



CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DO AÇO IF GALVANIZADO, DA CLASSE *EDDQ*, COM TEOR DE CARBONO SUPER ULTRA BAIXO E ESTABILIZADO AO TITÂNIO¹

Fabio Moreira da Silva Dias²
André Luiz Vasconcellos da Costa e Silva³
Fabiano Augusto Vallim Fonseca⁴
Marcos Flavio de Campos³

Resumo

É descrita a metodologia empregada no desenvolvimento de um novo aço IF (*Interstitial Free*) galvanizado com excelente conformabilidade, destinado ao segmento automobilístico, produzido pela CSN. Foi verificada a necessidade de melhoria no atendimento à classe *EDDQ* (limite de escoamento ≤ 180 MPa), com aplicações para estampagem extra profunda. Um novo aço IF galvanizado foi desenvolvido, estabilizado ao titânio, com teor de carbono super ultra baixo, para utilização tanto em peças internas quanto expostas. As propriedades mecânicas foram analisadas para avaliar a conformabilidade dos materiais e verificar se o novo aço apresenta desempenho superior. Ensaios de tração e o *software* estatístico *MINITAB* 15.1 foram empregados para avaliação dos resultados e análise de capacidade de processo.

Palavras-chave: Aço IF Ti-SULC; Desenvolvimento; Classe *EDDQ*.

CONTRIBUTION FOR THE DEVELOPMENT OF THE GALVANIZED IF STEEL OF THE *EDDQ* CLASS, WITH SUPER EXTRA LOW CARBON AND TITANIUM STABILIZED

Abstract

It is described the methodology employed in the development of a new IF (*Interstitial Free*) galvanized steel produced by CSN with excellent forming, designed for the automotive industry. It was found need of improvement to fulfill the *EDDQ* grade (yield point ≤ 180 MPa), with application for extra deep drawing. A new galvanized Ti-stabilized IF steel was developed, with extra low carbon content, for both external and internal components. The mechanical properties were analyzed to evaluate the forming of the materials and to check if the new steel presents superior behavior. Tensile tests and the statistical software *MINITAB* 15.1 were employed for the evaluation of the results and process capability analysis.

Key-words: Ti-SULC IF Steel, Development, *EDDQ* Class.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Mestrando em Engenharia Metalúrgica – EEIMVR – Universidade Federal Fluminense.

³ Professor Adjunto do Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense

⁴ Engenheiro Metalurgista, M.Sc. Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, Gerência Geral de Desenvolvimento de Produtos, Volta Redonda – RJ



1 INTRODUÇÃO

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 ($\{111\} <u v w>$) 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 a 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.

A excelente conformabilidade apresentada pelos aços IF confere aos mesmos grande aplicabilidade, em especial, no segmento automobilístico, onde níveis de estampagem profunda (*DDQ*) e extra profunda (*EDDQ*) são cada vez mais requeridos, visando atender a crescente demanda oferecida pelos sofisticados projetos automotivos, onde as características de alta conformabilidade, razoável resistência mecânica e excelente qualidade superficial, são indispensáveis.

Além disso, a indústria automobilística requer aços galvanizados, os quais recebem sobre sua superfície uma camada de revestimento de zinco puro, que oferece uma grande barreira ao processo corrosivo.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia (*alloy design* e determinação de parâmetros de processo) empregada, visando contribuir para o desenvolvimento de um aço IF moderno galvanizado, estabilizado ao titânio, visando conferir um atendimento pleno a especificação estabelecida para a classe *EDDQ*, destinado aos clientes do segmento automotivo, com aplicação tanto em peças internas quanto externas, substituindo outros aços IF, até então utilizados, os quais apresentavam valores para limite de escoamento acima do valor máximo estabelecido para essa classe de aços.

1.1 Aços IF (*Interstitial Free*)

Apenas com processos de desgaseificação a vácuo foi possível atingir os teores de C e N ultra baixos (< 50 ppm), que resultaram em uma redução na adição de Ti e/ou Nb. Tal fato implica também em uma redução de custos relativos à utilização desses elementos estabilizadores.

Os aços IF são classificados de acordo com o elemento utilizado para promover a completa estabilização das impurezas intersticiais (C e N). Portanto, classificam-se em: IF ao titânio (IF Ti), IF ao nióbio (IF Nb), IF ao titânio e nióbio (IF



Ti-Nb) e IF ao nióbio e titânio (IF Nb-Ti). Os tipos de precipitados em cada caso são mostrados na Tabela 1.⁽¹⁾

Tabela 1. Precipitados existentes para cada tipo de aço IF⁽¹⁾

IF Ti	IF Nb	IF Ti-Nb	IF Nb-Ti
TiN, TiS, TiC, Ti ₄ C ₂ S ₂	AlN, MnS, NbC	TiN, TiS, TiC, Ti ₄ C ₂ S ₂	TiN, TiS, NbC

No caso do aço IF Ti-Nb, como o Ti se combina com os elementos intersticiais, estabilizando completamente o aço (isso devido à estequiometria utilizada), resta Nb em solução sólida. Os tipos de precipitados, bem como sua quantidade, é função da termodinâmica e cinética.

1.1.1 Estabilização dos elementos intersticiais através do processo de precipitação nos aços IF

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:⁽¹⁻³⁾

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

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} .⁽¹⁻³⁾

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

O ponto ótimo refere-se à 0,04 % de Ti em solução.⁽¹⁾ No caso de aços IF Nb-Ti, para a completa estabilização dos elementos intersticiais, a adição de Ti é feita de forma que se combine apenas com N e S, não existindo Ti em excesso no aço. Assim, o elemento Nb estabiliza completamente o C, de acordo com as relações abaixo.⁽²⁾

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

$$Nb_{estab} = 7,75C \quad (4)$$

A importância de uma correta estequiometria para esse tipo de aço IF está no fato de que se houver Ti em excesso, o mesmo irá se combinar com o C presente até que todo o teor de Ti adicionado seja consumido, devido a maior estabilidade apresentada pelo TiC em relação ao NbC. Assim, quando o teor de Ti se esgotar, o restante do processo de fixação do C será realizado pelo Nb. Como nem todo Nb será utilizado para estabilizar o C, restará Nb em solução sólida. A equação a seguir apresenta o cálculo da quantidade de Nb em excesso, representado por Nb_{exc} :

$$Nb_{exc} = Nb_{total} - 7,75 \left(\% C - \frac{(\% Ti - (3,42\% N + 1,5\% S))}{4} \right) \quad (5)$$



O excesso de Nb em solução sólida acarreta, ao contrário do Ti, em um efeito prejudicial nas propriedades de conformabilidade, pois Nb em excesso aumenta a resistência mecânica do material.⁽¹⁾

O nióbio apresenta papel de refinador de grão. Os precipitados NbC são mais finos em comparação a todos os outros precipitados encontrados nos aços IF. Dessa forma, a distribuição dessas partículas na matriz microestrutural restringe o crescimento de grão ferrítico, através de uma barreira ao avanço dos contornos dos grãos recristalizados, o que implica em um aumento da resistência mecânica dos aços IF.

1.1.2 Mecanismo de precipitação

O mecanismo de precipitação nos aços IF segue uma seqüência bem estabelecida. Os primeiros precipitados a se formarem são aqueles que apresentam maior estabilidade (possuem entalpia de formação mais baixa, mais negativa, e assim requerem uma quantidade menor de energia para sua formação), seguidos pelos menos estáveis. Uma representação esquemática da seqüência do processo precipitação nos aços IF está apresentada na Figura 1, baseado em Tither e Stuart.⁽³⁾

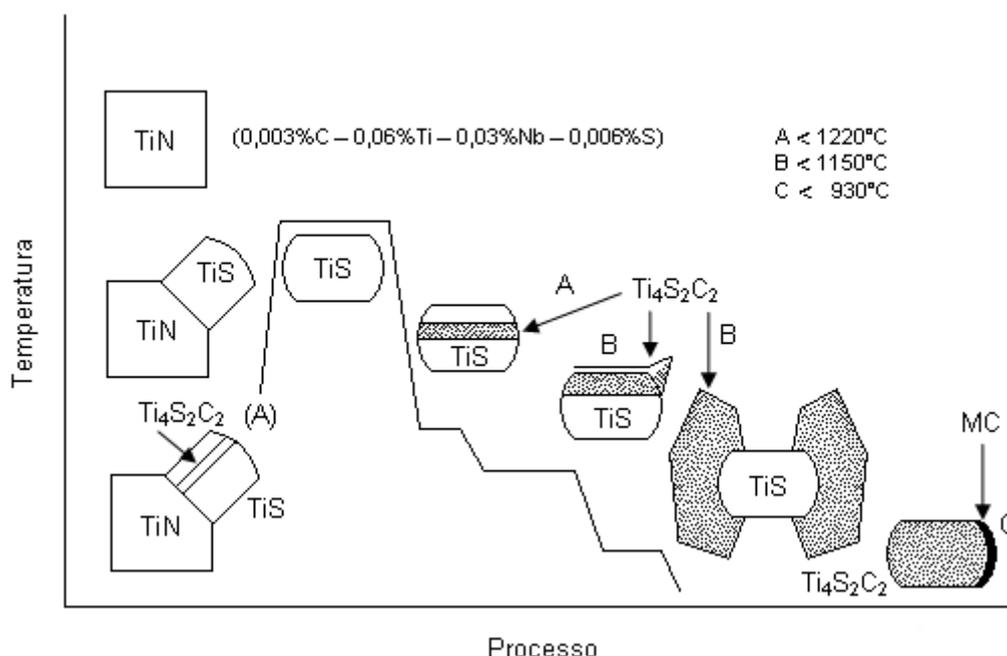


Figura 1. Sequência de precipitação para os precipitados existentes nos aços IF ao titânio ou IF ao nióbio e titânio.⁽³⁾

Primeiramente, o nitrogênio é fixado pelo titânio ainda com o aço líquido, durante o processo de lingotamento contínuo, para a produção das placas. As partículas de TiN, cujo tamanho varia de 0,2 a 5,0 μm ⁽³⁾ servem como sítios de nucleação para a precipitação epitaxial de TiS e Ti₄C₂S₂, e conseqüentemente, tais partículas servem também como substrato para a posterior nucleação das partículas de MC (TiC, NbC, dependendo do tipo de aço IF).^(1,3) No reaquecimento prévio para a laminação (reaquecimento de placas), Ti₄C₂S₂ se dissolve, e partículas individuais de TiN e TiS coexistem. O Ti₄C₂S₂ forma-se exclusivamente através das partículas de TiS, mediante uma transformação interna.⁽³⁾ Mas existe um ponto importante a

ser levado em consideração na formação do $Ti_4C_2S_2$. Como a formação desse precipitado ocorre mediante um mecanismo de transformação a partir de partículas de TiS, a cinética possui um papel fundamental no processo de formação. Quase sempre não haverá tempo para a completa transformação dos precipitados TiS em $Ti_4C_2S_2$. Assim, provavelmente, coexistirão tais partículas na matriz do material, em proporções que dependerão do tempo de exposição nas temperaturas adequadas para a transição, ou seja, da taxa de resfriamento. Seguindo o processo de resfriamento, as partículas de MC (TiC, NbC) nucleiam epitaxialmente nas partículas de $Ti_4C_2S_2$, e representam uma pequena porcentagem dos precipitados que contém carbono.^(1,3)

De acordo com a seqüência de precipitação nos aços IF, aqueles precipitados que surgem mais cedo (possuem temperaturas de início de precipitação mais elevadas) estão expostos a um tempo maior a altas temperaturas, sendo assim, possuem tamanhos maiores, em relação aos outros, menos estáveis, que se formam mais adiante.

1.2 Produção dos Aços IF

A fabricação de aços IF envolve etapas de tratamento diferenciado na maior parte da cadeia produtiva de uma usina siderúrgica, onde tais características conferem as propriedades especiais almejadas no produto final. Após a passagem do aço pelo refino primário, realizado no Conversor, o mesmo segue para a etapa de refino secundário, chamado metalurgia de panela, visando obter uma melhoria nas características do aço. Os processos de metalurgia de panela compreendem: desgaseificação, dessulfuração, adição de elementos de liga, etc. Na desgaseificação, o aço líquido é exposto a um vácuo médio (0,5 a 2 mmHg ou 60 a 250 Pa) e agitado. Os principais objetivos que conduzem à utilização de processamento em desgaseificadores são: remoção de gases dissolvidos (hidrogênio e nitrogênio, este em condições adequadas), redução do teor de carbono e desoxidação pelo carbono. A produção de aços IF com teores de C na ordem de 0,0020 à 0,0030% (20 à 30 ppm) só é possível pelo emprego de baixa pressão de CO (vácuo), que altera o equilíbrio da equação $\underline{C} + \underline{O} \Leftrightarrow CO(g)$ [4].

1.2.1 Laminação a quente

As condições sob as quais é feita a laminação a quente dos aços IF afetam as características desses materiais laminados a frio e recozidos, especialmente do ponto de vista de sua estampabilidade, que é a principal característica deste tipo de produto. O objetivo principal na laminação a quente é obtenção de uma microestrutura mais refinada possível, a qual confere maior conformabilidade ao produto final, através de valores para o coeficiente de anisotropia normal, \bar{R} , mais altos.

Os principais parâmetros da laminação a quente que influenciam nas propriedades dos aços IF são: temperatura de reaquecimento de placas, temperatura de acabamento e temperatura de bobinamento.

A redução da temperatura de reaquecimento de placas provoca um aumento nos valores de \bar{R} e de alongamento total, além de queda na temperatura de recristalização. A temperatura determinante para os aumentos nos valores de \bar{R} e de alongamento total e diminuição na temperatura de recristalização é de 1.100°C.⁽¹⁾ Entretanto, esta temperatura é muito baixa para as condições operacionais industriais.

A laminação de acabamento necessita ser feita acima da temperatura A_{r3} (no campo austenítico) para obtenção de uma estrutura de grãos refinados e uniformes na chapa laminada a quente, o que proporciona uma maior conformabilidade ao produto laminado a frio e recozido, obtendo-se altos valores de \bar{R} .

Quando se utilizam maiores temperaturas de bobinamento, as propriedades mecânicas dos aços IF em geral melhoram, em especial ductilidade e \bar{R} . A temperatura de bobinamento tem efeito sobre a distribuição de precipitados e, portanto, afeta a cinética de recristalização de chapas laminadas a frio. Temperaturas maiores implicam em coalescimento dos precipitados que, por sua vez, levam à menor temperatura de recristalização.⁽¹⁾

1.2.2 Laminação à frio

Para os aços IF o percentual de redução a frio ideal situa-se na faixa de 80% a 85%. A laminação gera uma textura com componentes $\langle 111 \rangle // DN$ e $\langle 110 \rangle // DL$. A intensidade dessa textura é proporcional ao grau de redução a frio. A orientação preferencial $\langle 111 \rangle // DN$ ou $\{111\} \langle u \ v \ w \rangle$ é a mais indicada para aços de excelente conformabilidade, pois maximiza o coeficiente de anisotropia normal, \bar{R} , e leva à valores mínimos o coeficiente de anisotropia planar, ΔR . Durante o tratamento térmico de recozimento os grãos com tal orientação prevalecem em relação aos demais com outras orientações, fazendo com que o material recristalizado tenda a apresentar a textura cristalográfica ideal para conformabilidade $\{111\} \langle u \ v \ w \rangle$.⁽⁵⁾

1.2.3 Recozimento contínuo

O objetivo do recozimento é gerar uma microestrutura recristalizada e desenvolver as propriedades necessárias para a boa conformabilidade, sendo que tais propriedades não são encontradas no material laminado a frio, ou seja, encruado, que apresenta elevada resistência mecânica, seguido de baixa ductilidade. O aumento na temperatura de recozimento dos aços IF possui um efeito benéfico na conformabilidade do material. O ponto ótimo se encontra próximo de 800°C.⁽¹⁾

2 MATERIAIS E METODOLOGIA

2.1 Materiais

Para a realização do estudo proposto no presente trabalho, utilizou-se amostras dos dois aços IF usuais para aplicações em peças internas e expostas, os quais são IF ao titânio (*ULC*) e IF ao nióbio e titânio (*SULC*) respectivamente. A partir desses aços, foi elaborado um projeto de desenvolvimento de um novo aço, IF ao titânio, onde o mesmo oferece um melhor desempenho em relação a conformabilidade, por meio da otimização do projeto de liga (*alloy design*). Todos esses aços são produzidos pela CSN e galvanizados por intermédio da Galvasud, que é uma unidade da CSN, ressaltando que o novo aço IF ao titânio foi produzido na forma de lotes experimentais. Os aços são classificados seguindo a nomenclatura de graus adotada pela CSN, sendo assim, classificam-se em: 4003/4093, 4013 e 4053. Os graus 4003/4093 são referentes ao novo aço desenvolvido, IF estabilizado ao titânio (Ti-SULC). A diferença entre os graus 4003 e 4093 reside no fato de que o primeiro é utilizado para peças internas e o segundo para peças expostas. O grau 4013 é o aço IF ao titânio (IF Ti), atualmente aplicado em peças internas. Já o grau 4053 é o aço IF ao nióbio e titânio (IF Nb-Ti), com

utilização em peças expostas. As faixas de composição química dos aços IF analisados neste trabalho estão apresentadas pela Tabela 2.

Tabela 2. Faixa de composição química dos aços IF utilizados na elaboração deste trabalho (% em peso)

Aço	Composição Química – Faixa Especificada (% em Peso)								
	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Nb	N
IF Ti-SULC 4003/4093	< 0,0030	< 0,2000	< 0,0400	< 0,0200	< 0,0150	> 0,0200	< 0,0700	< 0,0040	< 0,0050
IF Ti 4013	< 0,0050	< 0,2000	< 0,0400	< 0,0200	< 0,0150	> 0,0200	< 0,1000	< 0,0050	< 0,0050
IF Nb-Ti 4053	< 0,0030	< 0,2000	< 0,0400	< 0,0200	< 0,0150	> 0,0200	< 0,0220	< 0,0300	< 0,0050

2.2 Metodologia

Em virtude do não atendimento pleno aos requisitos da classe *EDDQ*, em relação aos aços fornecidos para os clientes Fiat, Ford, Volkswagen e Renault, houve a necessidade de projetar uma nova liga. Para isso, foi elaborada uma revisão bibliográfica, utilizada como base para o projeto de composição química e determinação de parâmetros de processo, para otimizar as propriedades de conformabilidade. O planejamento proposto foi colocado em prática, e dados foram coletados, a partir de lotes experimentais do novo aço IF, para verificação dos resultados obtidos.

2.2.1 Identificação do problema

Com o objetivo de avaliar a necessidade de desenvolvimento de um novo aço, em substituição aos aplicados atualmente, foi realizada uma análise para identificar a condição apresentada em relação às propriedades mecânicas, pelos aços IF Ti (4013), com aplicação em peças internas, e também para o IF Nb-Ti (4053), aplicado em peças expostas (painéis expostos). Foi utilizado o *software MINITAB 15.1* para avaliar a capacidade de processo para a variável limite de escoamento, onde a mesma é referência para determinação da qualidade de estampagem extra profunda. Os resultados podem ser observados através da Figura 2. Os aços IF analisados apresentam valores de limite de escoamento acima do limite máximo especificado pela classe *EDDQ* (180 MPa), além de os valores médios estarem deslocados em relação ao valor central (160 MPa), em direção ao limite máximo, apresentando também uma amplitude de variação relativamente alta, indicada pelo desvio padrão. Através do estudo realizado na revisão bibliográfica, foram identificados os principais motivos correspondentes às maiores propriedades mecânicas apresentadas pelos aços IF atuais:

- *IF Ti (4013)*: Composição química mais carregada. Elementos intersticiais acima do nível adequado (por exemplo, C pode chegar até 50 ppm), onde a faixa mais apropriada é menor que 30 ppm (*SULC*). Ti em excesso acima do ponto ótimo de 0,04% (verificação realizada para composição química média dos lotes experimentais analisados e também para o teor de C à um nível máximo).
- *IF Nb-Ti (4053)*: A composição química é satisfatória (intersticiais reduzidos, C < 30 ppm). Mas o nióbio forma finos precipitados NbC, que promovem refinamento de grão e com isso, acréscimo na resistência mecânica.

Possibilidade de dissolução na etapa de recozimento contínuo devido à baixa estabilidade desta partícula o que implica em detrimento da conformabilidade (C e Nb em solução sólida). Nióbio em excesso pode ocorrer caso a quantidade de titânio adicionada esteja acima da estequiométrica (Ti em excesso), devido a maior estabilidade do TiC em relação ao NbC, também gerando aumento da resistência mecânica.

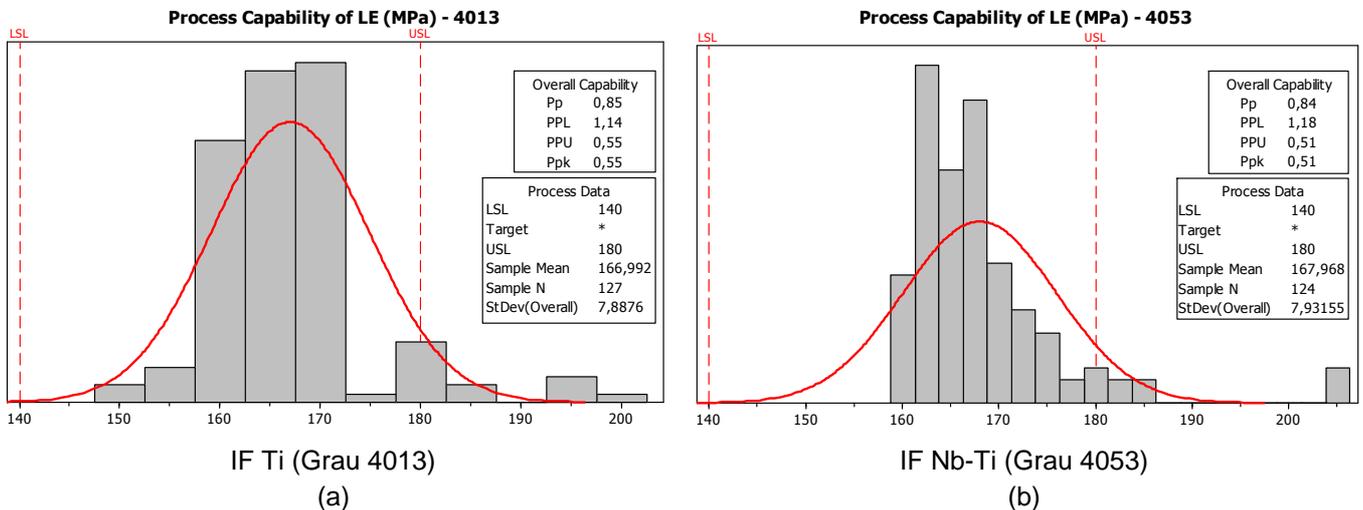


Figura 2. Capacidade de processo apresentada pelos aços IF galvanizados, atualmente utilizados no segmento automobilístico, em relação a variável limite de escoamento, onde a mesma é referência para determinação da qualidade de estampagem da classe EDDQ, obtida através da utilização do software MINITAB 15.1. Em (a) IF ao titânio (4013) e (b) IF ao nióbio e titânio (4053).

2.2.2 Desenvolvimento do novo aço IF

Dessa forma, foi elaborada uma metodologia visando, através da já citada revisão bibliográfica, a contribuição ao desenvolvimento de um novo aço IF, de maneira que contivesse o melhor *alloy design* (projeto de composição química mais apropriada possível) aliado a determinação dos parâmetros de processo, de forma a otimizar as excelentes propriedades de conformabilidade e aspecto superficial, indispensáveis para a aplicação no segmento automobilístico atualmente. Foi escolhido o aço IF ao titânio, pois apresenta melhores propriedades mecânicas e ainda sua quantidade adicionada foi calculada em termos de titânio em excesso próximo do ponto ótimo (0,04%). O teor de carbono está na faixa super ultra baixo. Portanto, foi proposta a denominação Ti-SULC. Os parâmetros de processo foram ajustados para maximizar as propriedades de conformabilidade. A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros de processo utilizados para cada etapa do fluxo produtivo.

Tabela 3. Principais parâmetros de processo determinados através da literatura

Fluxo Produtivo	Parâmetros de Processo		
	TRP	TA	TB
Laminação a Quente	1180°C máximo	910°C mínimo (*)	750°C máximo
Laminação a Frio	Grau de Redução a Frio		
	80% mínimo		
Recozimento Contínuo (Galvanização)	Temperatura de Recozimento		
	780°C mínimo		

TRP: Temperatura de reaquecimento de placas; TA: Temperatura de acabamento; TB: Temperatura de bobinamento. (*) A temperatura de transformação de austenita em ferrita, A_{r3} , para esse aço é de aproximadamente 887°C, determinada através da técnica de dilatométria.

2.2.3 Verificação dos resultados obtidos

Com o intuito de realizar uma análise comparativa entre as propriedades apresentadas pelos aços até então fornecidos aos clientes do segmento automobilístico, e as obtidas pelo novo aço através do desenvolvimento feito pela CSN, foram utilizadas as seguintes técnicas: ensaios mecânicos de tração uniaxial para avaliar as propriedades mecânicas⁽⁶⁾ e estudo da capacidade de processo para verificar a amplitude de variação no processo produtivo. Os corpos de prova foram confeccionados segundo a mesma norma utilizada para realização dos ensaios, na base 80 mm (dimensões e velocidades de ensaio apresentadas na referida norma). Para estas análises, foi utilizado o *software* estatístico *MINITAB* 15.1. Todas as análises foram realizadas com amostras de aço galvanizado, com o intuito de obter os resultados de propriedades mecânicas para o sistema substrato mais revestimento, uma vez que o revestimento depositado sobre o aço promove um pequeno aumento na resistência mecânica do material. Com isso, a comparação das propriedades mecânicas foi feita com base na condição final apresentada pelos aços galvanizados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4 sintetiza a análise das propriedades mecânicas.

Tabela 4. Propriedades mecânicas médias para os aços IF Ti-SULC, IF Ti e IF Nb-Ti

Aço	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)	R _{Médio}
IF Ti-SULC (4003/4093)	160/163	289/290	47/46	2,25/2,20
IF Ti (4013)	167	296	45	2,17
IF Nb-Ti (4053)	166	297	46	1,95

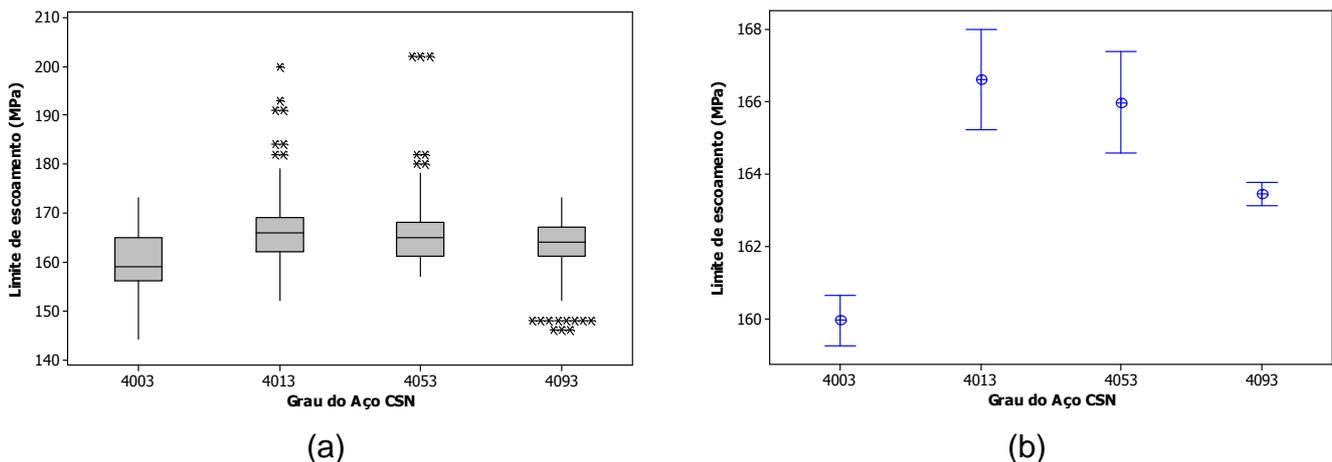
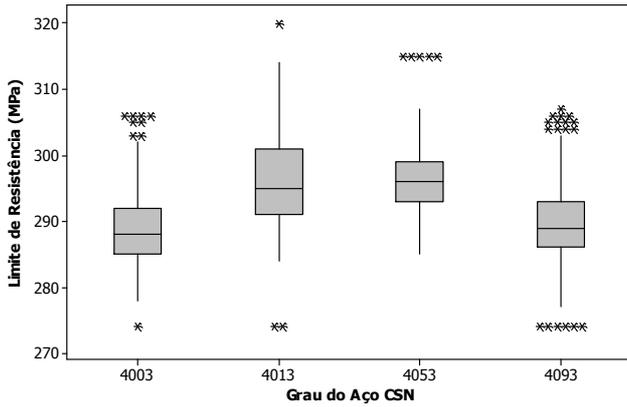
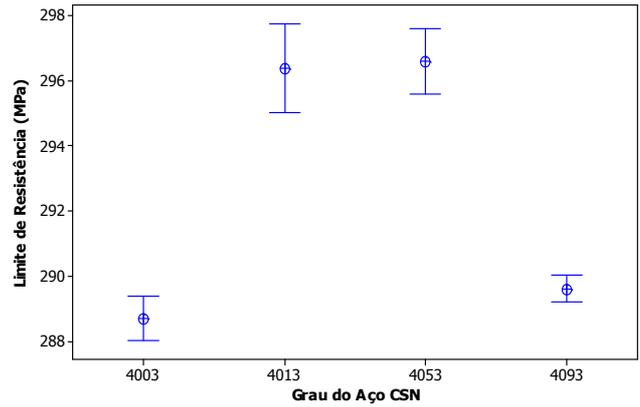


Figura 3. Comparação dos valores obtidos para a propriedade mecânica limite de escoamento, para os aços IF Ti (4013), IF Nb-Ti (4053) e IF Ti-SULC (4003/4093). Em (a) utilizando o método Box-Plot e (b) intervalo de confiança de 95% para a média.

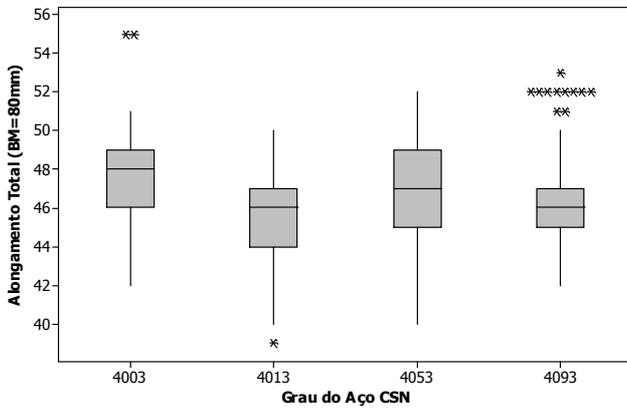


(a)

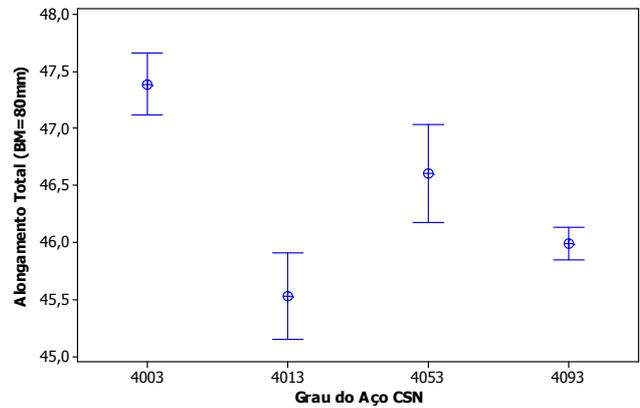


(b)

Figura 4. Comparação dos valores obtidos para a propriedade mecânica limite de resistência, para os aços IF Ti (4013), IF Nb-Ti (4053) e IF Ti-SULC (4003/4093). Em (a) utilizando o método Box-Plot e (b) intervalo de confiança de 95% para a média.

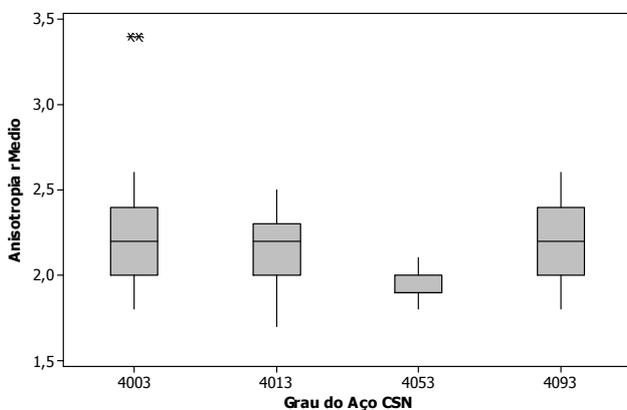


(a)

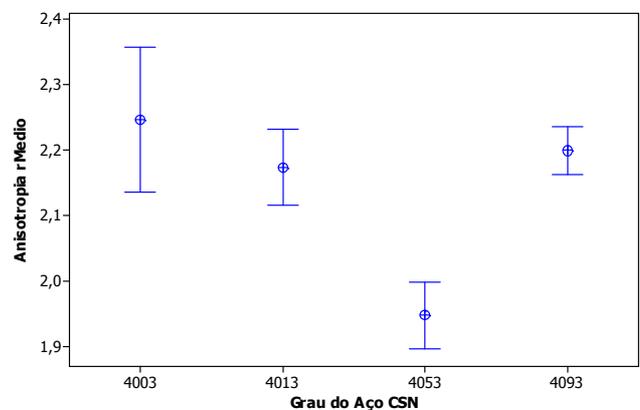


(b)

Figura 5. Comparação dos valores obtidos para a propriedade mecânica alongamento total, para os aços IF Ti (4013), IF Nb-Ti (4053) e IF Ti-SULC (4003/4093). Em (a) utilizando o método Box-Plot e (b) intervalo de confiança de 95% para a média.



(a)



(b)

Figura 6. Comparação dos valores obtidos para o coeficiente de anisotropia normal, para os aços IF Ti (4013), IF Nb-Ti (4053) e IF Ti-SULC (4003/4093). Em (a) utilizando o método Box-Plot e (b) intervalo de confiança de 95% para a média.

A análise dos valores apresentados pelos limites de escoamento e resistência, alongamento total e coeficiente de anisotropia normal revelou que o aço IF Ti-SULC apresenta melhor conformabilidade em relação aos outros, conforme indicado pelas Figuras 3, 4, 5 e 6. A Figura 7 apresenta o estudo da capacidade de processo para a variável limite de escoamento, a qual é referência para determinação da qualidade de estampagem da classe *EDDQ*.

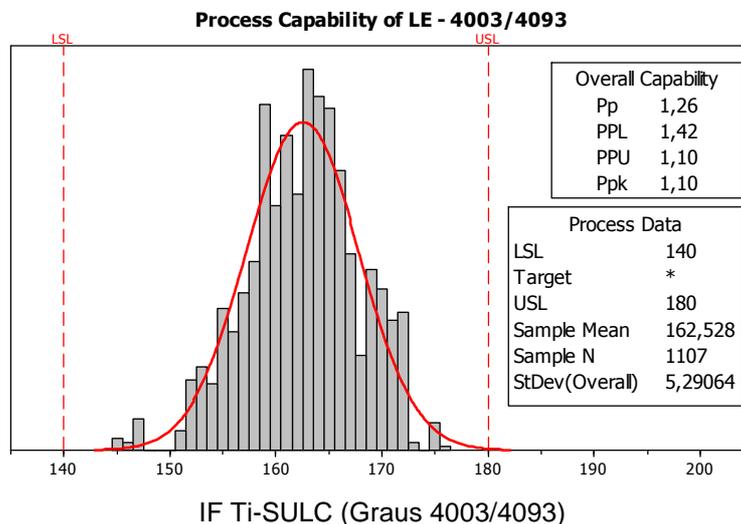


Figura 7. Capacidade de processo apresentada pelo aço IF Ti-SULC, galvanizado, desenvolvido para melhor atendimento ao segmento automotivo em relação à conformabilidade, obtida através da utilização do software *MINITAB* 15.1.

O novo aço IF apresenta os valores médios mais próximos do valor central da faixa estabelecida para a classe *EDDQ* ($140 \leq LE \leq 180$ MPa), aliado a uma menor dispersão, indicada pelo desvio padrão. O material não apresenta valores de limite de escoamento acima do limite de especificação superior.

4 CONCLUSÕES

- A revisão bibliográfica deste trabalho mostrou ser de grande valia para o desenvolvimento do novo aço IF Ti-SULC, pois apresentou as principais propriedades dos aços IF e as melhores condições de projeto para atingir as metas objetivadas, garantindo a melhoria das propriedades mecânicas;
- O aço IF Ti-SULC, desenvolvido, atende plenamente os requisitos da classe *EDDQ*, com limite de escoamento abaixo de 180 MPa, e média para o mesmo em torno de 160 MPa. O estudo de capacidade de processo apresentou que o novo aço é melhor que os outros, associado a uma menor dispersão dos valores, conforme o desvio padrão calculado, em torno de 5 MPa;
- Utilização das melhores condições de projeto possíveis, tanto “*alloy design*” quanto parâmetros de processo. Assim, as propriedades mecânicas foram otimizadas;
- Em decorrência dos resultados positivos, o novo aço foi homologado e incluído no manual de produtos autorizados da CSN.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Siderúrgica Nacional pela oportunidade de realização deste trabalho, e Fabio Moreira da Silva Dias em especial à Gerência de Desenvolvimento de Produtos Galvanizados e Pré-Pintados (José Eduardo Ribeiro de Carvalho, Flávia Tereza Fernandes dos Santos Tolomelli e Alberto Nei Carvalho Costa) pelo incentivo e oportunidade de realização do estágio curricular na época.

REFERÊNCIAS

- 1 FONSECA, Fabiano et al. *Desenvolvimento de Aço Galvanizado (GI), da Classe EDDQ – Peça Exposta e Interna, Super Ultra Baixo Carbono Estabilizado ao Titânio (Ti-SULC)*. 30º Seminário Tecnológico das Empresas CSN - SETEC, 2008.
- 2 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.
- 3 TITHER, Geoffrey; STUART, Harry. *Automotive Steels-Recent Developments in Steels Used in the Manufacture of Automobiles and Trucks*. Niobium Products Company, Inc, 14 p.
- 4 COSTA E SILVA, André Luiz V.da; MEI, Paulo Roberto. *Aços e Ligas Especiais*. 2 Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2006. 646 p.
- 5 CAMPOS, Marcos Flavio de. *Microestrutura, Textura e Propriedades Magnéticas em Aços Elétricos*. São Paulo, 2000. 303 f + apêndices. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- 6 European Standard, Berlim. *Metallic Materials – Tensile Testing*: EN 10.002-1:2001. Berlim: 2001, 52 p.