

# CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DO AÇO API 5L X80 COM DISTINTOS PROJETOS DE LIGA\*

João Paulo Vilano de Castro<sup>1</sup>  
Vicente Tadeu Lopes Buono<sup>2</sup>  
Carmos Antônio Gandra<sup>3</sup>  
Odair José dos Santos<sup>4</sup>

## Resumo

O processo termomecânico de laminação controlada seguido de resfriamento acelerado permite obter aços de elevada resistência mecânica e tenacidade e excelente soldabilidade, com o emprego de menores adições de elementos de liga, além da exclusão de tratamentos térmicos posteriores. Com a aquisição do sistema de resfriamento acelerado pela Usiminas, CLC, diversos aços vêm sendo desenvolvidos. Este trabalho apresenta a caracterização microestrutural e mecânica relativa à fabricação do aço API 5L X80, utilizando resfriamento acelerado. Foram avaliados os resultados de dois projetos de liga, Nb-Cr-Mo-Ti e Nb-V-Ti, com a laminação terminando no campo intercrítico. O aço Nb-V-Ti foi processado, também, com a laminação concluída no campo austenítico. Em todos, os testes a resistência mecânica e a tenacidade atenderam aos requisitos especificados pela API 5L. Embora a microestrutura dos aços tenha sido distinta em função das suas condições de processamento, a laminação do aço Nb-V-Ti no campo austenítico foi mais vantajosa em consequência de ganhos em produtividade e estabilidade operacional.

**Palavras-chave:** Resfriamento acelerado; Resistência mecânicas; Tenacidade

## MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF DIFFERENT ALLOY DESIGNS OF API 5L X80 PLATES

### Abstract

Thermomechanical control rolling process followed by accelerated cooling allows in obtaining steels with high strength, toughness and excellent weldability, with less alloying elements, and the exclusion of subsequent heat treatments. Since, Usiminas acquired the accelerated cooling technology, CLC, many steels for various applications have being developed. This work presents the microstructural and mechanical characterization related to manufacture of API 5L X80 plates at Usiminas, using accelerated cooling. The results of two alloy designs, Nb-Cr-Mo-Ti and Nb-Ti-V, finished in the intercritical field, were evaluated. Later, the steel Nb-V-Ti was processed finishing in the austenitic field. In both tests the mechanical properties and toughness comply with API 5L. Although the microstructure of steels are different due their processing conditions, rolling Nb-V-Ti steel in the austenitic field is more advantageous considering earnings in productivity and operational stability.

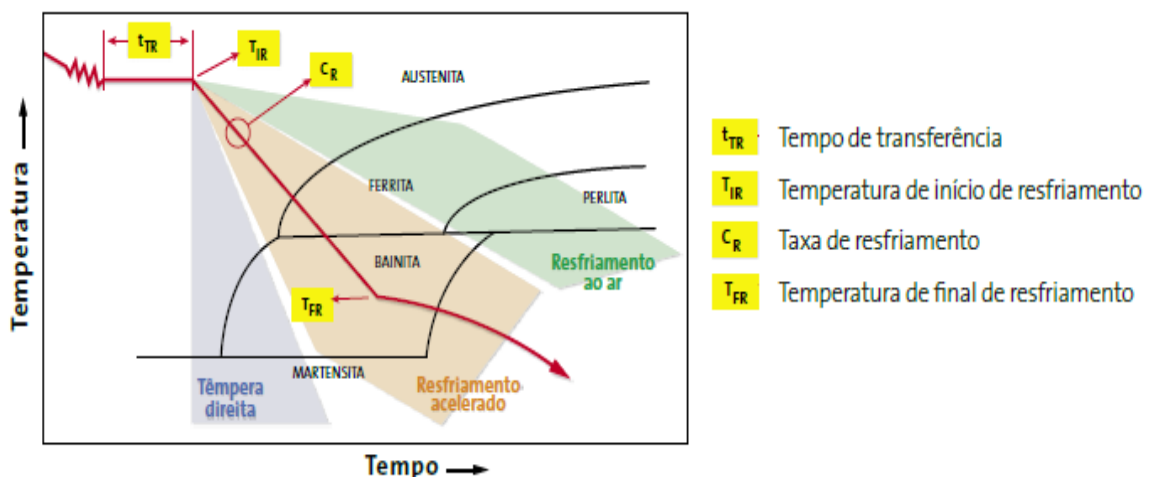
**Keywords:** Accelerated cooling; Mechanical strength; Toughness.

- <sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista, Coordenador de Produção, Gerência de Chapas Grossas, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.
- <sup>2</sup> Professor, M.Sc., D.Sc., Engenharia Metalúrgica, Departamento de Metalurgia - DEMET, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- <sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Engenheiro de Produto Sênior, Gerência de Controle Integrado do Produto, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.
- <sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, M.Sc., D.Sc., Pesquisador Especialista, Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de resfriamento acelerado consiste em promover o resfriamento das chapas com velocidades controladas após a laminação. A principal vantagem do resfriamento acelerado é proporcionar aumento da resistência mecânica, sendo que o mecanismo responsável por esse efeito é o refino do tamanho de grão ferrítico, com ganhos também em relação à tenacidade, o que é obtido através da alteração da microestrutura ferrita-perlita para ferrita e bainita. Com a elevação da taxa de resfriamento, há a formação de bainita em detrimento da perlita.

As curvas de resfriamento de chapas após a laminação controlada, representadas sobre um diagrama CCT de um aço carbono são mostradas na Figura 1.



**Figura 1.** Curvas de resfriamento de chapas após laminação controlada, representadas sobre um diagrama CCT de um aço carbono.

Os aços produzidos por resfriamento acelerado permitem projetos de liga com menores teores de carbono e de elementos de liga para um mesmo grau de resistência, o que resulta em melhoria da característica de soldabilidade em relação aos aços processados de forma convencional. O principal uso do resfriamento acelerado é na fabricação de chapas grossas com requisito de resistência mecânica e espessuras mais elevadas para indústria de energia, onde os requisitos restritivos de tenacidade a baixas temperaturas são especificados.

O processo também atende à produção de vários tipos de aços para o segmento de óleo e gás, vasos de pressão, indústria naval e estrutural. É também possível a fabricação de aços com requisitos de elevada resistência à abrasão, bastando para isso o resfriamento a taxas adequadas até a temperatura ambiente, sendo esse processo denominado têmpera direta.

Focada em agregar alto conteúdo tecnológico aos seus produtos, a Usiminas adquiriu a tecnologia de resfriamento acelerado, através do equipamento CLC (*Continuous on-Line Control*), o qual capacitou a empresa a desenvolver chapas grossas com ganhos em produtividade, qualidade, tempo e custos.

Este trabalho tem o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas de dois aços API X80 obtidos com a utilização do CLC, sendo um projeto de liga com adições de Nb-V-Ti, com um menor  $C_{eq}$  e outro com adições de Nb-Cr-Mo-Ti, em diferentes condições de processamento, visando ganhos em produtividade e estabilidade operacional.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Processamento do Aço

Para realização do estudo, foram selecionadas quinze placas para serem laminadas na linha de chapas grossas da Usiminas, sendo divididas em três grupos, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1.** Tipos de aços utilizados no estudo

Aço	Nomenclatura	Condição de Processamento
A	Nb-Cr-Mo-Ti	Campo Intercrítico
B	Nb-V-Ti	Campo Intercrítico
C	Nb-V-Ti	Campo Austenítico

Essas placas foram reaquecidas por um período suficiente para austenitizar o aço, bem como promover a dissolução das microligas.

A primeira etapa de laminação, denominada desbaste, iniciou-se com temperatura pouco abaixo da temperatura de reaquecimento, aplicando uma redução de aproximadamente 60% em relação à espessura inicial da placa. Visou-se nessa etapa empregar um menor número possível de passes, utilizando-se, portanto elevadas reduções. A laminação de desbaste foi concluída a uma temperatura superior à de não-recristalização ( $T_{nr}$ ) estimada pela equação de Boratto (Equação 1).

$$T_{nr}(^{\circ}\text{C}) = 897 + 464\text{C} + 6445\text{Nb} - 644\sqrt{\text{Nb}} + 732\text{V} - 230\sqrt{\text{V}} + 890\text{Ti} - 363\text{Al} - 357\text{Si} \quad (1)$$

Concluída a etapa de desbaste, os laminados foram submetidos a um tempo de espera para que ocorresse o fenômeno de recristalização. Após este processo, iniciou-se a etapa de acabamento para os aços A e B, onde a deformação total aplicada foi superior a 80%, sendo a espessura final de 18,80 mm. A temperatura final de acabamento no campo intercrítico foi definida considerando os valores de  $A_{r3}$  determinados pela equação de Ouchi, Equação 2.

$$A_{r3}(^{\circ}\text{C}) = 910 + 310\text{C} + 80\text{Mn} - 20\text{Cu} - 15\text{Cr} - 55\text{Ni} - 80\text{Mo} + 0,35(t - 8) \quad (2)$$

Onde: t = espessura (mm)

As condições propostas de acabamento dos aços A e B foram similares, com seu processamento terminando no campo intercrítico. Assim a etapa de acabamento iniciou-se acima da  $A_{r3}$  e foi concluída abaixo desta temperatura. Em seguida os laminados foram submetidos ao resfriamento acelerado.

A condição de processamento do aço C foi com término da laminação no campo austenítico, visando ganhos em estabilidade operacional e produtividade, uma vez que foi possível realizar reduções maiores na fase de acabamento devido à temperatura mais alta. Nesse caso, a temperatura final de acabamento foi superior à  $A_{r3}$ . Nesta segunda proposta de processamento, o resfriamento acelerado iniciou-se no campo austenítico. A taxa de resfriamento acelerado utilizada no CLC para o processamento dos aços na condição de laminação na fase austenítica foi superior à taxa de resfriamento utilizada no processamento dos aços na condição de laminação na fase intercrítica.

## 2.2 Caracterização Metalográfica e Mecânica

A caracterização metalográfica foi efetuada empregando-se técnica de microscopia ótica. Foram obtidas em plano longitudinal à direção de laminação e ao longo de sua espessura.

Para caracterização das propriedades mecânicas dos aços, foram realizados ensaios de dureza, tração (limite de escoamento, limite de resistência, razão elástica e alongamento), Charpy e DWTT (*Drop Weight Tear Test*).

Os ensaios de dureza foram realizados utilizando a escala Vickers com carga de 10 kgf, sendo conduzidos em conformidade com a norma ASTM E92 [1]. Para este ensaio foi utilizada uma amostra para cada chapa, com três medições em cada amostra.

Os ensaios de tração foram efetuados em corpos de prova extraídos com o eixo maior transversal ao comprimento da chapa. Essa condição foi baseada na especificação API 5L [2]. Os corpos de prova utilizados foram no formato retangular com base de medida igual a 50,8 mm e largura igual a 38,1 mm, sendo retiradas três amostras em cada placa.

Os ensaios de impacto Charpy foram realizados a  $-20^{\circ}\text{C}$ , segundo a especificação da norma ASTM E23 [3], em cada condição de processamento. Esses corpos de prova foram extraídos com comprimento transversal ao sentido de laminação das chapas, conforme especificado pela norma ASTM A370 [4]. Foram retiradas duas amostras em cada placa para realização deste ensaio.

Os ensaios de DWTT também foram efetuados nas mesmas condições do ensaio de impacto Charpy, em relação à temperatura, ou seja, a  $-20^{\circ}\text{C}$  e os corpos de prova conforme a especificação API RP 5L3 [5]. Também foram retiradas duas amostras em cada placa para realização deste ensaio.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Processamento do Aço

Em relação ao processamento, as temperaturas e os tempos de permanência no forno de reaquecimento foram cumpridos.

As temperaturas de acabamento obtidas para o processamento do material também atenderam às faixas propostas. Ressalta-se que essa etapa de laminação foi abaixo da  $T_{nr}$ , garantindo o condicionamento da austenita. Já em relação à temperatura  $A_{r3}$ , nota-se que os aços A e B tiveram a etapa laminação de acabamento concluída no campo intercrítico, enquanto o aço C teve todo seu processamento no campo austenítico.

Durante a laminação do aço C, verificou-se a possibilidade de redução de passes de laminação, devido a maiores temperaturas de processamento. Com isso, houve um ganho em produtividade. Outro fator importante a ser discutido foi o ganho em estabilidade operacional, uma vez que este aço foi processado com temperaturas mais elevadas, comparadas às temperaturas de processamento dos aços A e B.

### 3.2 Caracterização Metalográfica e Mecânica

As microestruturas dos aços, observadas a  $\frac{1}{4}$  e no centro da espessura, são mostradas na Figura 2 e apresentaram-se distintas em função das condições de processamento utilizadas. Nos aços processados na condição intercrítica, a

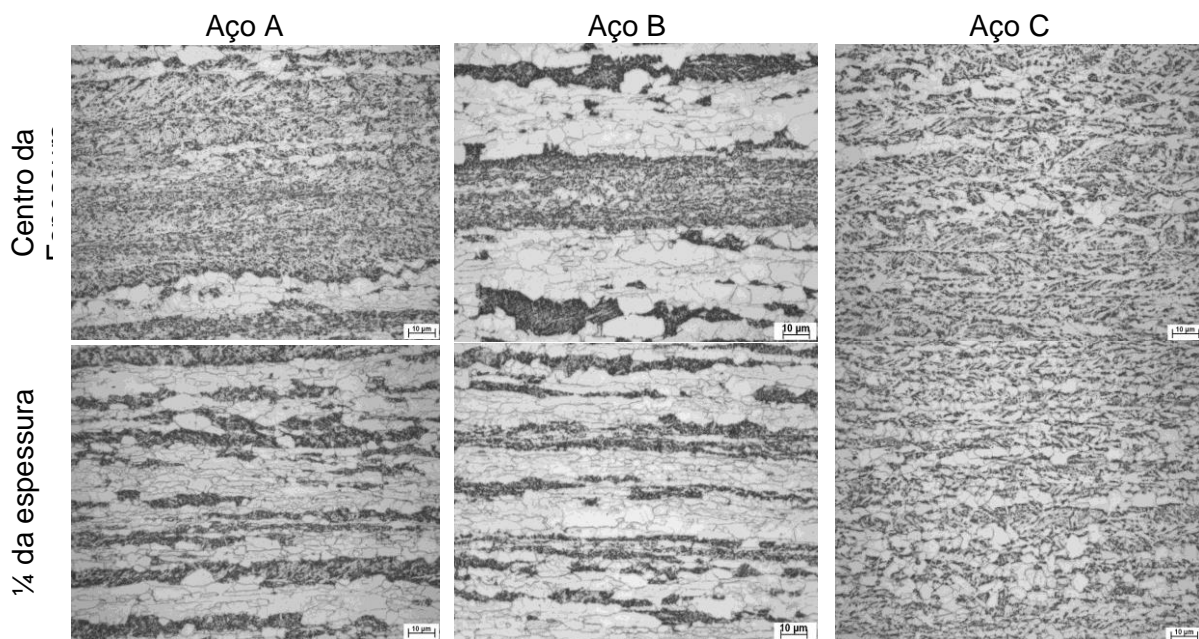


microestrutura foi bandeada, observando-se também a presença de segregação central. Na condição austenítica, evidenciou-se uma distribuição aleatória dos constituintes, sem a ocorrência de segregação no centro da espessura.

Os processamentos dos aços A e B resultaram em uma microestrutura constituída por ferrita e perlita. O resfriamento acelerado destes dois aços, por sua vez, foi interrompido a uma temperatura superior a de  $B_s$ , início da transformação bainítica, estimada pela equação de Bodnar [6] (Equação 3).

$$B_s = 830 - 270C - 90Mn - 37Ni - 70Cr - 88Mo \quad (3)$$

O processamento do aço C foi realizado totalmente no campo austenítico. O início de resfriamento acelerado também ocorreu nessa condição. Isso, por sua vez, resultou em uma microestrutura constituída por bainita e ferrita.

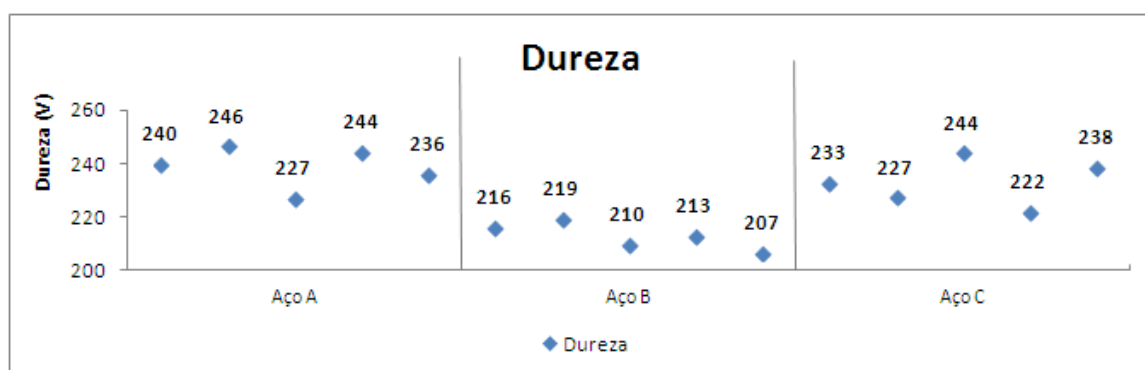


**Figura 2.** Microestrutura dos aços A, B e C, observada no centro e a 1/4 da espessura. Seção longitudinal à direção de laminação. Ataque nital 4%. Aumento de 1.000X.

Observa-se, na Figura 2, uma microestrutura mais homogênea no aço C, onde também podemos evidenciar a não formação de segregação central.

### 3.2.1 Ensaio de dureza

Os valores de dureza médios em cada amostra são apresentados na Figura 3.

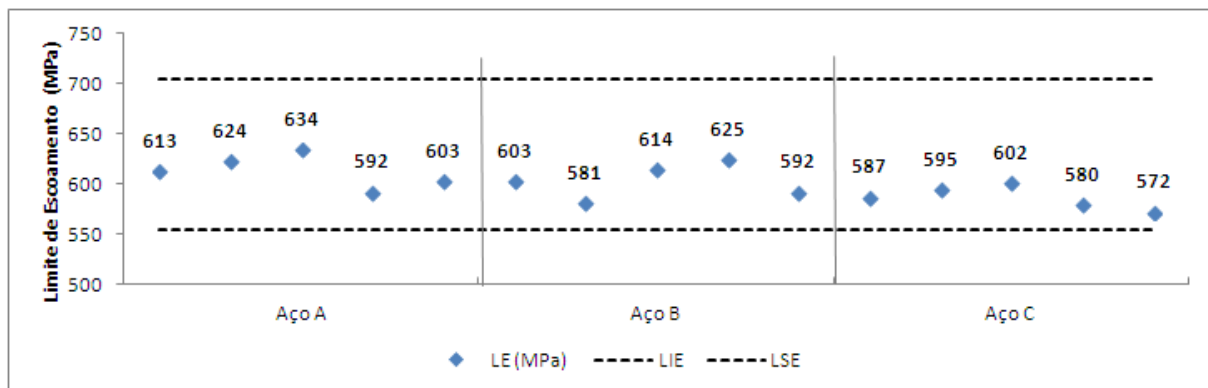


**Figura 3.** Valores médios de dureza em cada amostra.

Os valores de dureza obtidos foram muito similares, sem diferenças significativas entre suas médias, para um nível de confiança de 95%.

### 3.2.2 Ensaio de tração

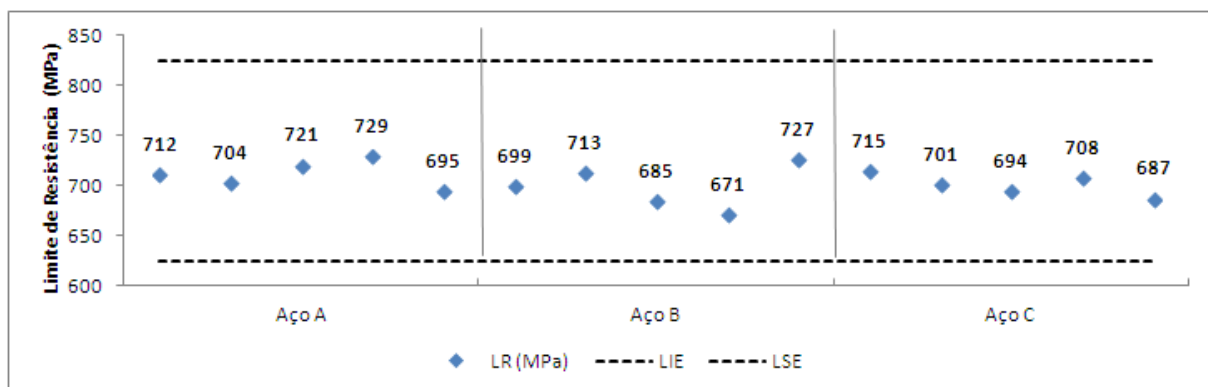
Os limites de escoamento (LE) dos aços foram obtidos com 0,5% de deformação conforme estabelece a especificação API 5L [2]. Os valores médios de limite de escoamento dos aços e o limite superior e inferior especificados para essa propriedade pela API 5L [2] para a chapa de grau X80 são apresentados na Figura 4.



**Figura 4.** Limite de escoamento (LE) e os limites inferior e superior especificados pela API 5L para o grau X80.

Os valores de LE estão em conformidade com a faixa especificada para o grau X80. Embora os materiais possuíssem diferentes composições químicas e tenham sido submetidos a diferentes condições de processamento, não foram verificadas, do ponto de vista estatístico, diferenças significativas entre os valores médios de LE para um nível de confiança de 95%.

Os valores de limite de resistência (LR) também atenderam aos requisitos especificados para chapas de grau X80, não sendo verificada diferença significativa entre os seus valores médios, conforme a Figura 5.



**Figura 5.** Limite de resistência (LR) obtido e os limites inferior e superior especificados pela API 5L para o grau X80.

A especificação API 5L [2] determina que a razão elástica para o grau X80 seja inferior a 93%. Os valores obtidos para os aços avaliados atenderam a este critério, conforme a Figura 6.

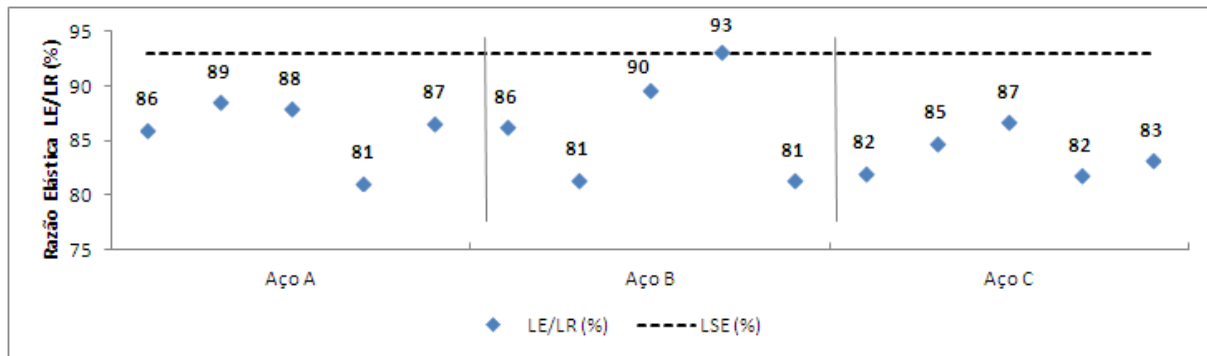


Figura 6. Razão elástica e limite superior de especificação para o grau X80.

No ensaio de tração, o valor de alongamento mínimo especificado para chapas de aço X80 é 17%. Os valores obtidos são apresentados na Figura 7.

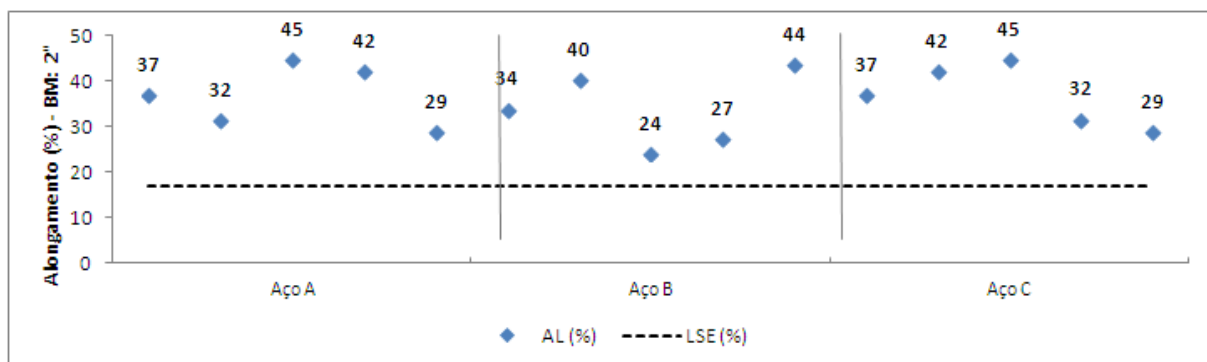


Figura 7. Alongamento percentual dos aços e o limite de especificação para o grau X80

Os valores de alongamento dos aços foram superiores ao mínimo especificado, atendendo ao critério estabelecido.

### 3.2.3 Ensaio de impacto Charpy

A especificação API 5L [2] determina que o teste de impacto Charpy para tubos do grau X80 seja realizado a 0°C, especificando que:

- o valor de energia absorvida deverá ser superior a 27 J (valores médios obtidos em três corpos de prova) e
- a fração de área dúctil observada na superfície de fratura dos corpos de prova deverá ser superior a 85%.

Embora a norma determine a realização do ensaio a 0°C, os fabricantes de tubo usualmente determinam que os testes em chapas sejam em temperaturas inferiores a esta temperatura para compensar uma eventual perda de tenacidade, decorrente do processo de conformação do tubo. Os testes de impacto Charpy dos laminados foram realizados a -20°C. Os resultados médios obtidos para a energia absorvida e a fração de fratura dúctil, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados de teste de impacto Charpy

Aço	Temperatura	Energia absorvida (J)	Fração de área dúctil (%)
		Valores médios	Valores médios
Aço A	- 20 °C	265 – 273 – 279 – 257 – 245	100 - 100 - 100 - 100 - 90
Aço B		230 – 244 – 222 – 238 – 210	90 - 100 - 90 - 100 - 90
Aço C		257 – 265 – 237 – 249 – 271	100 - 100 - 90 - 90 - 100

A tenacidade avaliada pelo teste de impacto Charpy apresentou resultados em conformidade com a especificação. Em relação à energia absorvida, observa-se que mesmo o teste sendo efetuado a uma temperatura mais baixa que a especificada. Os resultados foram muito superiores ao requerido. Assim, mesmo que a conformação chapa-tubo reduza a tenacidade dos aços avaliados, o tubo ainda apresentará valores de energia absorvida bem acima do especificado.

### 3.2.4 Ensaio de DWTT (*Drop Weight Tear Test*)

Os resultados médios obtidos no ensaio de DWTT, fração de área dúctil, são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Resultados de ensaio de DWTT

Aço	Temperatura	Fratura dúctil (%)
		Valores médios
Aço A	- 20 °C	96 – 96 – 100 – 100 – 94
Aço B		94 – 96 – 92 – 96 – 92
Aço C		96 – 100 – 92 – 92 – 100

A API 5L [2], para o ensaio de DWTT realizado a 0°C, especifica que a fração média mínima de área dúctil de dois corpos de prova ensaiados seja de 85%. Neste estudo, os ensaios de DWTT foram realizados a -20°C e verifica-se que os resultados atenderam à especificação, conforme Tabela 3.

## 4 CONCLUSÃO

Foram investigados os efeitos da composição química de dois projetos de aço APIX80, produzidos pela Usiminas, na usina de Ipatinga, utilizando tecnologia CLC, denominados Nb-Cr-Mo-Ti e Nb-V-Ti, em diferentes condições de processamento, visando à obtenção de chapas que atendessem aos requisitos de propriedades mecânicas e tenacidade requeridos para tubos da especificação API 5L. As concepções de liga avaliadas, independentemente da condição de processamento utilizada, obtiveram propriedades mecânicas de tração e tenacidade compatíveis com o grau X80. O projeto de liga do aço Nb-V-Ti apresentou maior robustez pelo fato dos seus valores de propriedades mecânicas e de tenacidade se mostrarem indiferentes às condições de processamento, comparativamente às duas outras condições de processamento, com o término da laminação dentro do campo intercrítico. Dentre os projetos de liga avaliados para a obtenção do grau X80, a condição do aço Nb-V-Ti é a mais promissora, sendo que sua laminação deverá ocorrer completamente no campo austenítico, pois essa condição de processamento proporciona maior produtividade, devido à redução de quatro passes durante a laminação e melhor estabilidade operacional devido ao processamento do material em temperaturas mais elevadas em relação à laminação das chapas no campo intercrítico.

## REFERÊNCIAS

- 1 American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. ASTM E92-82 (2003). West Conshohocken. 2006. 9 p.
- 2 American Petroleum Institute. Specification for Line Pipe. 2012.
- 3 Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers - Parte 1: Método de ensaio.



- 4 American Society for Testing and Materials. ASTM Standard A370, 2012, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. [S.I.]. ASTM International. West Conshohocken.
- 5 API Recommended Practice 5L3 for Conducting Drop-Weight Tear Tests on Line Pipe. Ed 4. 2014.
- 6 BODNAR, R.L., SHEN, Y., LIN, M. Accelerated cooling on Burns Harbor's 160" plate mill In: Conference Proceedings from Materials Solutions '97 on Accelerated Cooling Direct Quenching of Steels, 1997, Indianapolis. Ohio: ASM International, 1997. p.3-13.