

OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, DO AÇO ULTRA BAIXO CARBONO ESTABILIZADO AO NIÓBIO E TITÂNIO, DA CLASSE EDDQ (GA), POR MEIO DE PROJETOS DE EXPERIMENTOS (DOE)¹

Marcelo Pereira de Oliveira²

Fabiano Augusto Vallim Fonseca³

Flávia Tereza dos Santos Fernandes Tolomelli⁴

João José de Moraes⁵

Márcio Pedrosa Bastos²

Resumo

O presente trabalho aborda aços IF estabilizados ao Nb-Ti implantados na GalvaSud com o objetivo de eliminar desvios internos por propriedades mecânicas. O método utilizado denominado Operação Evolucionária (EVOP, acrônimo de evolutionary operation) adequa-se ao caso de processos siderúrgicos contínuos, uma vez que não é necessário interromper as operações para aplicá-lo. Esse método utiliza-se dos princípios do planejamento de experimentos (DOE) através de um procedimento sistemático para investigar os efeitos de variáveis e de suas interações sobre respostas de interesse. Adicionalmente, consiste na introdução sistemática de pequenas mudanças nos níveis das variáveis operacionais de um processo. Com a utilização dessa técnica foi possível reduzir a zero o total de desvios de bobinas e sucateamento de fardos através do ajuste da composição química. A alteração realizada permitiu significativa melhoria no desempenho do produto em prensa, na qualidade superficial e na maximização dos resultados de produção deste aço na CSN.

Palavras-chave: Aço; *Interstitial free*; Galvanização.

IMPROVEMENT OF THE MECHANICAL PROPERTIES, OF THE ULTRA LOW CARBON STEEL STABILIZED TO THE NIOBIUM AND TITANIUM, GRADE EDDQ (GA), BY PROJECTS OF EXPERIMENTS (DOE)

Abstract

Nb-Ti-added IF steels were implanted at GalvaSud aiming reducing to zero the occurrence of mechanical property deviations in the plant. Evolutionary Operation (EVOP) was used once it is suitable to steelmaking continuous processing, since it does not require stopping operation during its use. EVOP uses Design of Experiments (DEO) as its basis by investigating variable effects on the results of interest. Additionally, it consists in continuously introducing incremental changes on the operation variable levels of a processing step. Using this technique it was possible reducing to zero the result on total coil deviation and scrapping by adjustments on the steel chemistry. The overall change allowed a significant improvement on the product performance on the press shop, on surface quality and the maximization of the production results for this steel grade at CSN.

Key words: Steel; *Interstitial free*; HDG

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Gerência Geral de Operações da GalvaSud, Porto Real.

³ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., ASQ CQE & CQA, Gerência Geral Desenv. Produto CSN, V.Redonda.

⁴ Engenheira Metalurgista, M.Sc., Gerência Geral Desenvolvimento de Produto CSN, V. Redonda.

⁵ Técnico Químico, Gerência Geral de Operações da GalvaSud, Porto Real.

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de atendimento de novas especificações com aço IF em partes de grande complexidade na fabricação de automóveis, a CSN mediante o desafio existente nesse mercado competitivo utilizou-se de ferramentas para otimizar o produto oferecido ao cliente e minimizar perdas de produtividade em suas plantas (Usina Presidente Vargas-UPV e GalvaSud). UPV entrega à GalvaSud bobinas laminadas a frio *full-hard* para galvanização em linha contínua, que por sua vez entrega a bobina/blank galvanizado ao cliente e/ou ao seu processador.

Especificamente, o fornecimento de aços para um conjunto de partes de um projeto em desenvolvimento de um dos clientes foi o alvo. O conjunto era constituído de 15 itens, bobinas e blanks. Desses itens, duas peças foram identificadas como de maior importância, devido ao seu grau de severidade em estampagem: painel externo lateral (veículo 1) (Figura 1a); e painel externo lateral (veículo 2) (Figura 1b).



(a) (b)
Figura 1. Lateral Montana (a) e lateral Corsa (b).

Os primeiros fornecimentos (composição química de IF-TiNb – Tabela 1) tiveram resultados satisfatórios em prensa na fase de *try-out* pelo cliente. Entretanto, em fornecimento posterior de maior escala, foi observada a ocorrência de rupturas em peças estampadas (Figura 2) e de característica superficial inadequada, denominada “marmorização” (*streak marks*). A intensidade da ocorrência superficial, com severidade aumentada após a estampagem da peça, por vezes comprometia a produção da peça. Assim, posteriormente, foi necessário o aumento de recusa dos materiais antes de serem enviados ao cliente.

Visando contornar as limitações apresentadas pelo produto em sua aplicação e continuidade do fornecimento, a ocorrência de marmorização/oxidação seletiva dos elementos presentes em cada composição de substrato de aço foi investigada, visando a melhor combinação para otimizar o desempenho do produto em prensa e seu aspecto superficial. Realizou-se, então, a alteração da composição química do aço IF-TiNb (Tabela 1), para a do aço IF-NbTi (Tabela 2), evidenciando-se que a estabilização foi alterada pela diminuição dos teores de Ti e Si no aço.

A nova composição de aço IF-NbTi, apresentou, em um segundo momento, aumento nos desvios internos por propriedades mecânicas (limite de escoamento) fora da faixa especificada pelo cliente em bobinas e em *blanks* configurados na GalvaSud (Figura 3).

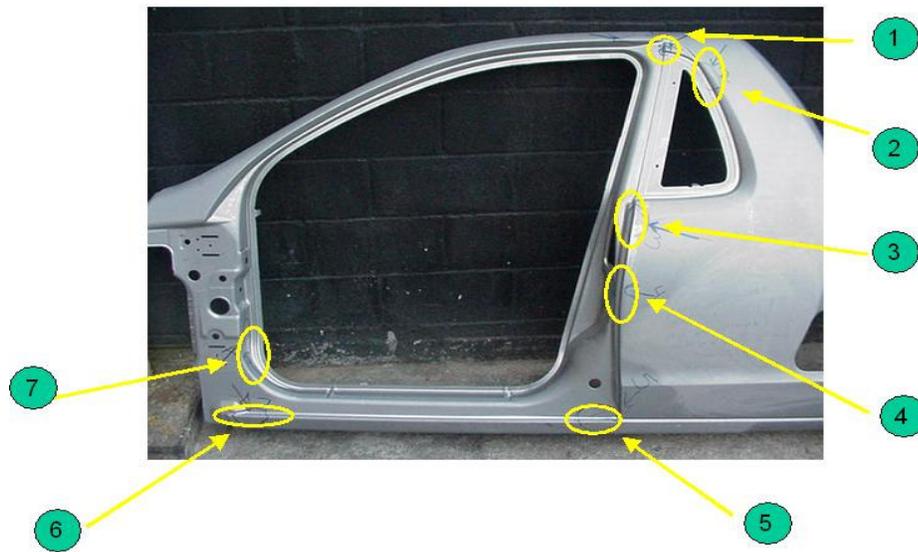


Figura 2. Painel Lateral com 7 pontos com rompimento.

Tabela 1. Aço IF estabilizado ao Ti-Nb (% em massa)

C	S	N	Ti	Nb	Mn	P	Si	Al
<0,0050	<0,020	<0,0070	<0,05	<0,030	<0,20	<0,020	>0,05	<0,040

Tabela 2. Aço IF estabilizado ao Nb-Ti (% em massa)

C	S	N	Ti	Nb	Mn	P	Si	Al
<0,0050	<0,020	<0,0070	<0,025	<0,025	<0,20	<0,020	<0,02	<0,040

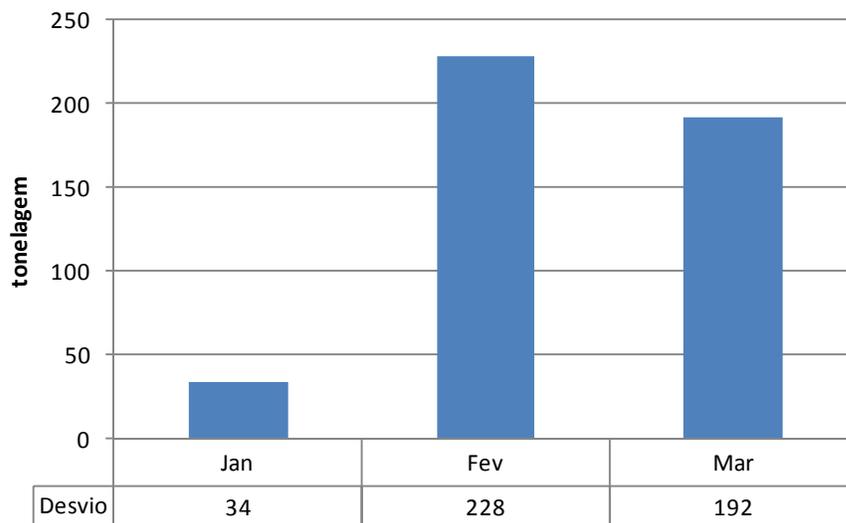


Figura 3. Desvios por propriedade mecânica não conforme no aço IF-NbTi no início de 2008.

O objetivo deste trabalho é avaliar, via Operação em Evolução (EVOP), os efeitos das condições de projeto de liga nas propriedades mecânicas do aço IF e identificar o melhor balanço de composição química/processamento que atenderia

plenamente aos requisitos do cliente (propriedades mecânicas e superficiais), reduzindo a ocorrência de material não conforme (recusas observadas na GalvaSud). Assim, o resultado seria possibilitar a CSN atender, em nível de classe mundial, qualquer especificação de material galvanizado da classe EDDQ (GA) para a indústria automobilística.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Os aços ultra baixo carbono do tipo IF (*Interstitial Free*) que datam da década de 60, tem hoje aplicação em larga escala, em todo mundo. O foco principal de utilização desses aços é o segmento automotivo. O aço IF pode ser estabilizado ao Ti, Nb ou a combinação destes dois elementos. A importância da produção desses aços está no efeito benéfico que o baixo percentual dos elementos C e N trazem para a estampabilidade do produto final, cuja estabilização de C e N antes das etapas de laminação a frio e recozimento é essencial para obtenção da textura {111} <uvw> necessária à boa estampabilidade do produto. Nitrogênio é considerado efetivamente removido de solução sólida na ferrita pela formação de nitreto de alumínio (AlN) ou nitreto de titânio (TiN), ao passo que para a estabilização ou remoção do carbono residual em solução sólida intersticial, são necessárias adições de titânio (Ti) e nióbio (Nb). Adições de Ti e/ou Nb removem carbono pela formação de precipitados contendo esse elemento antes das etapas de laminação a frio e recozimento. Na prática, altas temperaturas de bobinamento são necessárias para promover a formação de carbonetos e nitretos grosseiros que são menos prejudiciais ao processo de estampabilidade.⁽¹⁾ Os precipitados que determinam o grau de estabilização presente em um aço particular são TiN, TiS, Ti₄C₂S₂, TiC, MnS e NbC. Como pode ser visto, o Ti forma precipitados contendo N, S e C. Destes precipitados, o TiN é o mais estável até mesmo quando se compara com o AlN. A formação dos precipitados de TiS, Ti₄C₂S₂, TiC, MnS irá depender da temperatura utilizada no reaquecimento de placas e da quantidade de cada elemento no aço⁽²⁾. Como consequência, a quantidade de Ti que precisa ser adicionada ao aço para se obter um produto estabilizado, depende da quantidade de Ti que é utilizada para a formação de outros precipitados. Para a completa estabilização dos aços IF a adição de Ti está acima daquela necessária para se combinar completamente com N, S e C e é dada pela equação 1.⁽³⁾

$$\text{Ti em excesso} = \%Ti - 48/14(\%N) - 48/32(\%S) - 48/12(\%C) \quad \text{Equação 1}$$

O excesso de Ti, embora seja muito benéfico para a estampabilidade do aço pode ter um efeito detrimental para o produto *galvannealed*, pois o Ti, acelera o processo de formação da liga Zn-Fe tornando seu controle mais difícil e contribuindo para a ocorrência de um defeito superficial denominado de marmorização. Além disso, partículas de óxidos estáveis na superfície e ligeiramente abaixo da superfície podem também causar outros defeitos superficiais que também podem servir como fontes de nucleação da estrutura de *outburst* durante a produção do *galvannealed*.

Ao contrário do Ti, o controle do teor de C em solução sólida no aço estabilizado pelo Nb é muito melhor, pois o Nb disponível para a formação do NbC é simplesmente dado pela quantidade de Nb total. Porém como o NbC é menos estável do que o TiC, parte do NbC pode se dissolver durante o recozimento em altas temperaturas. Contudo, o excesso de Nb tem um efeito deletério nas propriedades mecânicas. Para aplicações de *galvannealed* peças expostas, os aços

Nb-Ti apresentam uma vantagem adicional sobre os aços estabilizados somente ao Ti em relação à qualidade superficial, mas apresenta desvantagens em relação à propriedades mecânicas. Para a estabilização completa dos aços Nb-Ti, adiciona-se Ti em quantidade estequiométrica suficiente para combinar-se somente com N e S de tal maneira que o Ti não fique em excesso, e adiciona-se Nb para a completa estabilização do C de acordo com a equação 2⁽⁴⁾ e 3.⁽⁵⁾

$$48/14(\%N) \leq \%Ti \leq 48/14(\%N) + 48/32(\%S) \quad \text{Equação 2}$$

$$\%Nb \geq 93/12(\%C) \quad \text{Equação 3}$$

Mantendo-se o teor Ti baixo, evitam-se defeitos superficiais, enquanto o Nb estabiliza o C e melhora a resistência ao powdering. Assim, pode ser observado que a estequiometria exerce um papel fundamental no comportamento do aço, não somente em termos mecânicos, pelo efeito de limpeza da matriz ferrítica melhorando a estampabilidade do produto final, mas também em termos de qualidade superficial através da redução da quantidade de elementos em solução sólida no aço, garantindo uma menor propensão à oxidação desses elementos que podem gerar defeitos superficiais comprometendo o uso do produto.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O Planejamento de Experimentos (em inglês *Design of Experiments* ou *DOE*) é uma técnica utilizada para se planejar experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo. Esses planejamentos têm utilidade na varredura de fatores, isto é, identificação dos fatores que afetam o desempenho de um processo. Às vezes isso é chamado de caracterização do processo. Uma vez identificado o subconjunto apropriado de variáveis de um processo, o próximo passo costuma ser a otimização do processo, ou seja, a determinação do conjunto de condições de operação para as variáveis do processo, que resulte no melhor desempenho do mesmo. A metodologia de superfície de resposta é uma abordagem para otimização de processos elaborada no início da década de 50 e aplicada inicialmente em indústrias químicas e de processamento. Outra metodologia que permite a otimização do processo é a operação evolucionária (EVOP, acrônimo de *evolutionary operation*), uma abordagem para a busca de um desempenho ótimo.⁽⁶⁾

A necessidade de se aumentar a eficiência operacional de processos industriais é cada vez maior, de modo a garantir aspectos de qualidade, de ordem econômica, e ambiental. Um método útil, no caso de processos siderúrgicos contínuos, do ponto de vista prático, o EVOP, uma vez que não é necessário interromper as operações para aplicá-lo. Este método é um procedimento sistemático para se investigar os efeitos de variáveis e de suas interações sobre respostas de interesse. O EVOP é um método de operações rotineiras que utiliza os princípios do planejamento de experimentos e consiste na introdução sistemática de pequenas mudanças nos níveis das variáveis operacionais de um processo. Admite-se que as modificações nas variáveis sejam suficientemente pequenas a fim de que não ocorram perturbações sérias na qualidade do processo, mas grandes o bastante

para que eventualmente se descubram melhoramentos potenciais no desempenho do processo.

O objetivo deste estudo é diminuir o limite de escoamento e sua dispersão no aço IF-NbTi, aplicado na classe de escoamento *EDDQ*, com revestimento *galvannealed* (GA) na GalvaSud, com a execução de um programa EVOP. O estudo de caso é baseado em um banco de dados referente às operações desta mesma linha. Ao final do trabalho evidenciou-se um ganho de qualidade, a partir de mudanças de pequena magnitude nas condições operacionais.

3.1 Identificação do Problema

Com base nos valores de propriedade mecânica (limite de escoamento) foi realizada a análise estatística do material para atendimento da especificação GMB EMS 1508 CSC no primeiro semestre de 2008.

O comportamento desta variável é ilustrado na Figura 4.

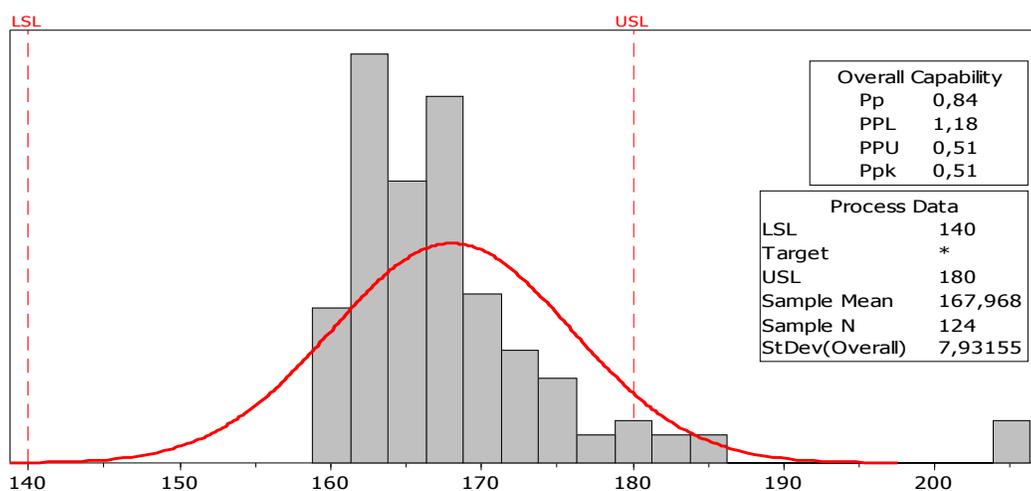


Figura 4. Análise de capacidade do limite de Escoamento no aço IF-NbTi.

Evidenciou-se nitidamente na Figura 4 o deslocamento da curva normal (desvio assimétrico positivo) para limite de escoamento (LE) do aço IF-NbTi, extrapolando em alguns casos o limite de controle superior especificado.

O valor médio e o desvio padrão do aço apresentavam-se em 168 MPa e 7,9 MPa. A recusa observada (valores encontrados acima do limite de controle de especificação) em 5%. A recusa estimada pelo teorema do limite central em 6,5%. E o Ppk (*process performance capability*) em 0,51 (processo incapaz).

3.2 Operação Evolucionária

Após a identificação do problema, tornou-se necessário a análise do projeto de liga, principalmente dos elementos: carbono, nióbio, titânio e conseqüentemente do C_{ss} (carbono em solução sólida) e N_{ss} (nitrogênio em solução sólida) e suas correlações com o limite de escoamento (LE).

Através da metodologia EVOP foram construídas *Contour plots* entre C_{ss} (estequiométrico, isto é, calculado pelos teores da composição química da corrida) e

Nss (estequiométrico) tendo com variável resposta o limite de escoamento (MPa), apresentado na Figura 5.

Evidenciam-se, pela Figura 5, que o incremento do limite de escoamento (LE) ocorre quando existe a presença de carbono e/ou nitrogênio em solução sólida, isto é, para C_{ss} maior que 0 ppm e N_{ss} maior que 0 ppm (círculo vermelho).

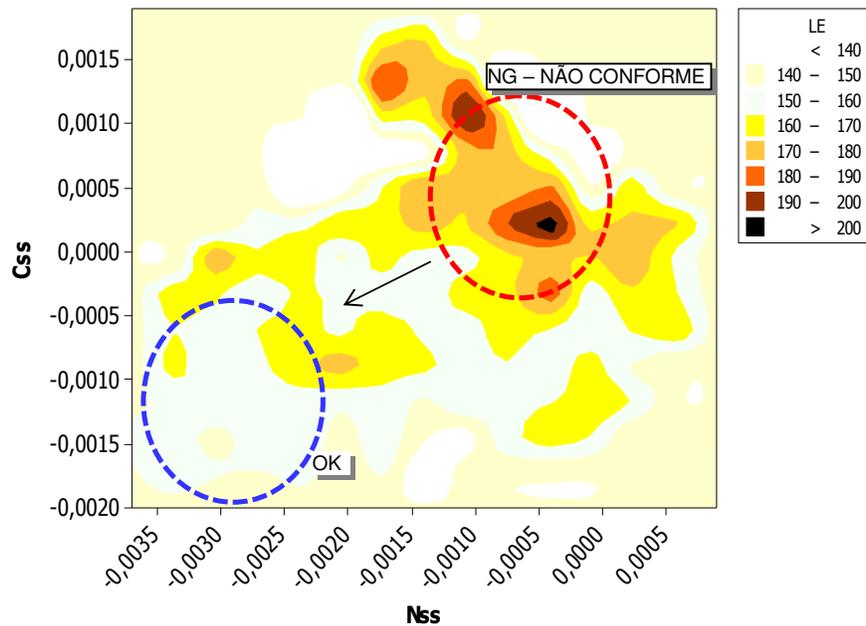


Figura 5. *Contour plots* entre o C_{ss} (ppm) x N_{ss} (ppm) x LE (MPa).

Na Figura 5 também é possível identificar que a melhor região a ser objetivada pelo projeto de liga do aço é ao redor do círculo azul (região OK do gráfico), devido ao decréscimo do limite de escoamento por não apresentar a presença de solutos (C_{ss} e N_{ss}).

Também foram construídas *Contour plots* entre carbono e titânio tendo com variável resposta o limite de escoamento (MPa), apresentado na Figura 6 e *Contour plots* entre nióbio e titânio tendo com variável resposta o limite de escoamento (MPa), apresentado na Figura 7.

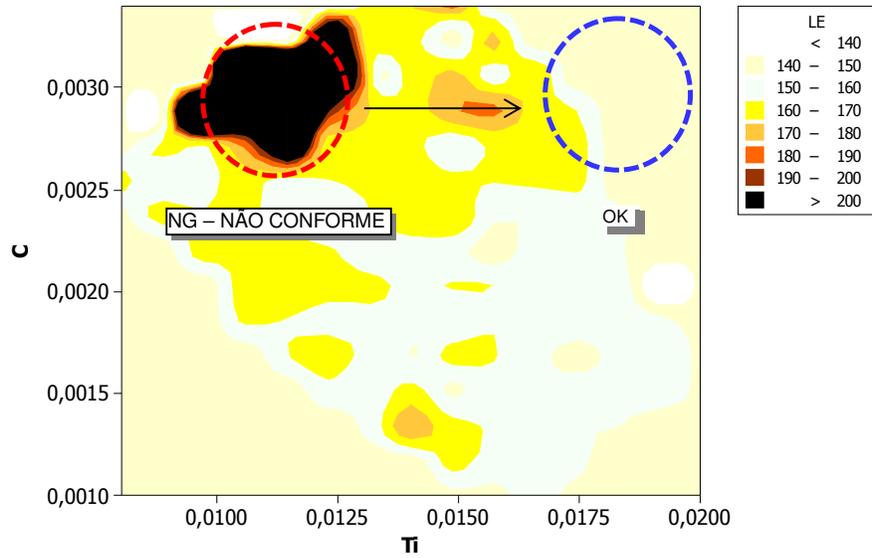


Figura 6. Contour plots entre o carbono (%) x titânio (%) x LE (MPa).

Na Figura 6, a relação entre os teores de carbono e titânio, evidencia-se o incremento do limite de escoamento (LE) com maiores teores de carbono (C) e baixos teores de titânio (Ti) – círculo vermelho. Para um mesmo teor de carbono, ocorre uma redução no limite de escoamento com o aumento do teor de titânio - círculo azul.

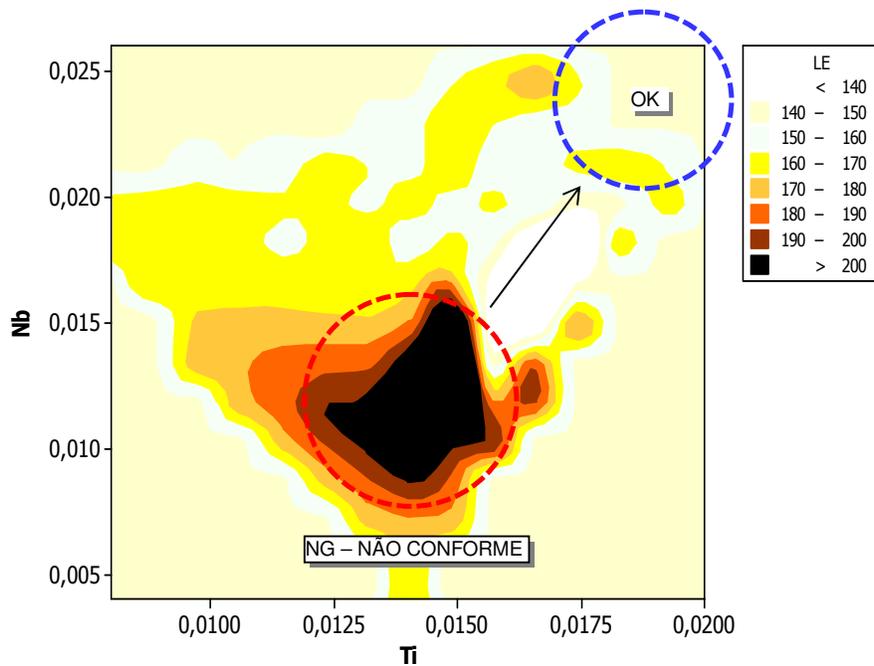


Figura 7. Contour plots entre o nióbio (%) x titânio (%) x LE (MPa).

Na Figura 7, melhores valores de limite de escoamento são obtidos no quadrante superior direito do gráfico (círculo azul - OK), isto é, com a combinação de teores de Nb e Ti mais elevados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a identificação do problema e a análise das variáveis, o projeto de liga do aço IF-NbTi foi otimizado, isto é, teve suas faixas de composição química alteradas, evidenciando os elementos titânio e nióbio. Visando assim melhor conformabilidade e resistência ao envelhecimento por deformação.

Estas alterações são mostradas na Tabela 3 e 4.

Tabela 3. Aço IF estabilizado ao Nb-Ti (% em massa)

C	S	N	Ti	Nb	Mn	P	Si	Al
<0,0050	<0,020	<0,0070	<0,025	<0,025	<0,20	<0,020	<0,02	<0,040

Tabela 4. Novo Aço IF estabilizado ao Nb-Ti, com otimização do projeto de liga (% em massa)

C	S	N	Ti	Nb	Mn	P	Si	Al
<0,0050	<0,020	<0,0070	>0,025	>0,025	<0,20	<0,020	<0,02	<0,040

Após dois meses de produção, com o aço IF-NbTi, com o novo projeto de liga ajustado, foram produzidas 2.700 t, e assim realizou-se novamente a análise estatística do limite de escoamento (LE) (Figura 8).

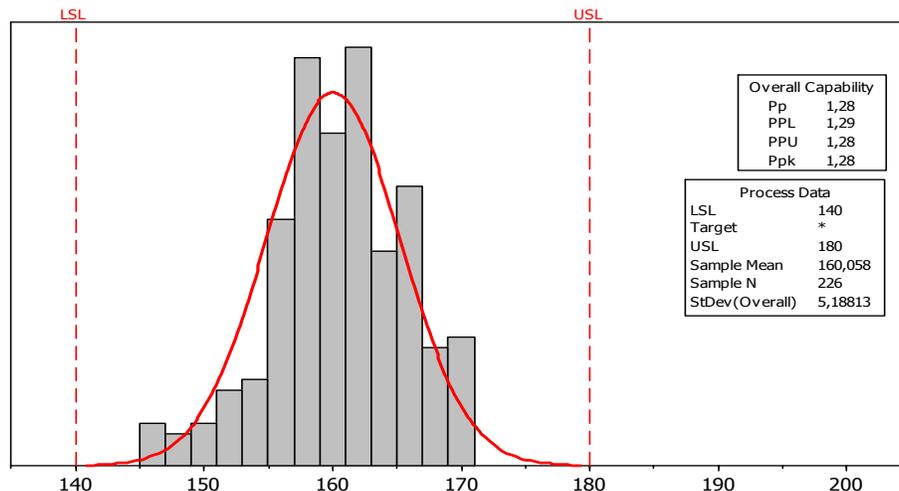


Figura 8. Análise da capacidade do limite de escoamento com o novo projeto de liga IF-NbTi.

Como resultado desta análise tem-se a curva normal centrada entre os limites de controle especificados (entre 140 MPa e 180 MPa). O valor médio e o desvio padrão do aço IF-NbTi apresentou um decréscimo de 168 MPa e 7,9 MPa para 160 MPa e 5,2 MPa. A recusa observada apresentou um decréscimo de 5,0 % para 0%. A recusa estimada pelo teorema do limite central apresentou um decréscimo de 6,5% para 0,02%. O Ppk incrementou de 0,51 para 1,28. Apresentados de forma resumida na Tabela 5.

Tabela 4. Sumário dos resultados da otimização do aço IF-NbTi

Sumário dos resultados	Aço IF-NbTi	Novo Aço IF-NbTi
Média	168	160
Desvio padrão	7,0	5,2
Ppk	0,51	1,28
Recusa observada	5%	0%
Recusa estimada (TLC)	6,5%	0,02%

Conseqüentemente, após a alteração do projeto de liga os desvios por limite de escoamento fora do especificado foram reduzidos de uma média de 94 t/mês para zero, verifica-se na Figura 9 a evolução das recusas por limite de escoamento fora de faixa com o novo aço IF-NbTi em 2008.

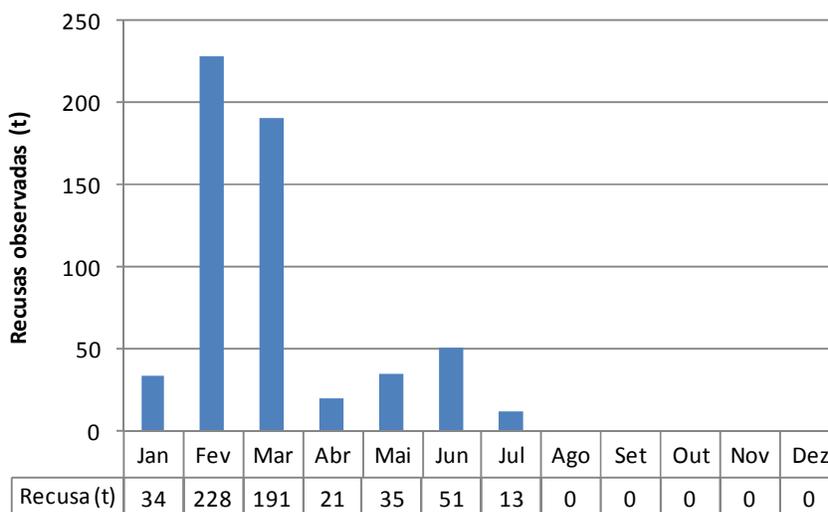


Figura 9. Evolução das recusas por limite de escoamento fora de faixa com o novo aço IF-NbTi.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que as medidas adotadas conduziram a:

- adequação plena do produto CSN às exigências das especificações, através da implementação de uma nova metodologia estatística;
- um maior conforto operacional na estampagem de peças no cliente GM e na produção da referida especificação na CSN (Usina Presidente Vargas) e GalvaSud;
- eliminação das recusas de material na GalvaSud por propriedade mecânica fora de faixa neste aço;
- a alteração na composição química possibilitou uma redução no desvio médio mensal por propriedade mecânica fora do especificado de 94 t para zero, o que resultou numa economia da ordem de R\$ 1.579.200,00;
- a melhoria do aspecto superficial e das propriedades mecânicas permitiu a CSN melhorar sua imagem junto ao cliente GM que já iniciou junto à empresa, novos pedidos para fornecimento de aços em 2009.

Agradecimentos

Aos colaboradores da área comercial, especificação de produto, aciaria, laminações e GalvaSud pelo envolvimento direto na execução desse trabalho.

À General Motors pela parceria, colaboração e empenho para a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 FONSECA, F. A. V. *Efeito do Substrato dos Aços IF nas Propriedades do Revestimento Galvannealed*. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Metalúrgica e Minas da UFMG, 2005.
- 2 HOILE, S. *Processing and properties of mild interstitial free steels*. Material Science and Technology, October 2000, P. 1079-1093.
- 3 BHATTACHAYA, D.; GUPTA, I. *Metallurgy of formable vacuum degassed interstitial free steels*. Metallurgy of Vacuum Degassed Steels, 1990, p. 43-72.
- 4 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.
- 5 BLECK, W. *Production and properties of IF steel*. Thyssen Technische Berichte, v. 22, n 1, p. 69-85, 1990..
- 6 JURAN, J., GODFREY, A. *Juran's Quality Handbook*. McGraw-Hill. New York 1998.