

# DESENVOLVIMENTO DO AÇO LAMINADO A QUENTE PARA ATENDER AOS REQUISITOS GRAU S700 DA NORMA EN10149 NA ARCELORMITTAL TUBARÃO\*

Ricardo Porto<sup>1</sup>

Marden Valente de Souza<sup>2</sup>

James Albert dos Santos Soares Mohallem<sup>3</sup>

Breno Torezani Storch<sup>4</sup>

Bruno Bastos da Silva Murad<sup>5</sup>

Bruno Rodrigues Henriques<sup>6</sup>

Nilvânia Lucélia de Souza Pereira<sup>7</sup>

## Resumo

Com objetivo de tornar produtos / equipamentos mais eficientes e sustentáveis, tem-se buscado utilizar estruturas cada vez mais leves. Para o aço, este requisito se traduz na redução de espessura associado ao aumento de resistência mecânica do material. Para atender a esta demanda, a ArcelorMittal Tubarão desenvolveu um aço que atende ao grau S700 da norma EN10149 visando segmento de semi-reboques e equipamentos agrícolas.

**Palavras-chave:** S700, ArcelorMittal Tubarão, Semi-Reboques e Agrícolas.

## DEVELOPMENT OF HOT STEEL COIL TO MEET THE REQUIREMENTS OF EN10149–S700 AT ARCELORMITTAL TUBARÃO

### Abstract

In order to make products and equipment more efficient and sustainable, it has been tried to use lighter materials. For steel application, this requirement translates into reduced thickness associated with increased tensile strength of the material. To meet this demand, ArcelorMittal Tubarão developed a steel that meets EN10149-S700 requirements focus on semi-trailers and agricultural equipment segment.

**Keywords:** S700, ArcelorMittal Tubarão, semi-trailers and agricultural equipment.

<sup>1</sup> M.Sc.,Especialista de Desenvolvimento de Produtos da ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil;

<sup>2</sup> M.Sc.,Especialista de Pesquisa e Desenvolvimento da ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil;

<sup>3</sup> M.Sc.,Especialista de Desenvolvimento de Produtos da ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil;

<sup>4</sup> M.Sc.,Especialista de Assistência Técnica da ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil;

<sup>5</sup> M.Sc.,Especialista de Controle de Processo de Produção de Bobinas a Quente e Acabamento de Produtos da ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil

<sup>6</sup> M.Sc.,Especialista da Unidade Técnica da Aciaria da ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil

<sup>7</sup> Técnica de Desenvolvimento de Produtos da ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do aço laminado a quente que atende aos requisitos do grau S700 da Norma EN10149, tem como objetivo a atender a uma demanda de mercado em utilizar estruturas mais leves e sustentáveis. Este grau de aço é utilizado para uma série de aplicações, como guias, equipamentos de terraplenagem, lanças telescópicas, reboques de caminhão e máquinas agrícolas.



Figura 1. Exemplos de Aplicação do S700.

## 2 Requisitos de Propriedades Mecânicas da Norma EN10149

Requisitos da Norma EN10149<sup>[1]</sup> para o grau S700 estão indicados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Requisitos de Composição Química

Composição Química (%)											
C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	V	Ti	Mo	B	Nb+Ti+V
≤0,12	≤2,10	≤0,60	≤0,025	≤0,015	≥0,015	≤0,09	≤0,20	≤0,22	≤0,50	≤0,005	≤0,22

**Tabela 2.** Requisitos de Propriedades Mecânicas

Espessura (mm)	Limite de Escoamento	Limite de Resistência	Alongamento	Dobramento
< 3,0	≥700	750 a 950	>10	2t
3,0 a 8,0			12	
>8,0	>680			

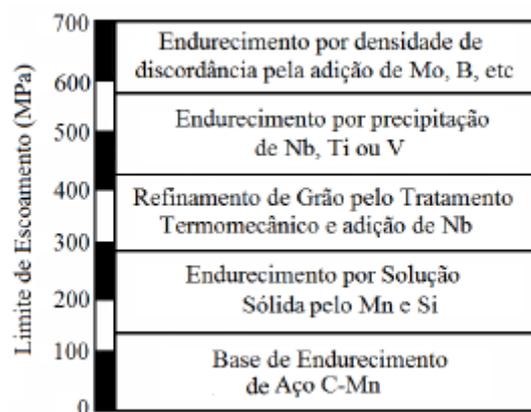
- **Direção de Ensaio:** Tração: Longitudinal
- **Corpo de Prova:** Espessura < 3mm:  $L_0 = 80\text{mm}$  e  $W = 20\text{mm}$  /  
Espessura > 3mm:  $L_0 = 5,65 \times S_0^{1/2}$
- **Dobramento:** transversal

Ensaio Charpy, não é requisitado pela norma EN10149, mas quando acordado, deve ser realizado para espessura maior ou igual 6mm, o ensaio deve ser realizado com corpo de prova na direção longitudinal ao sentido de laminação e devem ser atendidos aos requisitos abaixo:

- Temperatura de Ensaio = - 20°C → Energia Absorvida  $\geq 40\text{J}$
- Temperatura de Ensaio = - 40°C → Energia Absorvida  $\geq 27\text{J}$

### 3 Propriedades Mecânicas do Aço

Para atender aos requisitos da norma, faz-se necessário o uso dos diversos mecanismos de endurecimento do aço, como endurecimento por solução sólida, por refinamento de grãos, por precipitação e por densidade de discordâncias.



**Figura 2.** Contribuição dos vários mecanismos de endurecimento no limite de escoamento de um aço.

O endurecimento por estes mecanismos é obtido pela combinação da composição química do aço e do processo de conformação do material, que no caso é o de laminação de tiras a quente.

### 3.1 Composição Química

Para definição da composição química a ser utilizada, faz-se necessário o conhecimento do papel de cada elemento químico a ser utilizado, destacando-se:

- **Carbono:** apresenta melhor relação custo/benefício para aumento de resistência mecânica e dureza no aço, entretanto, apresenta efeito negativo na tenacidade e na soldabilidade do material [3,4], conforme pode ser observado na figura 3.

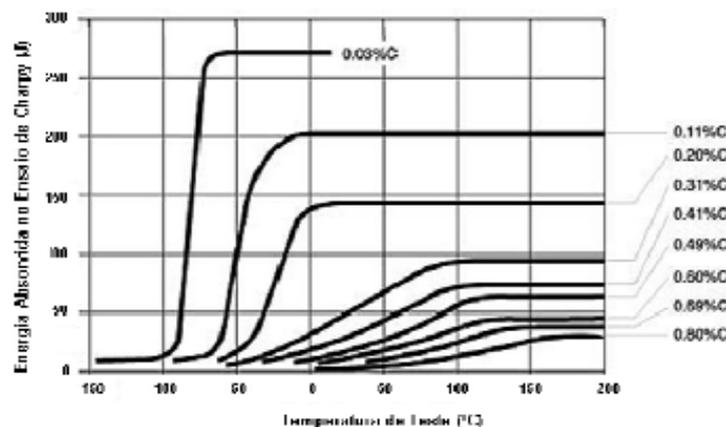


Figura 3. Efeito do teor de Carbono na tenacidade ao impacto de aços.

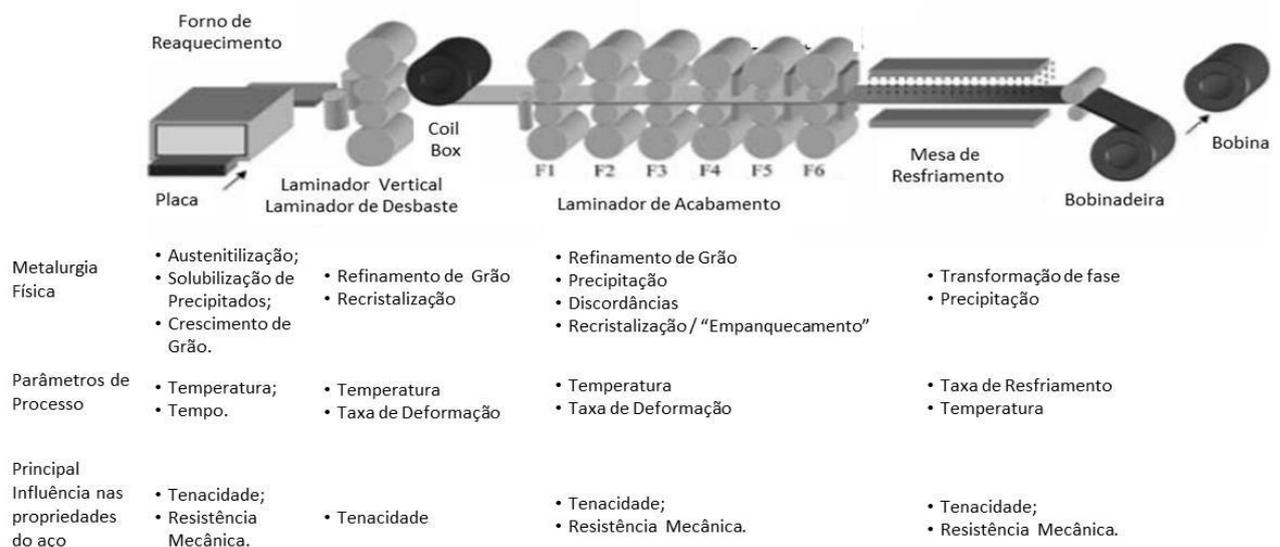
- **Manganês:** é o elemento preferencial na substituição de Carbono em aços de alta resistência com requisito de tenacidade. Atua na estabilização da austenita, atrasando a sua transformação, acarretando no refinamento de grão ferrítico<sup>[5]</sup>.
- **Silício:** Atua no endurecimento por solução sólida, promovendo modesto aumento na resistência mecânica, contudo, por ser estabilizador da ferrita, aumenta a temperatura de transformação de fase acarretando em efeito contrário dos demais elementos em contribuir para melhor refinamento de grão ferrítico<sup>[5]</sup>;
- **Molibdênio:** é amplamente utilizado em aços com nióbio, pois forma precipitado complexo que melhora o benefício nióbio. Para valores superiores a 0,12%, observa-se aumento do endurecimento da subestrutura de discordâncias nas microestruturas não poligonais <sup>[5]</sup>.
- **Cromo:** produz pequena fração da fase Martesita/austenita. Quando combinado com resfriamento acelerado, é possível se obter microestruturas com elevada densidade de discordâncias, como ferrita acicular ou bainita<sup>[5]</sup>;
- **Titânio:** adicionado para prevenir o crescimento excessivo do tamanho de grão austenítico a altas temperaturas. Elemento possui elevada afinidade com nitrogênio, formando partícula estável e dispersa de Nitreto de Titânio a altas temperaturas <sup>[5]</sup>. Progressivos aumentos no teor deste elemento, resulta na formação de Carboneto de Titânio (TiC), que produz grande endurecimento do aço, permitindo obter resistência mecânica da ordem de 780MPa, mas

com grandes perdas de tenacidade<sup>[5,6]</sup>. Para minimizar a perda de tenacidade, deve-se buscar uma matriz contendo uma única fase e com precipitados de TiC com tamanho da ordem de nanômetros e homoganeamente dispersos na matriz <sup>[6]</sup>

- **Nióbio:** forte endurecedor do aço e responsável pelo aumento da tenacidade do material, quando utilizado de forma apropriada. Promove endurecimento por refinamento de grão austenítico, seguido pelo ferrítico e endurecimento por precipitação. Adicionalmente, este elemento apresenta maior efetividade no aumento da temperatura de não recristalização <sup>[4,5]</sup>.
- **Vanádio:** forma preferencialmente precipitado de V(C,N) induzido pela deformação na região austenítica durante e após a transformação de fase. Devido à baixa temperatura de precipitação, estes precipitados são finos e tem efeito pronunciado no endurecimento do aço <sup>[7]</sup>.

### 3.2 – Processo de Laminação a Quente

Os avanços na metalurgia de aços microligados tem permitido a obtenção de materiais com níveis de resistência cada vez mais elevados. O processo de laminação a quente é realizado em 5 etapas (forno de aquecimento, laminador de desbaste, laminador de acabamento, resfriamento e bobinamento), com elevada contribuição no produto final, conforme pode ser observado na figura 4 <sup>[8]</sup>.



**Figura 4.** Processo de laminação de Tiras a Quente <sup>[8]</sup>.

Com o avanço do grau do aço (aumento da resistência mecânica), há necessidade crescente do aumento de controle tanto dos parâmetros de processo laminação como de sua variabilidade, visando obtenção dos resultados de propriedades mecânicas consistentes e de forma repetitiva. Esta reprodutibilidade tem se tornando possível devido ao desenvolvimento do monitoramento e controle automático do processo de laminação a quente <sup>[8]</sup>.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para desenvolvimento do grau S700 foi utilizada a composição química indicada na tabela 3

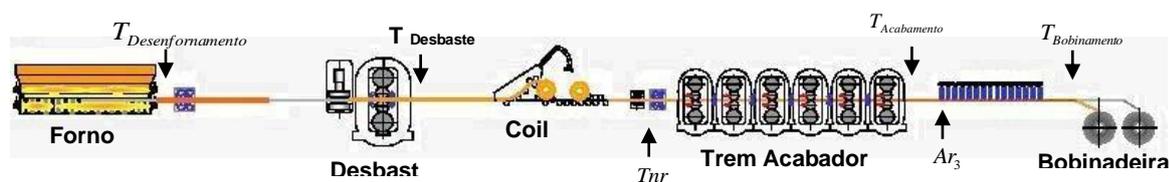
**Tabela 3 – Composição Química utilizada**

C	Mn	Si	P	S	Al	Mo	Cr	Nb+Ti+V	Ceq
≤0,12	≤2,10	≤0,60	≤0,025	≤0,010	≥0,015	≤0,50	≤0,45	≤0,22	≤0,43

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (1)$$

### 2.1 Processo de Laminação

Para o processo de laminação de tiras a quente, foram utilizados os parâmetros de laminação indicados na figura 5.



**Figura 5.** Parâmetros de Laminação de Tiras a Quente utilizados para Desenvolvimento do Aço.

**Forno de Reaquecimento de Placas:** placa é aquecida até a temperatura de aproximadamente 1250°C. Neste processo, ocorre crescimento de grão e para minimizar este crescimento, foi adicionado Ti, que forma TiN durante o processo de lingotamento contínuo;

**Laminador de Desbaste:** placa é laminada para espessura de entrada do trem acabador. Durante esta etapa ocorre recristalização e crescimento de grão, podendo, dependendo da temperatura de processamento, haver precipitação de NbC;

**Coil Box:** tem a função de homogeneizar a temperatura da tira, possibilitando a obtenção de propriedades mecânicas mais uniformes ao longo do comprimento da tira;

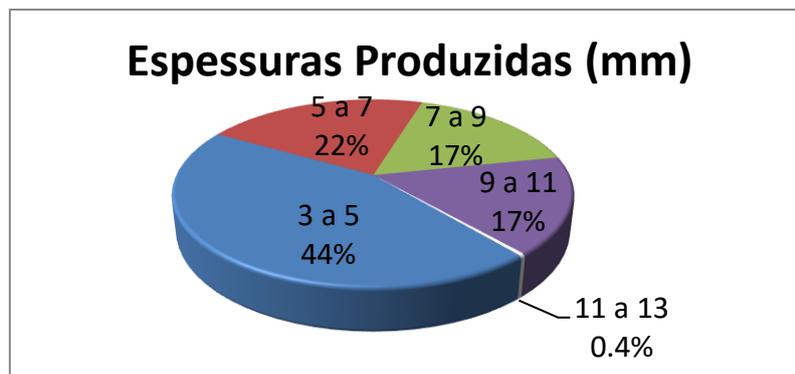
**Trem Acabador:** a tira é reduzida para a espessura final do material. Esta etapa é realizada em temperaturas superiores à de transformação de fase ( $Ar_3$ ); Nesta etapa, visa-se aumento de propriedade mecânica através de conformação mecânica e precipitação de Nb (C,N) e TiC;

**Mesa de Resfriamento:** ocorre o resfriamento da tira até a temperatura de bobinamento. Nesta etapa ocorre a transformação de fase, precipitação de NbN e TiC e obtenção da microestrutura final do material;

**Bobinadeira:** a tira é bobinada, cintada e marcada. Trata-se da etapa final para obtenção das propriedades mecânicas requeridas, em função da temperatura do processo de bobinamento.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram produzidas bobinas laminadas a quente com espessura variando entre 3,0 e 12,5mm com larguras de até 1500mm, conforme figura 6.



**Figura 6.** Mix de Espessura Produzidas

Espessuras inferiores a 7 mm são responsáveis por aproximadamente 70% da produção do S700, entretanto, observa-se demanda crescente para espessuras acima de 7mm, acarretando na necessidade de seu desenvolvimento.

#### 3.1 - Resultados de Propriedades Mecânicas

Este grau é atualmente um dos graus de maior resistência mecânica fornecido como produto laminado a quente. Em função da complexidade, realiza-se ensaios de tração e Charpy em todas as bobinas produzidas, sendo obtidos os resultados indicados nos itens abaixo.

##### 3.1.1 - Ensaio de Tração

Ensaio de tração foi realizado na direção longitudinal ao sentido de laminação, com atendimento aos requisitos da norma, conforme indicado na figura 7.

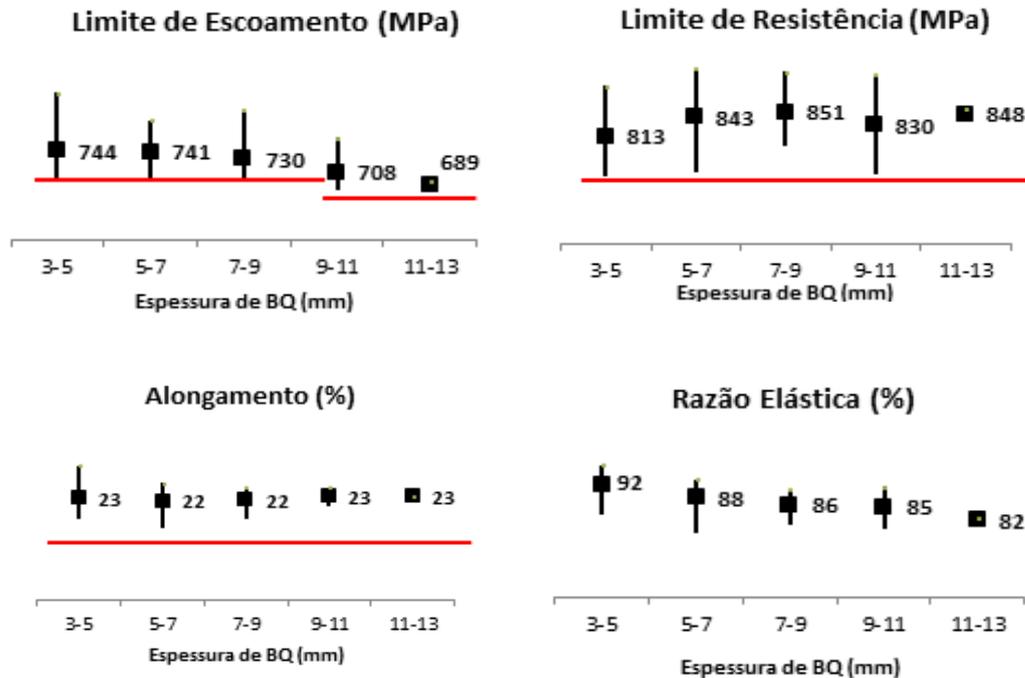


Figura 7. Resultados de Propriedades Mecânicas - Ensaio de Tração

Observa-se que o limite de resistência apresenta-se mais estável com a variação de espessura, ao passo que o limite de escoamento tende a reduzir com o aumento da espessura. Este fato pode ser confirmado com a redução da razão elástica.

### 3.1.2 – Ensaio Charpy

Ensaio Charpy foi realizado à temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  em BQ com espessuras superiores a 7 mm, sendo obtido energia absorvida média de 83%. Todas as bobinas ensaiadas atenderam aos requisitos da norma para tenacidade, entretanto, observa-se redução da energia absorvida para valores inferiores a 50J quando o limite de resistência apresenta-se acima de 840 MPa, conforme indicados na figura 8. Este comportamento é amplamente mencionado na literatura.

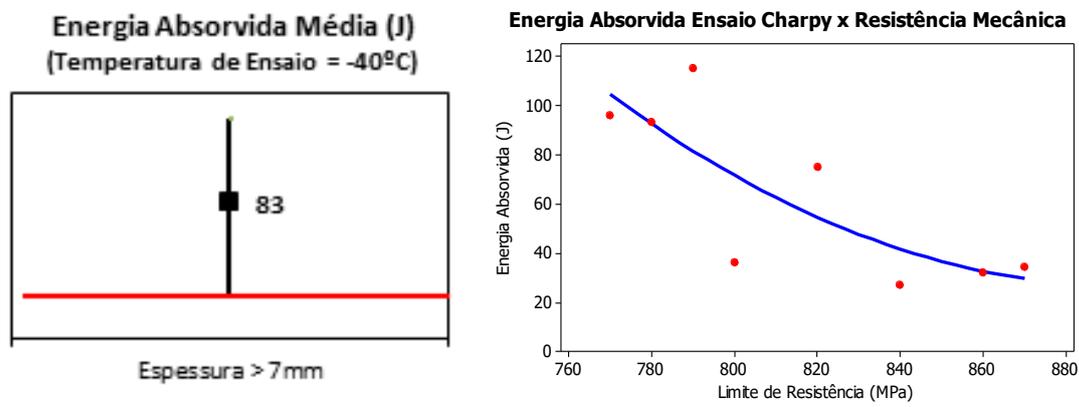
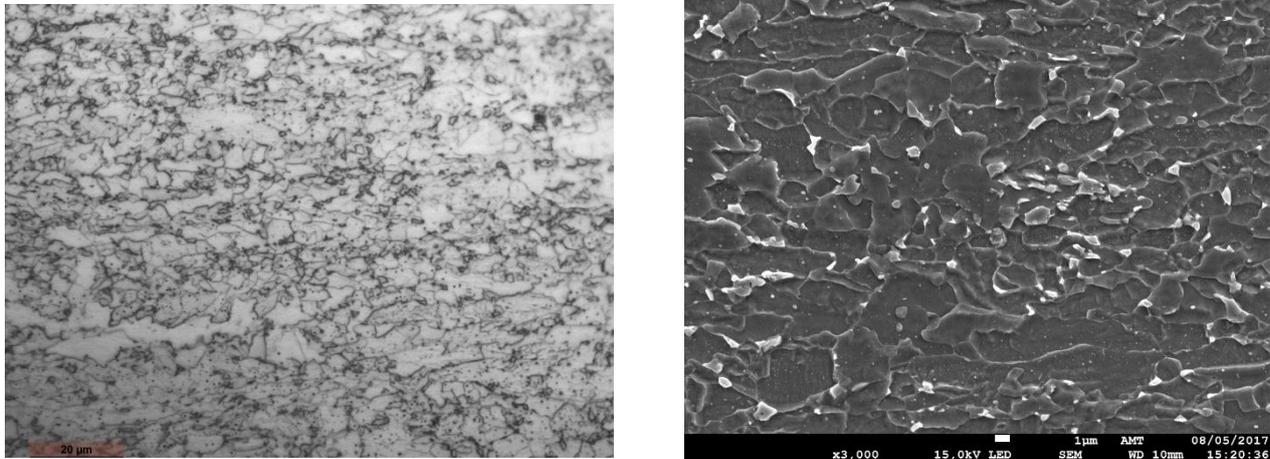


Figura 8. Resultados de Ensaio Charpy a  $-40^{\circ}\text{C}$  e relação entre Energia Absorvida (J) e Limite de Resistência (MPa)

### 3.1.3 – Microestrutura

Material apresenta microestrutura típica contendo ferrita e ilhas de martensita /austenita retida (MA) com tamanho de grão 11, conforme norma ASTM E112.



**Figura 9.** Análise Metalográfica no microscópio ótico e MEV (3000x)

A redução da energia absorvida média em bobinas com resistência superior a 840MPa pode estar relacionada com formação de ilhas de MA, associada a possível precipitação de Carboneto de Titânio (TiC) mais grosseiro.

Apesar dos valores de energia absorvida atenderem aos requisitos da norma, está sendo realizado ajuste no projeto de qualidade visando aumento da tenacidade, principalmente, para materiais com Limite de Resistência superior a 840MPa, onde observa-se resultados de energia absorvida mais baixos.

## 4 CONCLUSÃO

- Observa-se tendência mundial em reduzir o consumo de energia tornando os produtos mais sustentáveis. Para o setor siderúrgico, este requisito é traduzido no uso de um aço com espessura cada vez menor e classe de resistência cada vez maior. Esta relação, redução de espessura x aumento de classe de resistência, tem se tornado um desafio para os produtores de aço.
- Neste sentido, a ArcelorMittal Tubarão desenvolveu um aço que atende aos requisitos do grau S700 da norma EN10149 nas espessuras entre 3,0 e 12,5mm, com atendimento aos requisitos da norma.
- Foi realizado ensaio Charpy para avaliação da tenacidade do material, sendo atendido os requisitos da norma, entretanto, observa-se redução da energia absorvida para materiais com limites de resistência superiores a 840 MPa. Acredita-se que esta relação possa estar associada à formação de ilhas de M/A e possível formação de precipitados grosseiros de carboneto de titânio. Visando aumento da tenacidade, estão sendo realizados ajustes no projeto de qualidade, tendo como foco a redução da formação de ilha de M/A e obtenção de precipitados menores de TiC.

## REFERÊNCIAS

- 1 European Committee for Standardization: DIN EM 10149 – Hot Rolled Flat Products Made of High Yield Strength Steels for Cord Forming, Setembro, 2013;
- 2 Hulka, K: Thermomechanically Rolled Flat Products. In: Niobium Information nr.5, CBMM, 1995. Disponível em: <http://www.cbmm.com.br>;
- 3 Zhixin, Jia; Hailong, Yi; Jinhua, Jiao; Linxiu, Du, Guodong, Wang: Development of High Strength with High Toughness Pipeline Steel at BX Steel. In The joint Conference HSLA Steel, 2005 and ISUGS, 2005, Sanya – China;
- 4 Gladman, T: The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels. Leeds – Inglaterra. Institute of Materials, University of Leeds, 1997, p. 363;
- 5 Gray, Malcolm J: A guide for Understanding & Specifying Chemical Composition of High Strength Linepipe Steels. In 62º Congresso Anual da ABM, 2007, Vitória – Brasil;
- 6 Kazuhiro, Seto; Yoshimasa, Funakawa, Shinjiro, Kaneko: Hot Rolled High Strength Steel for Suspension and Chassis Parts “Nanohiten” and “BHT Steel. In: JFE Technical Report Nº 10, 2007, p. 19 a 25. Japan;
- 7 Glodowshi, Robert J.: A Review of Vanadium Microalloying in Hot Rolled Steel Sheet Products. In: International Seminar 2005 on Application Technologies of Vanadium in flat, 2005, Pittsburgh – USA;
- 8 Facco, Giovanni Giuseppe: Effect of Cooling Rate and Coiling Temperature on the Final Microstructure of HSLA Steels after HSM and /or Laboratory TMP Processing. 2009. 99 páginas. Dissertação (Mestrado em engenharia nuclear) – Swanson School of Engineering
- 9 Radis, Rene: Numerical Simulation of the Precipitation Kinetics of Nitrides and Carbides in Microalloyed Steel, 2010, 174 paginas. Tese de Doutorado – Graz University of Technology;