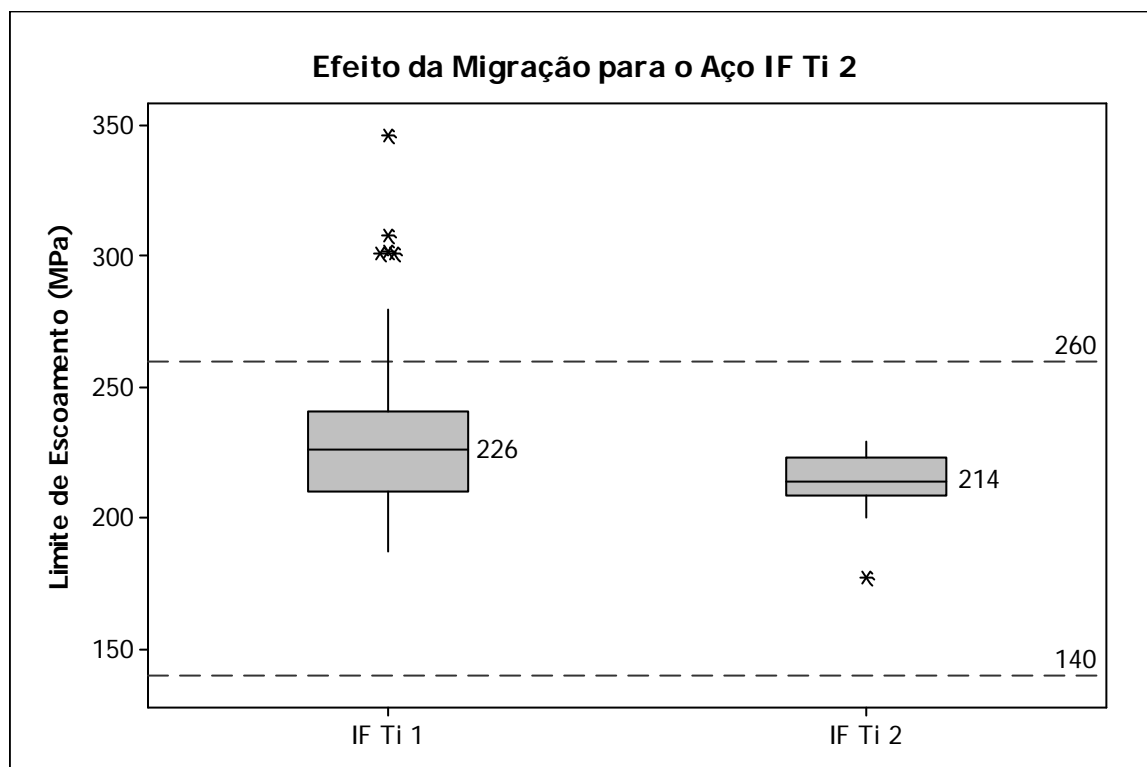


Figura 2. Análise comparativa do limite de escoamento para os aços IF Ti 1 e 2 onde uma grande melhoria é evidenciada com a migração. Análise realizada com utilização do *software* estatístico MINITAB 15.1.

Observa-se uma redução da mediana para mais próximo do valor central da faixa especificada aliado à redução da amplitude de dispersão, onde não existem valores fora dos limites de especificação.

3.3 Verificação dos Resultados

Os resultados de propriedades mecânicas para a especificação NBR 7008 ZEE GR1 produzida na LZC#3, para os aços IF Ti 1 e 2 estão apresentados conforme as Figuras 3, 4 e 5.

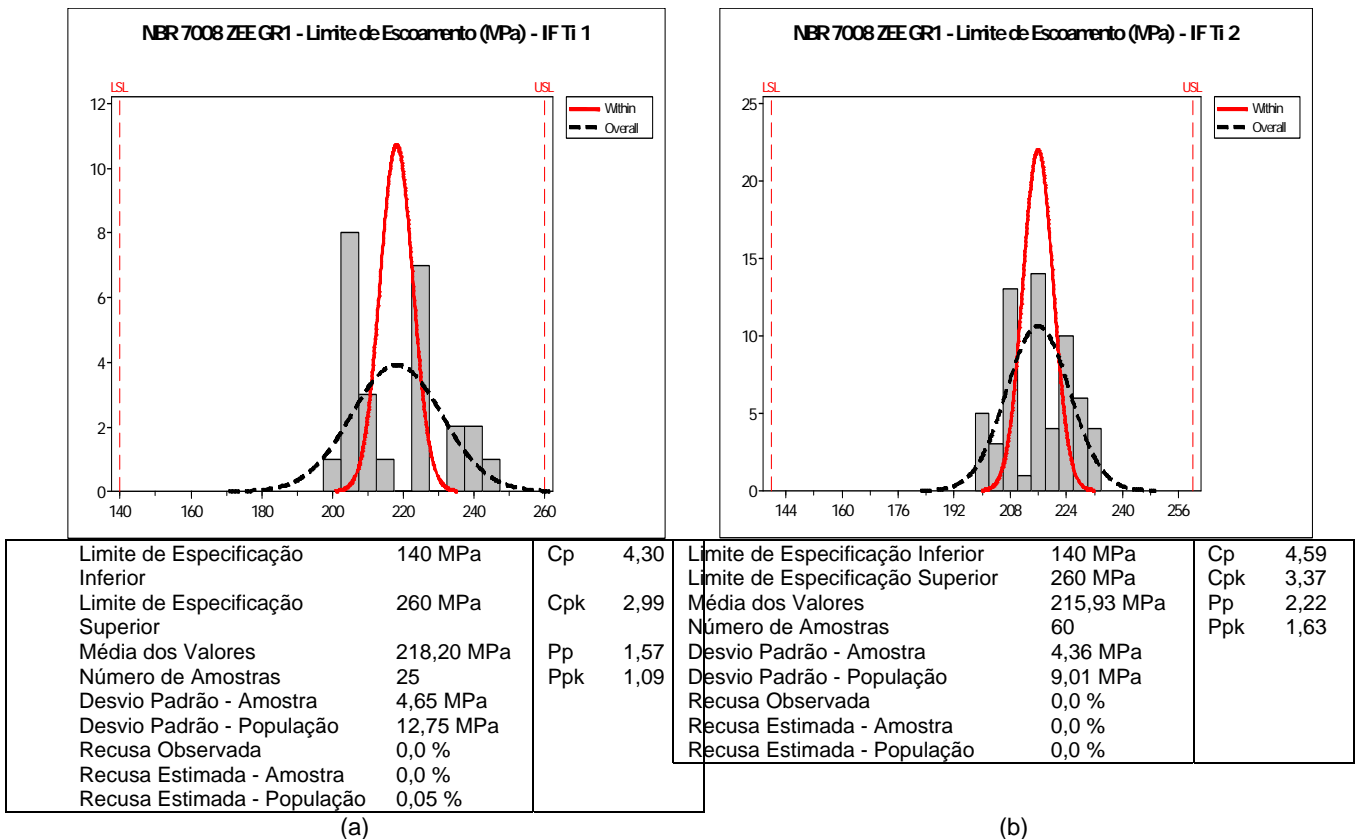
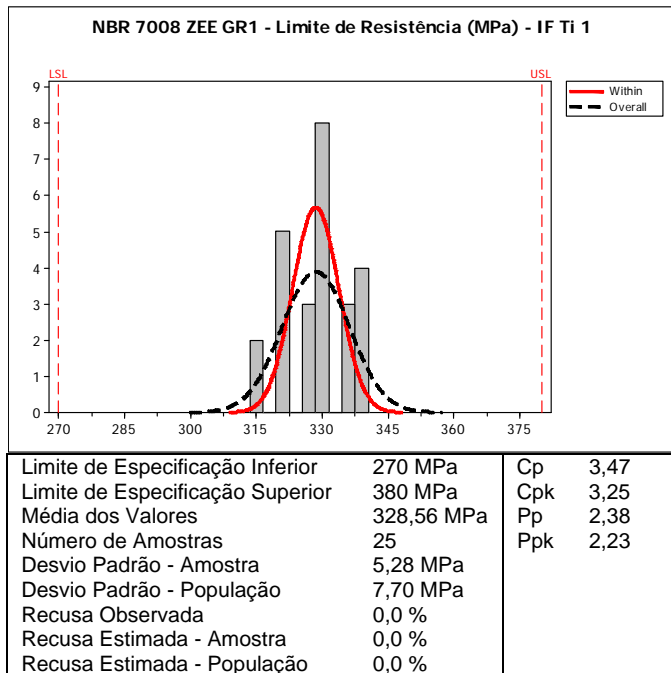
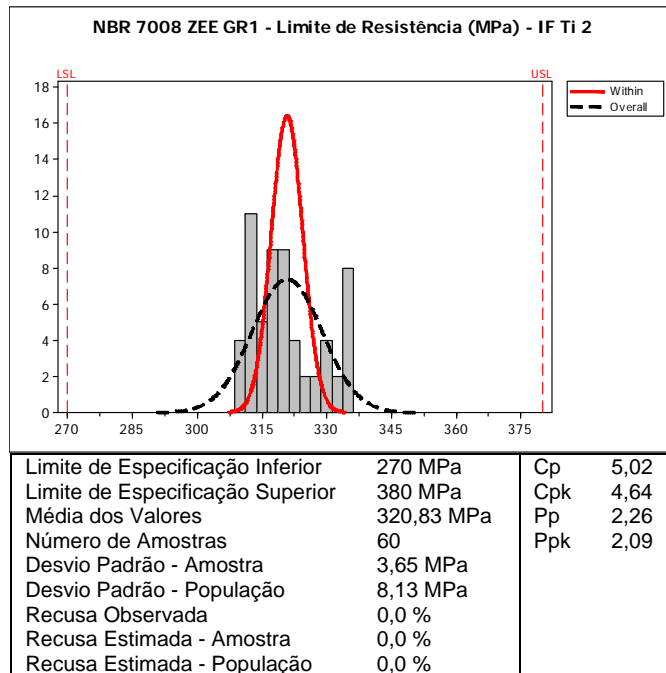


Figura 3. Capacidade de processo para a especificação NBR 7008 ZEE GR1 para o limite de escoamento, obtida por meio da utilização do *software* estatístico MINITAB 15.1. Em (a) IF Ti 1; e (b) IF Ti 2.

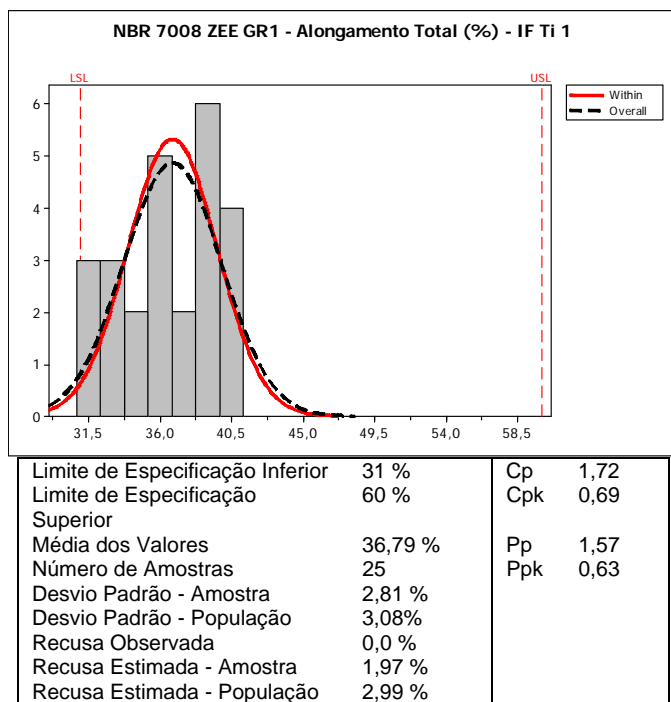


(a)

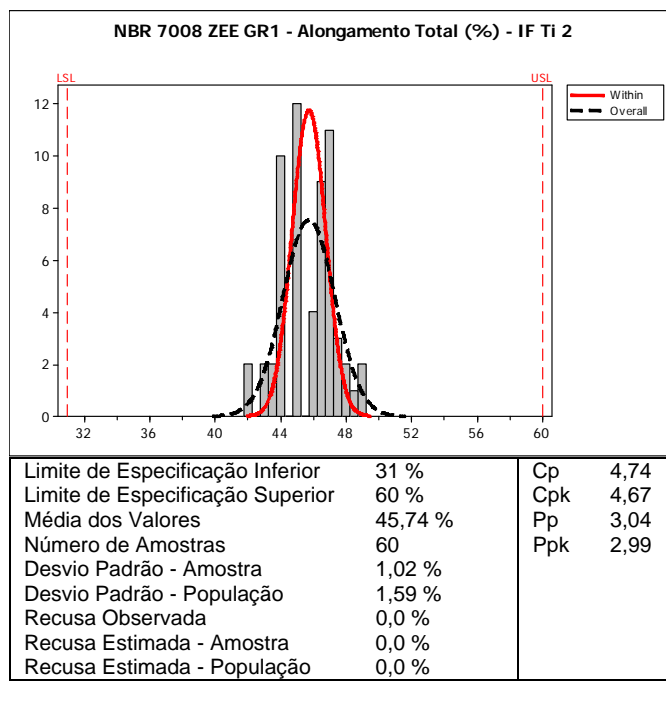


(b)

Figura 4. Capacidade de processo para a especificação NBR 7008 ZEE GR1 para o limite de resistência, obtida por meio da utilização do *software* estatístico MINITAB 15.1. Em (a) IF Ti 1; e (b) IF Ti 2.



(a)



(b)

Figura 5. Capacidade de processo para a especificação NBR 7008 ZEE GR1 para o alongamento total, obtida por meio da utilização do *software* estatístico MINITAB 15.1. Em (a) IF Ti 1; e (b) IF Ti 2.

Com a migração para o aço IF Ti 2, houve um ganho na diminuição da resistência mecânica do material, o que promove uma maior conformabilidade do material na estampagem das peças no cliente. Também nota-se uma menor dispersão das propriedades, ocasionada pela diminuição da instabilidade operacional.

3.4 Padronização – Avaliação dos Resultados

Como consequência dos resultados, em termos de propriedades mecânicas e ocorrência de rugas, as dimensões com largura menor que 1.000 mm apresentaram resultados excelentes, com padronização das condições de processamento na LZC#3. Uma segunda etapa do trabalho envolverá as dimensões com largura superior a 1.000 mm, que são críticas em termos de incidência de rugas, onde são necessárias condições operacionais com o mínimo de variação possível, sendo preciso, portanto, de mais alguns investimentos na linha. Assim, os materiais dessa classe de espessura e largura com requisitos de qualidade peça exposta estão sendo processados na CSN Porto Real e aqueles destinados a peças internas, na LZC#2.

4 CONCLUSÕES

O desenvolvimento da especificação NBR 7008 ZEE GR1 na LZC#3, com atendimento ao segmento de linha branca, permitiu:

- capacitação tecnológica da LZC# 3 para produção de aços ultra baixo C (IF);
- manutenção do *market share* da linha branca com o deslocamento do material para a referida linha de galvanização;
- aumento da carteira de produção da LZC#3;
- redução dos custos associados à utilização de aço baixo C com ciclo de *over-aging* e melhor desempenho no cliente, com eliminação do envelhecimento;
- identificação da necessidade de melhorias na LZC#3, através de investimentos na mesma, para possibilitar maior estabilidade operacional e favorecer a produção de materiais com largura acima de 1000 mm que estão sendo processados na CSN Porto Real (peça exposta) e LZC#2 (peça interna);
- aumento na disponibilidade de produção da CSN Porto Real para aços mais complexos e de maior valor agregado, tornado-a mais competitiva; e
- possibilidade de produção futura das especificações do segmento automotivo na LZC#3, para proporcionar a CSN Porto Real produzir ainda mais materiais de maior valor agregado.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os envolvidos durante as etapas de desenvolvimento dos aços IF na LZC#3 da CSN.

REFERÊNCIAS

- 1 FOLEY, Robert; MATLOCK, David; KRAUSS, George. *Metallurgical Review of Process for Obtaining Strength and r-value in Galvannealed Sheet Steels*. 42º MWSP Conf. Proc., v. 38, 2000, p. 455-468.
- 2 TITHER, Geoffrey; STUART, Harry. *Automotive Steels-Recent Developments in Steels Used in the Manufacture of Automobiles and Trucks*. Niobium Products Company.
- 3 PRADHAN, R. *Cold-rolled interstitial-free steels: a discussion of some metallurgical topics*. Proceedings of international forum for physical metallurgy of if steels, Toquio, ISIJ INTERNATINAL, 1996, p.165-177.

- 4 Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. *Chapas e Bobinas de Aço Revestidas com Zinco ou com Liga Zinco-Ferro Pelo Processo Contínuo de Imersão a Quente – Especificação: NBR 7008:2003*. Rio de Janeiro: 2003, 8 p.
- 5 OLIVEIRA, Ubaldo Caires de. *Metodologia de Análise e Solução de Problemas (MASP)*. Gerência de Engenharia Industrial – IGE, 2008, 65 p.