



# ESTUDO DA TENACIDADE DE AÇO API 5L X80 POR ENSAIO DE IMPACTO DE ZONAS AFETADAS PELO CALOR MULTIPASSE SIMULADAS<sup>1</sup>

Giancarlo Franko Sanchez Chavez<sup>2</sup>

David Bellentani Rocha<sup>3</sup>

Sérgio Duarte Brandi<sup>4</sup>

## Resumo

Os aços API 5L-X80 são aços alta resistência e baixa liga (ARBL), que apresentam boas propriedades mecânicas como alta resistência mecânica e boa tenacidade. Estes aços são empregados na fabricação de tubos com costura para aplicação na indústria do óleo e gás. Sua microestrutura é composta basicamente de ferrita acicular, ferrita poligonal, bainita e agregados MA, que podem se formar durante a soldagem e prejudicar as propriedades da junta soldada. O objetivo deste trabalho é de avaliar o como afetam os diferentes ciclos térmicos multipasse de soldagem nas propriedades mecânicas das juntas simuladas do aço com relação à orientação entre a junta soldada circunferencial e a solda de costura do tubo. Foram simulados diferentes ciclos térmicos multipasse em corpos-de-prova de aço API 5L X80, com diferentes temperaturas máximas de 900-800 °C na primeira simulação e de 900-800-650 °C na segunda simulação, com base em ciclo térmico multipasse de soldagem real. Foram usinados corpos-de-prova com 12x12x80 mm e simulados em equipamento Gleeble®. Em seguida foram feitos ensaios Charpy V a 0 °C para avaliar o efeito do ciclo térmico nas propriedades mecânicas do aço. As superfícies fraturadas foram observadas em microscópio óptico e eletrônico de varredura (MEV). Os resultados mostraram que a quantidade de MA nas microestruturas simuladas da ZAC são maiores que a encontrada no metal de base. Este valor foi alterado quando foram feitas simulações de soldagem multipasse.

**Palavras-chave:** Aços API 5L X80; Soldabilidade; Propriedades mecânicas; Agregados MA.

## TOUGHNESS STUDY OF API 5L X80 STEEL FOR TESTING THE IMPACT ON HEAT AFFECTED ZONE BY SIMULATED MULTIPASS

The API 5L X80 pipeline steels are high strength low alloy steels (HSLA), which have good mechanical properties and toughness. These steels are used in the manufacture of seam welded tubes for oil and gas industrial application. Its microstructure consists mainly of bainite, acicular ferrite, polygonal ferrite and MA constituent, which is formed during welding and may impair the properties of the welded joint. The aim of this study is to evaluate the effect of different thermal cycles multipass of welding on the mechanical properties of simulated joints of API 5L X80 pipeline steels regarding circumferential welded joint and seam welded joint position. Different thermal cycles were simulated in API5L X80 steel samples with different peak temperatures of 900-800 and 900-800-650 °C. The specimens were machined with 12x12x80 mm and simulated in the Gleeble® equipment. The Charpy V-notch impact tests were performed at 0 °C to evaluate the effect of thermal cycling on the properties of steels. The fractured surfaces were observed by scanning electron microscope (SEM). The results showed that the amount of MA constituent in the simulated microstructures of the heat affect zone (HAZ) is higher than that found in the base metal. This value was changed when they were made simulations of multipass welding.

**Keywords:** API 5L X80 pipe-line steels; Weldability; Mechanical Properties; MA constituent.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. giancarlosanchezch@hotmail.com; sebrandi@usp.br.

<sup>3</sup> Refinaria de Capuava (RECAP) da Petrobrás, Capuava, SP. david.rocha@superig.com.br.

<sup>4</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

Os requisitos de qualidade de tubulações para transmissão de óleo e gás têm aumentado continuamente desde décadas passadas. Em conseqüência, a indústria de óleo e gás demanda maior economia devido às longas linhas de transporte e a extração ativa em áreas de severas condições ambientais. Esta eficiência no transporte pode ser alcançada com a construção de tubulações empregando, aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), como são os aços API 5L X80. Estes aços apresentam boas propriedades mecânicas como elevada resistência mecânica e boa tenacidade, que permitem elevadas pressões de operação e elevadas taxas de transmissão de gás. Os aços API-X80 foram desenvolvidos e aplicados a distintos projetos de tubulação na última década. Além disso, o mercado precisa de mais economia e segurança no transporte de óleo e gás em ambientes hostis, que requisitam aços X80 com melhor tenacidade que os aços anteriormente desenvolvidos para este mesmo fim. Os aços API-X70 apresentam microestrutura com ferrita poligonal e perlita. Contudo, esta microestrutura não garante uma combinação de resistência e tenacidade como a que apresenta o aço X80. O aço API foi desenvolvido para apresentar uma microestrutura com ferrita acicular, bainita e microconstituente Martensita/Austenita (MA) disperso na microestrutura em forma de ilhas. Uma aceitável combinação de resistência e tenacidade é atribuída às microestruturas de ferrita acicular muito fina e ferrita poligonal.<sup>(1)</sup> Segundo Shin et al.,<sup>(2)</sup> o aço X80 laminado na região austenítica, consiste de ferrita acicular e bainita superior, com uma pequena quantidade de MA. Estes microconstituintes conferem boas propriedades de resistência à tração, energia absorvida e temperatura de transição, devido à fração volumétrica de ferrita acicular, que tem um tamanho de grão efetivo pequeno.

Quando o aço API X80 é soldado, mudanças microestruturais ocorrem especialmente na zona afetada pelo calor (ZAC) devido aos ciclos térmicos multipasse que ocorrem na solda. Essas mudanças implicam na formação de novas microestruturas ou na alteração na fração volumétrica de microconstituintes como a ferrita acicular, a bainita, ferrita poligonal, ferrita de Widmanstätten, microconstituente MA, etc. Em conseqüência, essas alterações microestruturais modificam as propriedades mecânicas dos aços para tubulações, utilizados para a construção de linhas de transporte de óleo e gás. As avaliações metalúrgicas de Motohashi, Hagiwara e Masuda,<sup>(3)</sup> revelaram que os principais componentes microestruturais do metal de solda para um processo GMAW em aço X80 foram, a ferrita acicular incluindo uma pequena quantidade de ferrita de contorno de grão, ferrita acicular e o constituinte MA.

Para obter juntas soldadas adequadas uma boa resistência e tenacidade à fratura são requeridas. Isto se consegue avaliando-se os ciclos térmicos multipasse da junta soldada por meio de ensaios de impacto Charpy V, que avalia o efeito do ciclo térmico nas propriedades do aço, além de ensaios de dureza. O ensaio de impacto Charpy-V avalia a energia absorvida pelo material e é um bom método para avaliar a tenacidade a baixas temperaturas de aços para tubulações, já que é um método de ensaio simples e apresenta poucas restrições para com os corpos-de-prova. Como a junta soldada apresenta uma microestrutura complexa que dependem dos ciclos térmicos de soldagem, do teor de elementos de liga, distribuição de tamanho de inclusões não metálicas, microestrutura de solidificação e tamanho de grão austenítico anterior,<sup>(4)</sup> são necessários estudos e avaliações da tenacidade e da

resistência mecânica, além de caracterizações microestruturais em relação à complexa microestrutura obtida.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O metal base utilizado neste trabalho experimental foi uma chapa de aço API 5L X80 produzida pelo processo de laminação controlada sem resfriamento acelerado. O material foi recebido na forma de tubo fabricado pelo processo UOE a partir da chapa com as seguintes dimensões: diâmetro externo de 20 pol. (510 mm) e espessura de parede de 19 mm. A composição química e as propriedades mecânicas do material estão mostradas na Tabela 1 e Tabela 2 respectivamente.

**Tabela 1.** Composição química do tubo API X80 (% em peso), comparados com os valores especificados pela norma API 5L

Aço	C	Mn	Si	Nb	V	Ti	Cr	Mo	Ni	CE <sub>IIV</sub> <sup>(2)</sup>	Pcm <sup>(3)</sup>
X80	0,051	1,805	0,183	0,0658	0,021	0,014	0,161	0,207	0,013	0,43	0,17
Segundo Norma API 5L	≤ 0,22	≤ 1,85	NE <sup>(1)</sup>	≤ 0,15			NE <sup>(1)</sup>	NE <sup>(1)</sup>	NE <sup>(1)</sup>	NE <sup>(1)</sup>	NE <sup>(1)</sup>

Notas 1) NE = não especificado, 2) Carbono equivalente segundo fórmula do IIV, 3) Parâmetro do carbono equivalente

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas do tubo API X80

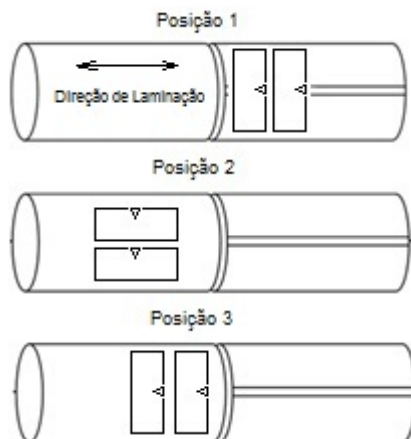
Aço	LE longitudinal	LE Transversal	LR Longitudinal	LR Transversal
API 5L X80	94 ksi (648 MPa)	88 ksi (607 MPa)	107 ksi (738 MPa)	11 ksi (765 MPa)

Foram usinados corpos-de-prova com 12x12x80 mm, a partir de um tubo com as dimensões descritas anteriormente, e em três posições, apresentadas na Figura 1. Estas posições foram designadas: Posição 1 (solda longitudinal do tubo); Posição 2 (material base na seção paralela ao eixo do tubo) e Posição 3 (material base em seção transversal ao eixo do tubo). Em outras palavras, a posição 1 simulará a ZAC produzida pela soldagem circunferencial na soldagem longitudinal de costura do tubo; a posição 2 está relacionada com a direção do material em relação à ZAC produzida pela soldagem de costura do tubo (paralela à direção de laminação da chapa) e a posição 3 relacionada com a ZAC da soldagem circunferencial do tubo (perpendicular à direção de laminação da chapa).

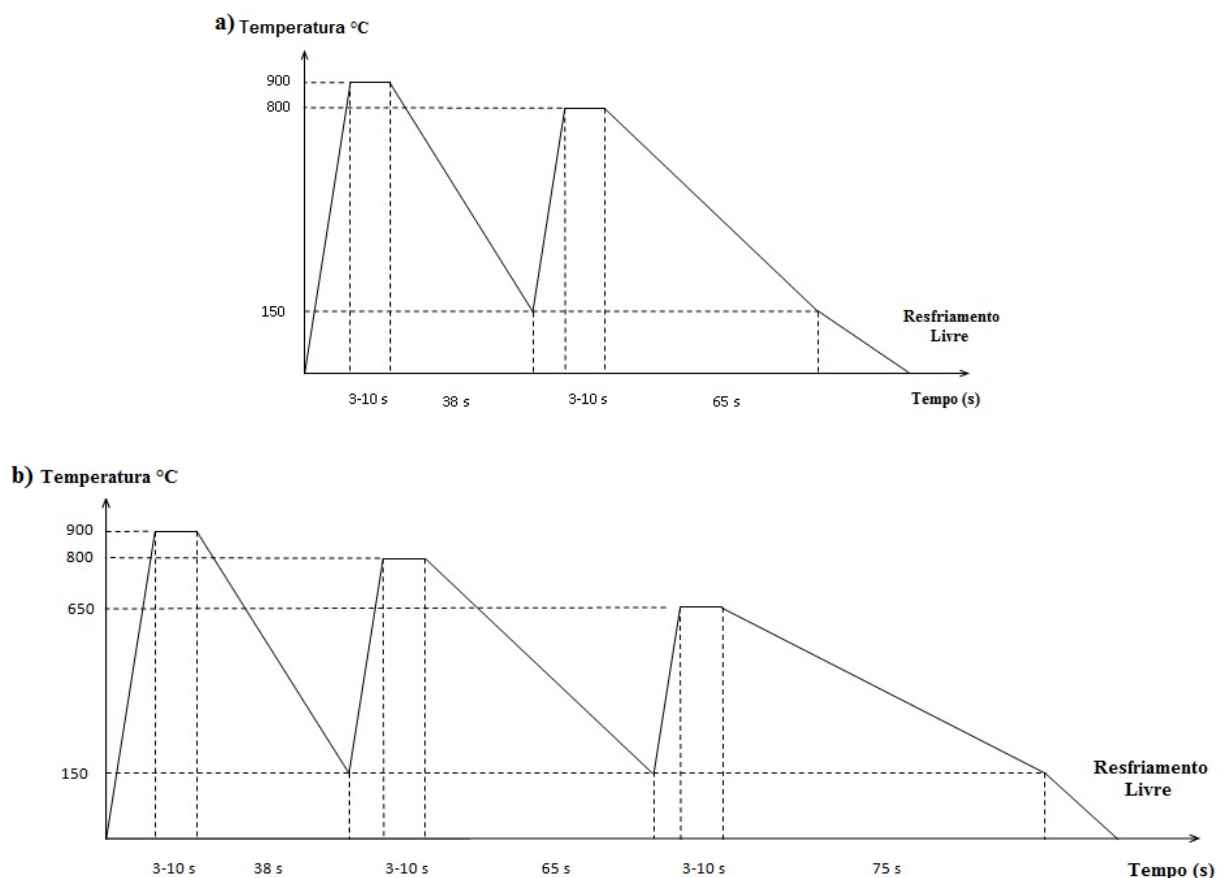
Estes corpos de prova foram simulados em diferentes ciclos térmicos máximos multipasse nas chapas do aço API 5L X80. Os corpos de prova foram aquecidos e resfriados até as temperaturas máximas de 900-800°C e de 900-800-650°C, para simular ciclos térmicos multipasse dentro do campo completamente austenítico, na região intercrítica e na região de formação de microconstituintes aciculares, como a bainita, como se vê na Figura 2. O monitoramento e aquisição dos ciclos térmicos foram realizados e simulados em um equipamento Gleeble® 3180, realizados na The Ohio State University. Foi empregado um termopar tipo K com um diâmetro de 0,2mm localizado na região central do corpo de prova, para controlar os ciclos térmicos simulados na ZAC da junta soldada.

Os ensaios Charpy-V foram feitos a uma temperatura de 0°C em um equipamento de ensaios de impacto com uma capacidade de 300J, para avaliar o efeito do ciclos térmicos multipasse na tenacidade do aço. Três corpos de prova em cada condição foram ensaiados, com dimensões de 10x10x55mm e entalhe em V, segundo a norma ASTM 370/09.<sup>(5)</sup> As superfícies das fraturas foram observadas no microscópio

eletrônico de varredura (MEV) Philips XL30. Sua microestrutura foi observada no microscópio óptico e eletrônico de varredura.



**Figura 1.** Posições no tubo de onde se extraíram os corpos de prova para futura simulação.



**Figura 2.** Desenho dos ciclos térmicos que foram simulados. Em (a) 900-800°C de temperaturas máximas, (b) 900-800-650°C de temperaturas máximas.

### 3 RESULTADOS

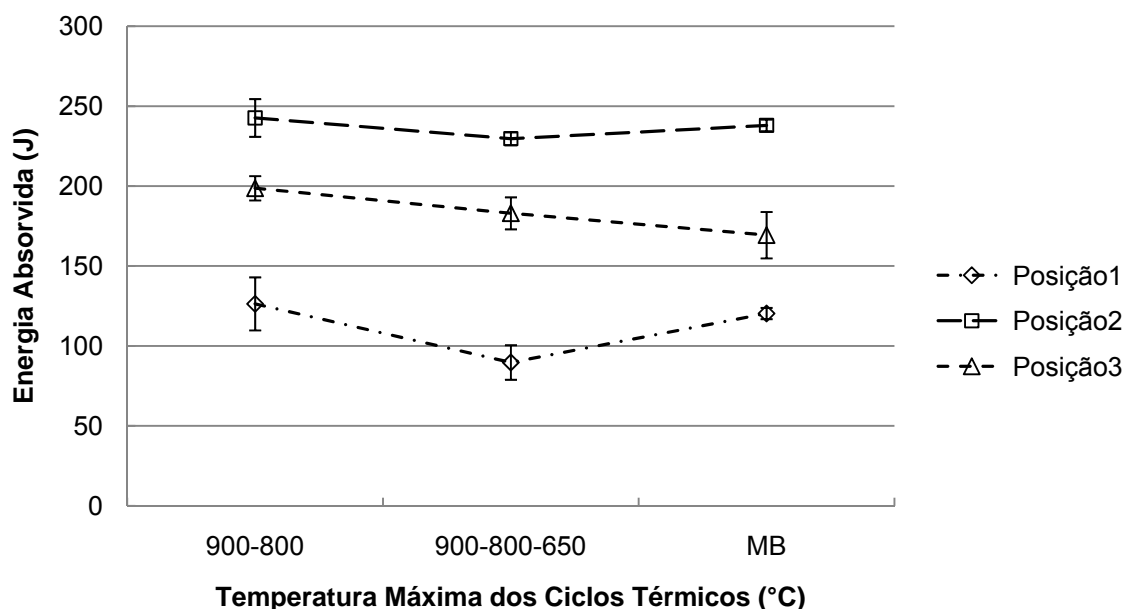
#### 3.1 Propriedades de Ensaio ao Impacto Charpy-V

A Tabela 3 apresenta os dados do ensaio de impacto Charpy-V em função das temperaturas máximas dos ciclos térmicos.

**Tabela 3.** Resultados experimentais do ensaio Charpy-V

Temperatura Máxima dos Ciclos Térmicos (°C)	Energia Absorvida (J)		
	Posição1	Posição2	Posição3
900-800	126	243	199
900-800-650	90	230	183
MB	120	238	169

Com base nos resultados da Tabela 3 foi construída a Figura 3.



**Figura 3.** Energia absorvida versus temperaturas máximas dos ciclos térmicos.

Observando-se a Figura 3 nota-se que a energia absorvida na posição 2 (que são os corpos de prova da posição paralela ao eixo do tubo), foi maior que nas posições 1 e 3, para os diferentes ciclos térmicos simulados de 900°C-800°C-650°C e para o material de base (MB) sem simulação. De todas as posições dos corpos de prova testados, a posição 1 apresentou a menor energia absorvida. Como era esperado na região 1, a ZAC foi produzida em uma microestrutura bruta de fundição, que possui micro segregação de impurezas e elementos de liga, contrastando com a rota de produção das chapas produzidas por processos termomecânicos. Com relação às posições 2 e 3, a diferença da posição do entalhe na energia absorvida, com relação à direção de laminação, é da ordem de 20% a 25% maior quando o entalhe é perpendicular à direção de laminação (posição 2). Segundo a norma API 5L 2000<sup>(6)</sup> o valor mínimo da energia absorvida no ensaio Charpy V, em uma chapa, na temperatura de 0°C tem de ser maior que 68 J no sentido transversal de laminação e 74 J no sentido longitudinal, apresentando 40% da área da fratura com

comportamento dúctil. Roza et al.,<sup>(6)</sup> estudaram um aço API 5L 80 produzido no Brasil, e seu valor médio de energia absorvida, a 0°C, em três corpos de prova foi de 207 J, com 100% da área fraturada apresentando comportamento dúctil, e com temperatura de transição dúctil-frágil abaixo de -60°C. Rocha,<sup>(8)</sup> obteve para a ZAC de soldas circunferenciais reais valores médios de 234 J, a 0 °C. Este resultado está bem próximo dos valores médios obtidos para a posição 2 deste trabalho, como era de se esperar.

Segundo a norma API 5L 2000,<sup>(7)</sup> para que as soldas longitudinais sejam consideradas aprovadas, o valor da energia absorvida deve ser maior ou igual a 101 J a 0°C. Por este critério, todas as regiões da ZAC que foram simuladas estão aceitas, exceto para a posição 1 no ciclo de 900°C-800°C-650°C.

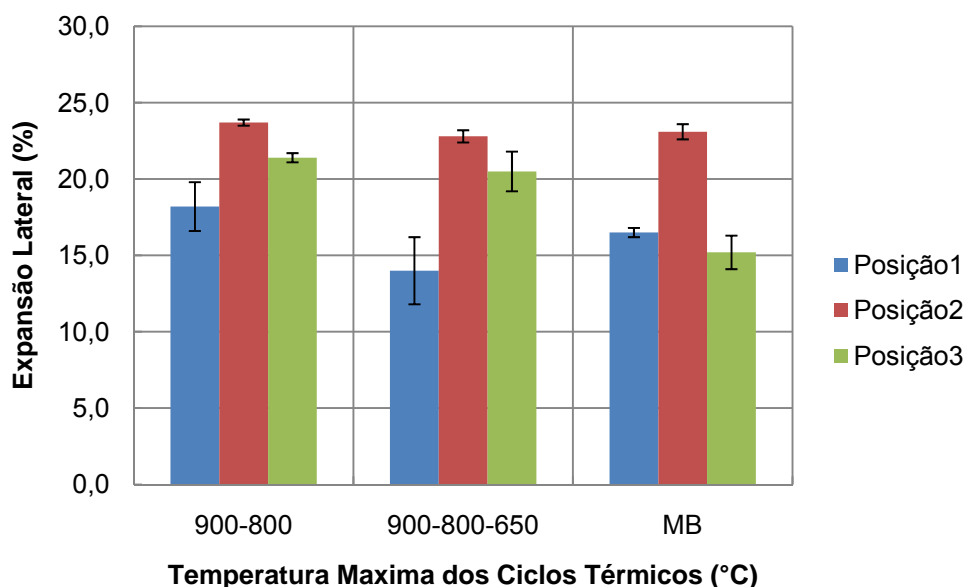
### 3.2 Expansão Lateral do Ensaio de Impacto Charpy-V

A Tabela 4 e a Figura 4 apresentam os valores da expansão lateral em relação às posições onde se foram extraído os corpos de prova e seus respectivos ciclos térmicos.

**Tabela 4.** Valores obtidos para a expansão lateral

Temperatura máxima dos Ciclos Térmicos (°C)	Expansão Lateral (%)		
	Posição1	Posição2	Posição3
900-800	18,2	23,7	21,4
900-800-650	14,0	22,8	20,5
MB	16,5	23,1	15,2

Com base nos resultados da Tabela 4 foi construída a Figura 4.



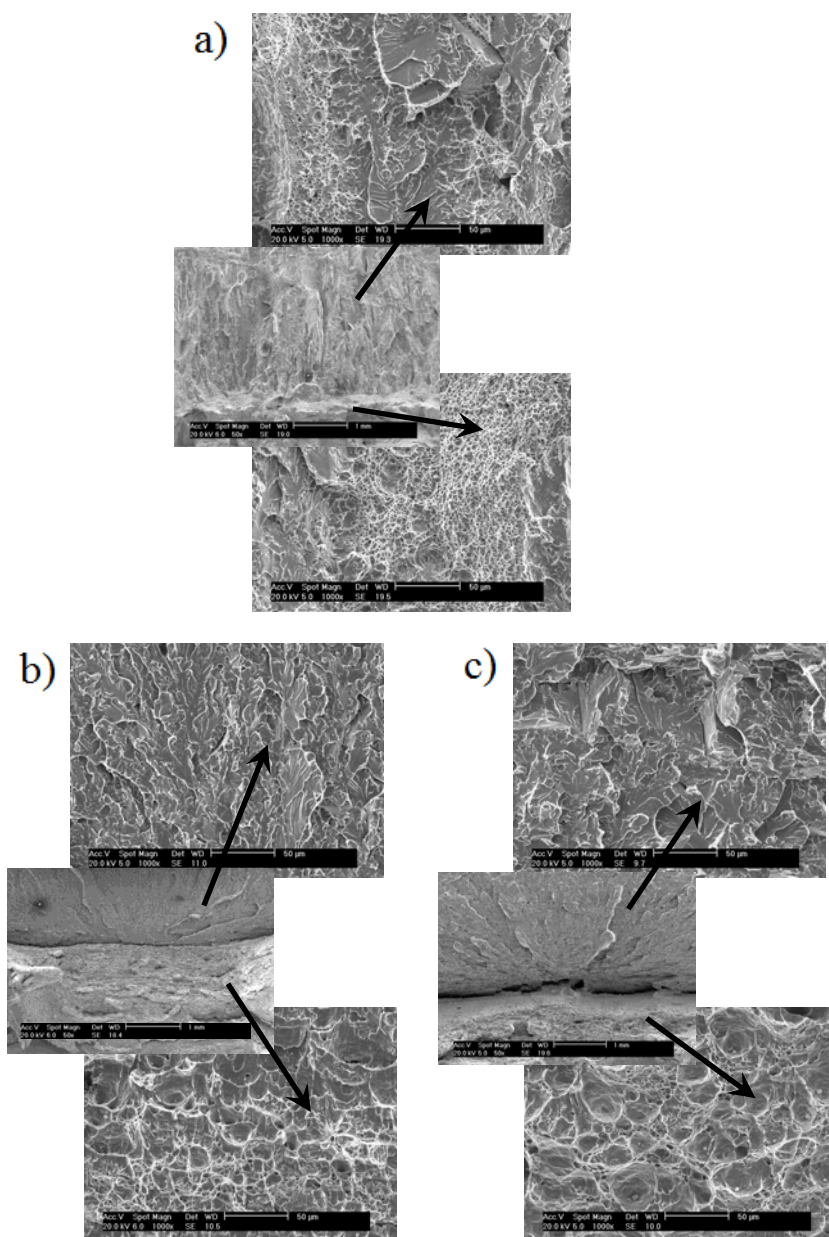
**Figura 4.** Valores da expansão lateral em relação aos ciclos térmicos.

Pela análise da Figura 4 pode-se observar que a posição 2, que é a posição do entalhe perpendicular à direção de laminação, apresenta o maior valor de expansão lateral em relação às posições 1 e 3. A posição 1 apresentou, para os corpos de prova simulados, uma tendência a uma menor ductilidade. Este resultado pode estar associado à diferença na composição desta posição e a presença de micro

inclusões de escória, que são inerentes ao processo de soldagem empregado (soldagem com arco submerso).

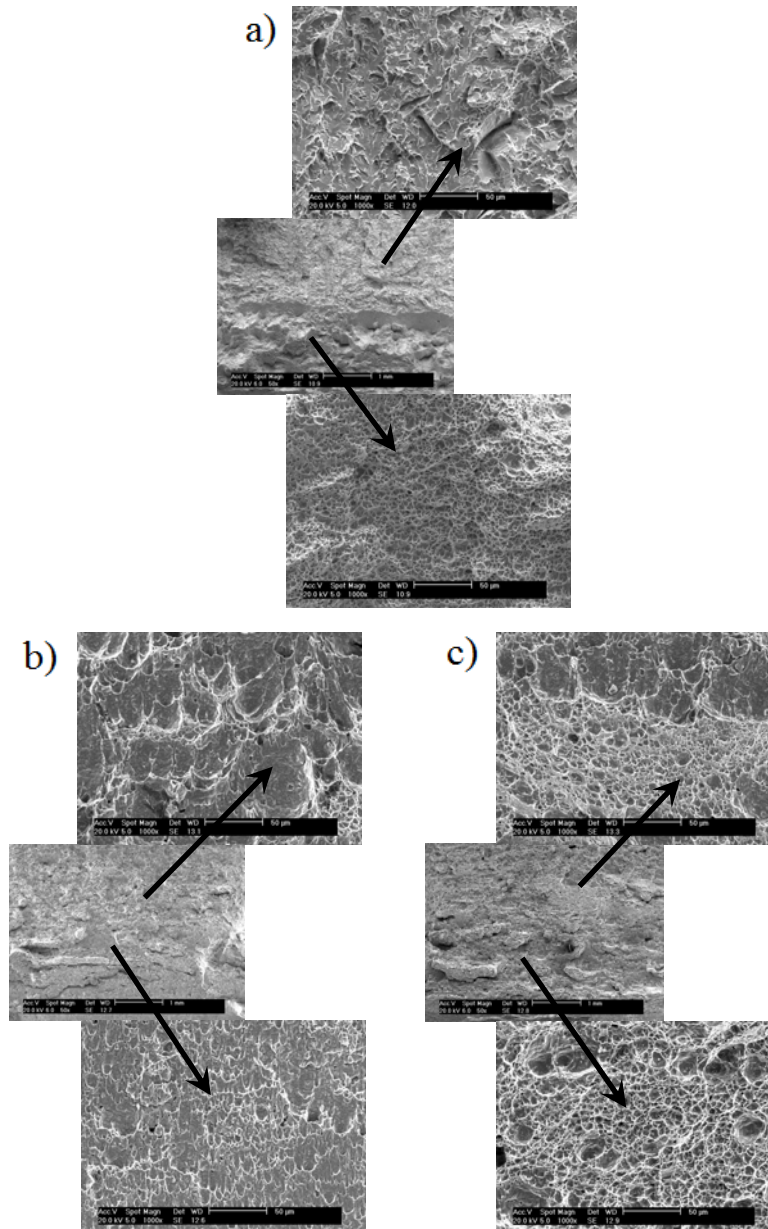
### 3.3 Análise das Fraturas dos Corpos de Prova

Para esta corrida de aço API 5L X80 todas as superfícies fraturadas apresentaram um comportamento dúctil-frágil. Em outras palavras, apesar das energias absorvidas elevadas, este aço está na região da transição dúctil/frágil. Provavelmente a temperatura de transição está abaixo de 0 °C. Segundo Roza et al.<sup>(6)</sup> na temperatura de 0°C a fratura era 100% de aspecto dúctil. A diferença observada nos resultados deve ser devida a diferenças de composição química e de processamento das chapas que produziram os tubos. As Figuras 5 e 6 mostram dois exemplos de tipos de fraturas observadas no MEV.



**Figura 5.** Micrografias feitas no MEV das superfícies de fratura do ensaio Charpy V para os corpos de prova não simulados (MB). Em (a) posição 1; em (b) posição (2) e em (c) posição 3.

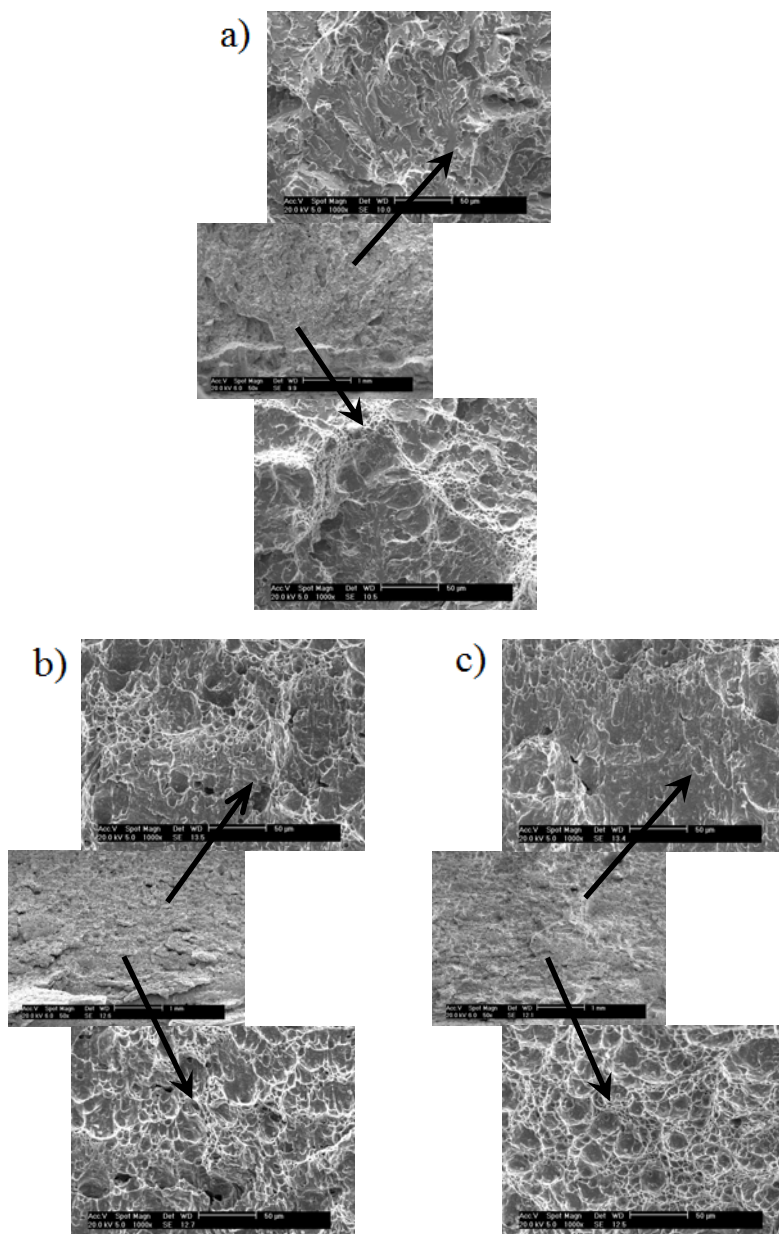
Observando-se a Figura 5 percebe-se que em todas as posições ensaiadas aparecem regiões frágeis e dúcteis da fratura. A foto central da Figura 5(a) mostra uma orientação típica de uma região fundida. As microcavidades da fotografia da Figura 5(a) que apresenta aspecto dúctil são menores que as fotos equivalentes das outras figuras. Esta observação é devida à presença de micro inclusões que produzem um número grande de micro cavidades com tamanho médio menor.



**Figura 6.** Micrografias feitas no MEV das superfícies de fratura do ensaio Charpy V para os corpos de prova simulados na temperatura máxima de 900-800 °C. Em (a) posição 1; em (b) posição (2) e em (c) posição 3.

Observando-se a Figura 6 nota-se que neste caso a posição 1 apresenta fraturas aspecto dúctil-frágil, e as posições 2 e 3 apresentam aspecto dúctil. Na posição que aparenta o aspecto frágil existem regiões pequenas onde a fratura é dúctil. A presença de regiões dúcteis gera um aumento na energia absorvida no ensaio Charpy V.





**Figura 7.** Micrografias feitas no MEV das superfícies de fratura do ensaio Charpy V para os corpos de prova simulados na temperatura máxima de 900-800-650 °C. Em (a) posição 1; em (b) posição (2) e em (c) posição 3.

Observando-se a Figura 7 nota-se que neste caso a posição 1 também apresenta fraturas com aspecto dúctil-frágil, como ocorreu nos corpos de prova do metal base e dos simulados nas temperaturas máximas de 900°C-800°C, enquanto que as posições 2 e 3 apresentam aspecto dúctil. Na posição que aparenta o aspecto frágil existem regiões pequenas onde a fratura é dúctil. A presença de regiões dúcteis gera um aumento na energia absorvida no ensaio Charpy V.

#### 4 CONCLUSÕES

A energia absorvida pela posição 1 é a menor em comparação com a posição 2 e a posição 3, embora esteja situada acima do limite mínimo, porém bem próxima do valor, da energia absorvida especificada pela norma API 5L.<sup>(7)</sup>



Os resultados com a maior energia absorvida e a maior expansão lateral se obtiveram nos corpos de prova do ensaio de impacto na posição 2 (posição transversal do tubo). Este resultado pode ser devido ao sentido de laminação da chapa do aço no processo de fabricação.

Na temperatura ensaiada o aço apresenta um comportamento dúctil-frágil na posição 1 e dúctil onde não esteve o cordão de solda posição 2 e 3, porém com temperatura de transição abaixo da temperatura ensaiada (0 °C).

## Agradecimentos

Os autores agradecem aos Profs. Dr. John C. Lippold e Boian Alexandrov da OSU pela utilização do equipamento Gleeble® e ao técnico Joshua McCarty, da OSU, pela ajuda na execução dos experimentos com a Gleeble®. Agradecemos também ao Dr. Eduardo Hippert Jr. do CENPES-Petrobras pela doação do tubo, a Proaqt pela realização dos ensaios de impacto e a CAPES pela bolsa de mestrado concedida a um dos autores.

## REFERÊNCIAS

- 1 Kim, C. M.; Lee, J. B. Yoo, J. Y., 2005, "A Study on the Metallurgical and Mechanical Characteristics of the Weld Joint of X80 Steel". Proceedings of The Fifteenth (2005) International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea.
- 2 Shin, S. Y.; et. al., 2007, "Correlation of Microestrutura and Charpy Impact Properties in API X70 and X80 Line-pipe Steels". Materials Science and Engineering A, 458 (2007) pp. 281-289.
- 3 Motosashi, H.; Hagiwara, N.; Masuda, T. "Tensile Properties and Microstructure of Weld Metal of X80 Linepipe Steels". IIW Doc XI-822-04.
- 4 Wainer, E.; Brandi, S. D.; Homen De Mello, F. D., 1995, "Soldagem Processos e Metalurgia". Ed. Edgard Blucher, São Paulo, Brazil.
- 5 ASTM Standard E370, 2009, "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products"
- 6 Roza, E. J. et al., 2006, "API 5L X80 ERW Pipelines: Tenaris-Confab & Usiminas Development". Proceeding of the 6th Internacional Pipeline Conference. Alberta, Canada, American Society of Mechanical Engineers. pp 7.
- 7 Specification for line pipe: API specification 5L 2000. American Petroleum Institute. 43<sup>o</sup> Ed. Washington. 154p.
- 8 Rocha, D. B., 2010. "Estudo da Soldabilidade do Tubo API 5L X80 Utilizando os Processos de Soldagem: MAG com Transferência Controlada e Eletrodo Tubular", Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo São Paulo, 216p.