

## EFEITO DA SOLDAGEM CIRCUNFERENCIAL DE TUBOS X65MS, X70MS E X80MS NA ZAC E NO METAL DE SOLDA\*

Gilmar Zacca Batista<sup>1</sup>  
Leonardo da Paixão Carvalho<sup>2</sup>  
Marcinei Santos da Silva<sup>3</sup>  
Marcos Ponciano Souza<sup>4</sup>

### Resumo

Este trabalho analisa a tenacidade e dureza do metal de solda e ZAC da solda circunferencial de tubos X65, X70 e X80 para serviço ácido. Os tubos de elevada resistência, fabricados para serviço ácido, apresentam grande desafio para a soldagem. Os consumíveis e processos devem ser capazes de produzir uma junta soldada de alta resistência, baixa dureza e elevada tenacidade. O objetivo deste estudo foi identificar problemas de amolecimento ou fragilização da ZAC e verificar se a elevada resistência não prejudica a tenacidade e dureza do metal de solda. A metodologia incluiu a soldagem circunferencial e ensaios de dureza e CTOD. Os resultados mostraram que o metal de solda e a ZAC do X65 e X70, são adequadas para o emprego em dutos terrestres. Observou-se um amolecimento na ZAC do X70 e X80 que, de acordo com a literatura, não é crítico para projetos baseados em tensão. Para o X80, o CTOD da ZAC ficou abaixo do valor mínimo desejado, indicando que pode ter ocorrido a formação de zonas frágeis localizadas e resultando na necessidade de estudos complementares para ajustar os parâmetros de soldagem. Os resultados deste estudo servem como base para uma futura aplicação destes materiais em campo.

**Palavras-chave:** Soldagem circunferencial; X70; X80; Serviço ácido.

### EFFECT OF GIRTH WELDING AT THE WELD METAL AND HAZ OF X65MS, X70MS AND X80MS PIPES

#### Abstract

This paper analyses the HAZ and weld metal toughness and hardness of sour service X65, X70 and X80 girth welds. The high strength steel pipes produced for sour service introduce a big challenge for welding. The process and consumables applied should be able to produce a high strength, high toughness and low hardness welded joint. The purpose of this study was identify HAZ softening and embrittlement and whether the high strength does not affect the weld metal hardness and toughness. The methodology includes pipe girth welding, CTOD and hardness tests. Results showed that HAZ and weld metal of X65 and X70 pipes are suitable for pipelines. The X70 and X80 HAZ presented softening that, according to the literature, is not a critical point for stress based design. The X80 HAZ presented CTOD below the desired value. It indicates that local brittle zones could be present and new tests should be done in order to define better welding parameters.

**Keywords:** Girth welding; X70; X80; Sour service.

<sup>1</sup> M.Sc. Engenheiro Metalúrgico, Engenharia de Dutos, Petrobras. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Desenvolvimento e Qualificação de Tecnologias em Construção e Montagem. Petrobras. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> M.Sc. Engenheiro Metalúrgico, Engenharia de Dutos. ATNAS. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> M.Sc. Engenheiro Mecânico, Centro de Pesquisas, Tenaris. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o transporte de gás das plataformas de Petróleo para o continente é feito através de gasodutos construídos em tubos de aço fabricados de acordo com a norma API 5L [1]. Com a descoberta dos campos do pré-sal, um novo e desafiador cenário surgiu para o transporte do gás. A presença de H<sub>2</sub>S no gás e a elevada distância a ser percorrida resultaram na necessidade de aços de elevada resistência mecânica e adequados para evitar o fenômeno de corrosão sob-tensão.

No trecho terrestre do gasoduto, o emprego de aços com resistência inferior ao grau X65, poderia resultar em tubos de elevada espessura, de difícil produção e não habituais para a construção de dutos terrestres. A solução para este cenário é o emprego de aços de alta resistência fabricados segundo a norma API 5L [1] nos graus X65, X70 e X80. O grande desafio para estes materiais é que quanto maior é o grau de resistência do tubo, mais susceptível ele se torna ao processo de corrosão sob-tensão. O grau API 5L X65 já tem sido, há alguns anos, empregado com sucesso em ambientes com H<sub>2</sub>S, enquanto que os graus X70 e X80 foram recentemente desenvolvidos para essa aplicação.

Uma característica dos tubos API 5L X65, X70 e X80 fabricados para serviço ácido é que sua resistência mecânica é obtida através de tratamento termomecânico seguido de resfriamento acelerado, com o intuito de conseguir uma elevada resistência mecânica com baixa adição de elementos de liga. Para empregar estes tubos na construção de dutos terrestres é necessário analisar cuidadosamente os efeitos que a soldagem circunferencial, realizada em campo, pode provocar nas propriedades da ZAC e do metal de solda.

Na soldagem de aços de alta resistência, tem sido observada uma redução de dureza que ocorre na zona afetada pelo calor, também conhecida como amolecimento da ZAC. Tal fenômeno é função do efeito do aporte térmico nos mecanismos de endurecimento utilizados para estes aços. Além do amolecimento, a ZAC pode sofrer fragilização devido ao crescimento de grão e formação de fases frágeis. No metal de solda é preciso avaliar se os elevados valores de resistência mecânica requeridos não prejudicam a tenacidade e a dureza. Este trabalho avalia como a soldagem de um duto, fabricado com estes materiais, afeta as propriedades da solda e da ZAC com a finalidade de fornecer informações que possam servir como base para uma futura aplicação destes materiais em campo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

O estudo foi realizado utilizando tubos API 5L X65, X70 e X80 fabricados com requisitos de serviço ácido. Estes materiais apresentam uma composição química e parâmetros de processamento bastante específicos de modo a garantir a resistência ao fenômeno de corrosão sob-tensão e trincamento induzido pelo hidrogênio. A Tabela 1 mostra a composição química dos tubos.

O diâmetro e a espessura dos tubos utilizados foram: 24" x 1,452" (610mm x 36,88mm) para o X65; 20" x 1" (508mm x 25,4mm) para o X70 e 24" x 1,25" (610mm x 31,8mm) para o X80.

**Tabela 1.** Composição química dos tubos

	C	Mn	Si	Nb	V	Ti	Cr	Cu	Mo
X65	0,04	1,45	0,310	0,045	0,001	0,014	0,036	0,232	0,019
X70	0,04	1,23	0,237	0,048	0,002	0,010	0,320	0,007	0,090
X80	0,05	1,62	0,270	0,033	0,005	0,013	0,170	0,011	0,113
	Ca	Al	N	P	S	Ni	B	CE	
								IIW	Pcm
X65	0,0012	0,035	0,0056	0,011	0,001	0,265	0,0003	0,33	0,15
X70	0,0016	0,030	0,0090	0,007	0,002	0,366	0,0002	0,35	0,14
X80	0,0018	0,031	0,0070	0,009	0,003	0,032	0,0003	0,38	0,16

## 2.2 Soldagem

Para a realização da soldagem, os tubos foram cortados em anéis de cerca de 300 mm de comprimento e biselados de acordo com o ASME B31.8 [2].

A soldagem dos anéis foi executada utilizando os processos TIG para o passe de raiz e passe de reforço de raiz e arame tubular com proteção gasosa para os passes de enchimento e acabamento. Para atender os requisitos de resistência mecânica específicos para cada grau de tubo, consumíveis com diferentes níveis de resistência foram utilizados nos passes de enchimento e acabamento. A Tabela 2 mostra as propriedades mecânicas típicas dos consumíveis, extraídas dos catálogos dos fabricantes, e as propriedades definidas pela especificação AWS.

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas dos consumíveis

Tubo	Consumível	Propriedades Mecânicas Típicas			Propriedades Mecânicas Especificadas pela AWS		
		LE* (MPa)	LR* (MPa)	Energia / Temperatura	LE* (MPa)	LR* (MPa)	Energia / Temperatura
X65	AWS A5.18 ER 70S-6	525	595	70J/-30°C	400	480	27J/-30°C
	AWS A5.20 E71T-1CJ	565	605	130J/-40°C	390	490-670	27J/-40°C
X70	AWS A5.18 ER 70S-3	500	600	200J/-20°C	400	480	27J/-20°C
	AWS A5.29 E81T1-Ni1C	642	693	89J/-30°C	470	550-690	27J/-30°C
X80	AWS A5.18 ER 70S-3	420	515	90J/-30°C	400	480	27J/-20°C
	AWS A5.29 E101T1-G	654	709	70J/-40°C	610	690-830	--

\*LE: Limite de escoamento. LR: Limite de resistência

A Tabela 3 mostra a composição química dos consumíveis utilizados no enchimento. Pode ser observado que quanto maior o grau de resistência, maior é a quantidade de elementos de liga.

**Tabela 3.** Composição química dos consumíveis

Tubo	Consumível	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V
X65	E71T-1CJ	0,072	1,20	0,45	0,019	0,010	0,008	0,024	--	--	--
X70	E81T1-Ni1C	0,046	1,47	0,41	0,010	0,013	0,820	0,030	0,02	--	0,02
X80	E101T1-G	0,050	1,57	0,38	0,010	0,020	0,900	0,040	0,17	--	0,02

A soldagem foi conduzida seguindo as mesmas técnicas de soldagem de dutos que são empregadas no campo. A Figura 1 mostra a soldagem do tubo API 5L X70 com o processo TIG, utilizado no passe de raiz e passe quente, e o processo de arame tubular para o enchimento e acabamento. O gás de proteção utilizado na raiz foi 100% Ar para os três materiais. Para a soldagem com arame tubular, foi utilizado 100% CO<sub>2</sub> na soldagem do X65 e mistura de 80%Ar e 20%CO<sub>2</sub> para o X70 e X80. Foi utilizada uma temperatura de preaquecimento de 100°C e interpasse de 175°C.



Figura 1. Soldagem com os processos TIG e FCAW (tubo X70).

Os parâmetros adotados na soldagem das juntas X65, X70 e X80 estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de soldagem

Material	X65	X70	X80
<b>Corrente (A)</b>	Raiz: 100–130 Passe quente: 160–176 Enchimento: 135–190	Raiz: 150-155 Passe quente: 200-215 Enchimento: 185 – 215	Raiz: 150 Passe quente: 198 Enchimento: 198-220
<b>Voltagem (V)</b>	Raiz: 9–12 Passe quente: 10–14 Enchimento: 22-27	Raiz: 10,5-11 Passe quente: 10,5-11 Enchimento: 21,1-22,7	Raiz: 12 Passe quente: 13 Enchimento: 21,9-22,5
<b>Aporte Térmico (kJ/mm)</b>	Raiz: 0,85-0,91 Passe quente: 1,15–1,61 Enchimento: 1,11–2,63	Raiz: 2,8-2,9 Passe quente: 1,7-1,8 Enchimento: 0,7-2,3	Raiz: 4,46 Passe quente: 2,49 Enchimento: 1,09-1,98

### 2.3 Ensaios Mecânicos

Para a realização de ensaios mecânicos, foram removidos corpos de prova de CTOD e dureza. O objetivo destes ensaios não foi de qualificar o procedimento de soldagem, mas apenas avaliar o efeito da soldagem nas propriedades de tenacidade e dureza do metal de solda e ZAC.

De acordo com Chen e Wang [3], na ZAC dos aços de alta resistência, pode ocorrer o fenômeno de amolecimento devido às alterações microestruturais provocadas pelo ciclo térmico de soldagem. Pepler et al [4] comentam que uma baixa tenacidade pode ser esperada na região de grãos grosseiros da ZAC devido ao crescimento de grão. Além disso, Terada et al [5] comentam que a tenacidade da ZAC pode ser reduzida devido a presença de fases frágeis, incluindo a formação de microconstituente AM (Austenita-Martensita) que, segundo Babu et al [6], pode deteriorar ou melhorar as propriedades, dependendo da sua morfologia ou



concentração de carbono. Os ensaios de dureza e CTOD tem o objetivo de verificar se estes fenômenos são significativos na soldagem dos tubos de alta resistência fabricados para serviço ácido.

Para o ensaio de CTOD foram utilizados corpos de prova do tipo SE (B) de seção retangular Bx2B, para o metal de solda, e BxB para a ZAC, de acordo com a norma BS 7448 [7]. No metal de solda, o entalhe foi feito de acordo com orientação NP e na ZAC, de acordo com a orientação NQ, de modo que a pré-trinca de fadiga ficasse posicionada na região de grãos grosseiros da ZAC. O ensaio de CTOD foi realizado nas posições 3, 6 e 12 horas (comparando a circunferência do tubo com um relógio) com um mínimo de três corpos de prova para cada posição. A temperatura do ensaio foi de 0 °C para o X65 e X80 e -10 °C para o X70.

Para o ensaio de dureza, foram extraídos corpos de prova da geratriz inferior da junta soldada. Foi utilizada a figura da norma ISO 15156-2 [8], que define os requisitos para serviço com H<sub>2</sub>S. A Figura 2 mostra os locais para medição de dureza.

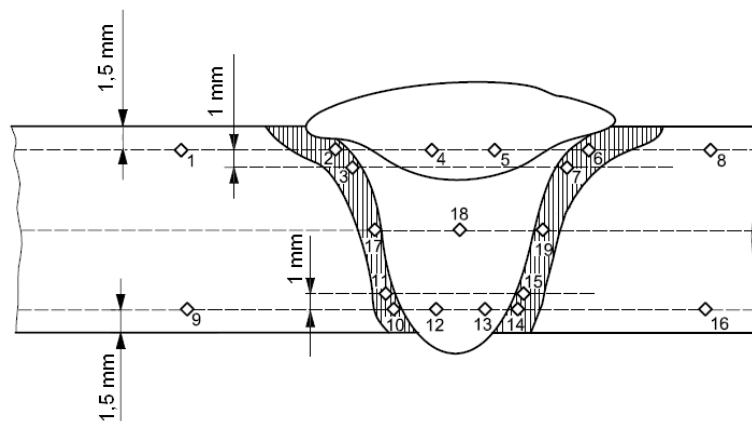
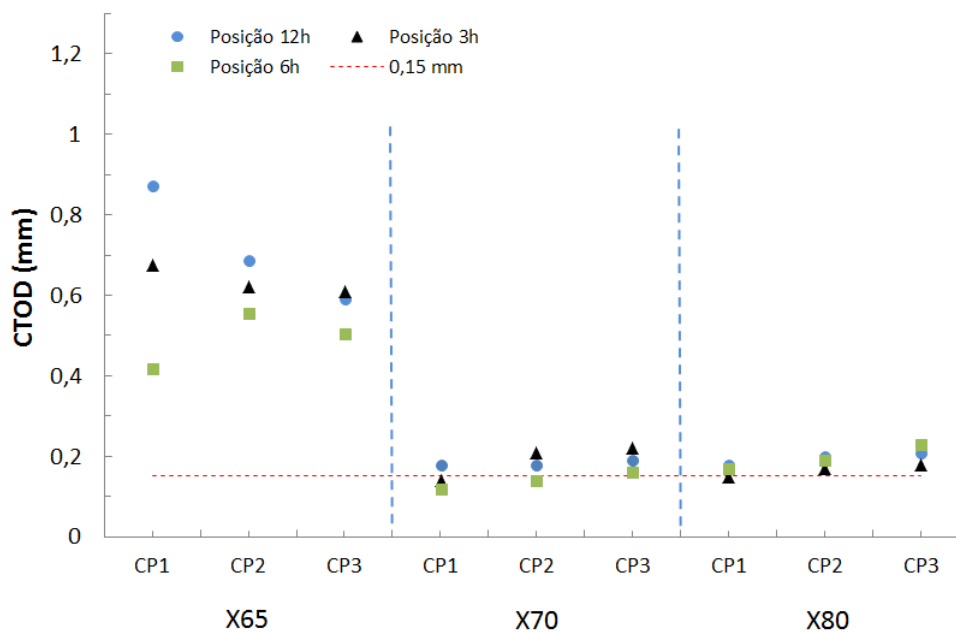


Figura 2. Locais de medição de dureza [8].

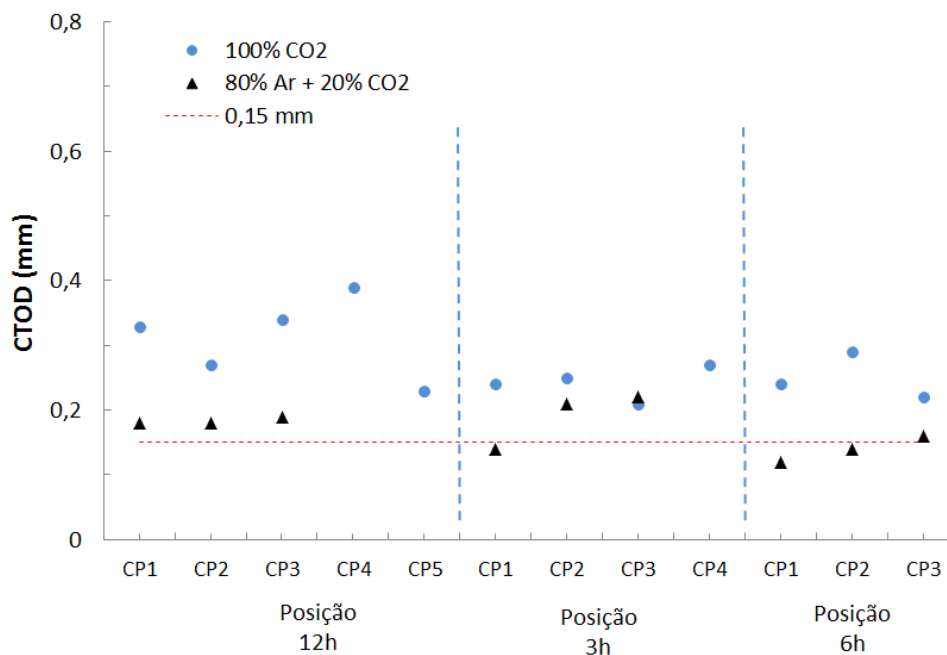
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de CTOD foram utilizados para verificar o comportamento da tenacidade do metal de solda. A Figura 3 mostra uma comparação entre os valores de CTOD do metal de solda dos materiais X65, X70 e X80. A linha vermelha no gráfico representa um valor mínimo desejado de 0,15 mm recomendado por Hopkins e Denys [9] de modo a permitir o emprego de critérios alternativos para aceitação de defeitos baseados em mecânica da fratura. Isto possibilita lidar com situações onde uma análise mais específica é necessária, como no caso de defeitos encontrados durante a operação do duto [9].

Para o metal de solda do X70, alguns valores ficaram abaixo do valor mínimo desejado de 0,15mm. Uma alternativa para melhorar a tenacidade do X70 é alterar a composição do gás de proteção de 80% Ar e 20% CO<sub>2</sub> para 100% CO<sub>2</sub>. Os elementos de liga utilizados na desoxidação como Mn e Si podem permanecer no metal de solda quando uma mistura de Ar e CO<sub>2</sub> é utilizada e consequentemente, reduzir a tenacidade [10]. O uso de 100% CO<sub>2</sub> reduz a quantidade de Mn e Si e também aumenta o nível de oxigênio do metal de solda, promovendo a formação de ferrita acicular e melhorando a tenacidade. Para avaliar o efeito do gás, uma outra junta foi produzida utilizando uma proteção gasosa com 100% de CO<sub>2</sub>. A Figura 4 mostra que os resultados de CTOD foram superiores. A nomenclatura “CP” no eixo horizontal refere-se a corpo de prova.



**Figura 3.** Valores de CTOD do metal de solda para o X65, X70 e X80.



**Figura 4.** Valores de CTOD para o metal de solda do X70.

Os resultados de tenacidade foram piores para os graus mais elevados. Geralmente, a adição de elementos de liga para atender os elevados níveis de resistência mecânica aumentam a dificuldade de se obter elevada tenacidade no metal de solda. Felber [11] comenta que para atender os requisitos de elevada resistência é necessário ter um metal de solda com adições de Ni e Mo. Estes elementos estão presentes na composição dos consumíveis E81T1-Ni1C e E101T1-G e não foram utilizados na composição do E71T-1CJ, que apresenta ainda, um menor teor de Mn. De acordo com Procaro e Melfi [12], os consumíveis com Mo não são tipicamente utilizados para soldagem multipasse. Embora o Mo seja adicionado para melhorar a tenacidade na condição de como soldado, promovendo a formação de ferrita

acicular, pode ocorrer redução de tenacidade quando reaquecido. Com relação aos teores de Mn e Si, Procaro e Melfi [12] comentam que para valores de Mn acima de 1,69% e Si acima de 0,33% ocorre uma redução de tenacidade devido ao aumento de dureza e redução na fração volumétrica de ferrita acicular. Isto também explica a melhor tenacidade do metal de solda do X70 soldado com 100%CO<sub>2</sub>, onde a formação de uma escória mais oxidante reduziu o teor de Mn do metal de solda. Os valores de CTOD da ZAC, para as soldas realizadas no X65, X70 e X80, podem ser vistos na Figura 5.

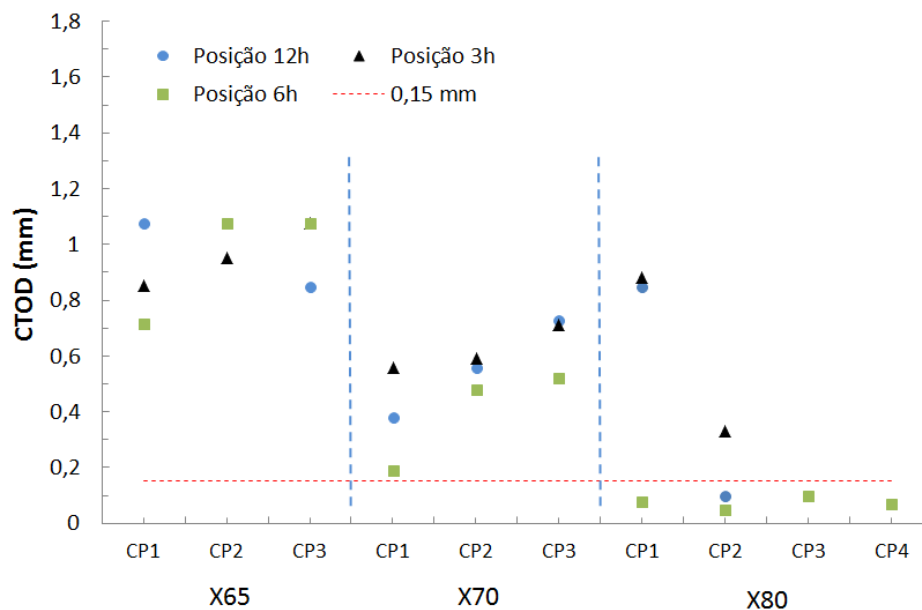


Figura 5. Valores de CTOD da ZAC para o X65, X70 e X80.

No ensaio de CTOD da ZAC do tubo API 5L X80, cinco corpos de prova apresentaram valores abaixo de 0,15 mm e apenas três corpos de prova apresentaram valores mais elevados. Barnes [13] comenta que zonas frágeis localizadas, conhecidas pela sigla LBZ de *Local Brittle Zones*, ocorrem especialmente na região de grãos grosseiros da ZAC que passa pelo reaquecimento intercrítico na soldagem multipasse. Essas zonas frágeis podem ocorrer devido à formação de microconstituintes AM (Austenita-Martensita).

Segundo Barnes [14] o espalhamento observado nos resultados ocorre devido ao pequeno tamanho das zonas frágeis localizadas de modo que a ponta da trinca de fadiga pode encontrar esta região em alguns casos e em outros não.

Uma maneira de avaliar melhor a causa da baixa tenacidade obtida na ZAC do X80 seria a realização de um estudo, baseado na norma API RP 2Z [15], onde a tenacidade dessa região pudesse ser avaliada em detalhes. Além disso, uma análise microestrutural seria útil para verificar se a presença de microconstituente AM na ZAC está contribuindo para a redução da tenacidade.

Os resultados obtidos no ensaio de dureza para o X65, X70 e X80 são mostrados na Figura 6.

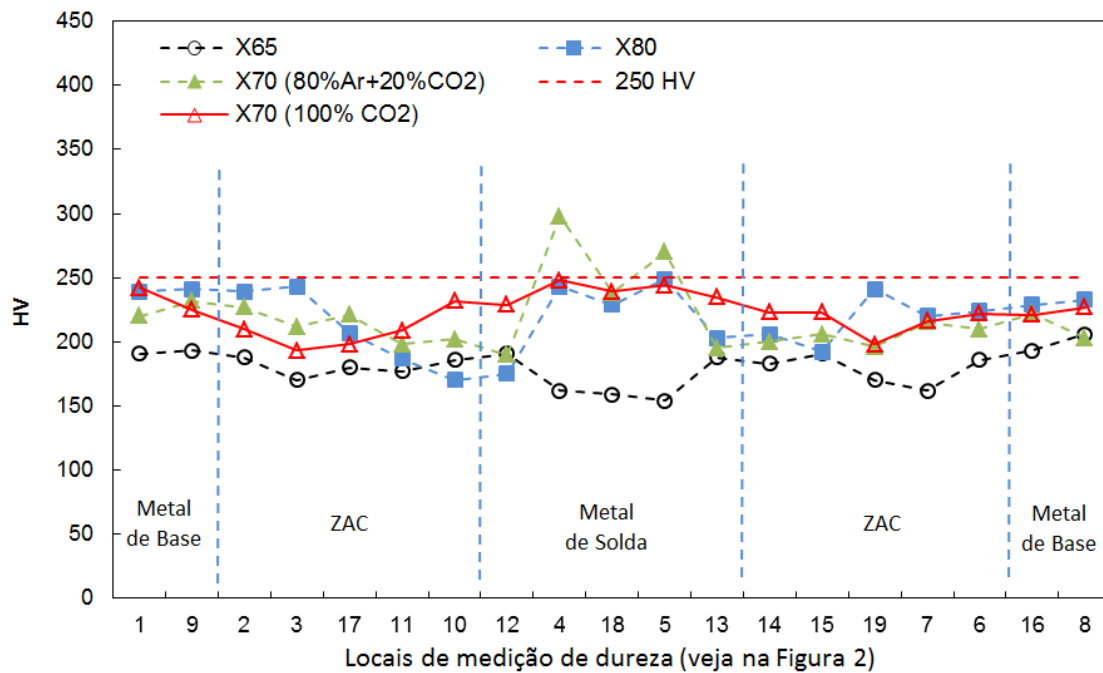


Figura 6. Perfil de dureza.

De acordo com a ISO 15156-2 [8], o valor máximo de dureza aceitável para aplicação em ambientes com  $H_2S$  é de 250 HV, sendo que para os passes de acabamento pode ser aceito um valor até 275 HV, desde que a espessura do tubo seja superior a 9 mm e o reforço da solda não fique exposto diretamente ao ambiente contendo  $H_2S$ . Na Figura 6 pode ser observado que para o X70 soldado com 80% Ar e 20%  $CO_2$  os valores de dureza nos pontos 4 e 5, correspondentes aos passes de acabamento, apresentaram 298 HV e 270HV, respectivamente. Neste caso, como ultrapassou o limite de 275HV, a ISO 15156-2 [8] determina que a junta seja testada e aprovada no ensaio de corrosão sob-tensão, para que o procedimento de soldagem seja aprovado. Entretanto, o emprego do gás de proteção com 100%  $CO_2$  reduz a quantidade de Mn e Si no metal de solda resultando em menores valores de dureza.

A Figura 6 também mostra um pequeno amolecimento da ZAC, sendo mais pronunciado nos graus X70 e X80. De acordo com Denys e Lefevre [16], a susceptibilidade ao amolecimento da ZAC aumenta com a redução dos elementos de liga e com o aumento do aporte térmico. Devido a pouca quantidade de elementos de liga nos aços fabricados para serviço ácido, era esperado que ocorresse alguma redução de dureza nesta região, principalmente nos graus de mais alta resistência. Segundo Duan, Lazor e Taylor [17], o efeito do amolecimento pode ser crítico no caso de soldagem com arco submerso, onde o alto aporte térmico pode resultar em uma elevada deformação localizada na ZAC, o que é indesejável no caso de projetos feitos por deformação (*Strain Based Design*). Duan, Lazor e Taylor [17] comentam também que em uma ZAC estreita, não é esperada a ocorrência de elevados níveis de deformação localizada devido a constrição lateral das partes adjacentes do metal de base e do metal de solda. Como os materiais avaliados neste estudo foram projetados para emprego em projetos feitos por tensão (*stress based design*) e o aporte térmico é inferior ao provocado pelo processo de arco submerso, pode-se concluir que o amolecimento encontrado não representa um problema para o emprego destes materiais nos dutos.



Conforme comentado por Procaro e Melfi [12], para aplicação em serviço ácido, a composição química do metal de solda deve ser cuidadosamente selecionada de modo a providenciar um balanço entre tenacidade e dureza. Além disso, no caso dos graus X65, X70 e X80, a junta soldada também precisa atender os elevados níveis de resistência mecânica requeridos. Os valores de dureza e tenacidade obtidos neste estudo mostram que a soldagem de tubos de alta resistência para emprego em serviço ácido é viável.

#### 4 CONCLUSÃO

O tubo API 5L X65 apresentou elevados valores de tenacidade e dureza abaixo do limite definido por norma, tanto para o metal de solda quanto para a ZAC.

Para o tubo API 5L X70 foi observado que os melhores resultados de tenacidade e dureza para o metal de solda são obtidos com proteção gasosa de 100% CO<sub>2</sub> quando comparado com a mistura de 80% Ar e 20% CO<sub>2</sub>.

Os valores de dureza do metal de solda do tubo API 5L X70 soldado com 80% Ar e 20% CO<sub>2</sub> ficaram um pouco acima do limite definido por norma. Neste caso, testes adicionais de corrosão sob-tensão devem ser realizados para comprovar que a elevada dureza não prejudica a resistência ao serviço ácido.

Foi identificado um amolecimento na ZAC dos tubos X70 e X80. De acordo com a literatura, este amolecimento não é crítico para a aplicação em projetos baseados por tensão (*stress based design*). No caso de projetos baseados em deformação (*strain based design*), uma avaliação mais detalhada precisa ser feita.

Os baixos valores de CTOD e o elevado espalhamento encontrado nos resultados do ensaio de CTOD da ZAC do tubo API 5L X80 podem ter sido provocados pela formação de zonas frágeis localizadas. Recomenda-se a realização de estudos complementares para investigar estes resultados e definir parâmetros mais adequados para a soldagem deste material.

Este trabalho avaliou as características do metal de solda e ZAC dos tubos de alta resistência para emprego em serviço ácido. A solda circunferencial de tubos X65 e X70 atendem os requisitos de tenacidade e serviço ácido enquanto que o X80 ainda precisa ter a causa da baixa tenacidade na ZAC melhor investigada.

Os resultados obtidos servem como base para uma futura aplicação destes materiais em campo.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a PETROBRAS e a TENARIS pelo suporte técnico e financeiro e ao SENAI-CTS e a GDK pela soldagem das juntas de teste. Os autores também agradecem ao Sr. Richard Bravo e Sr. Harold Leon, TENARIS, Sr. Marcy Saturno de Menezes, PETROBRAS e Sra. Suelen Navarro, CONSULPRI, por suas contribuições, orientação técnica e apoio prestado durante esta pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- 1 API 5L. Specification for Line Pipe, API Specification 5L. American Petroleum Institute. Forty-Fifth Edition, December 2012.
- 2 ASME B31.8. Gas Transmission and Distribution Piping Systems. The American Society of Mechanical Engineers. 2010.

- 3 Chen Y, Wang, YY. Microstructure Modeling of HAZ Softening in Microalloyed High Strength Linepipe Steels. Proceedings of the Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Lisbon, Portugal. July, 2007.
- 4 Pepler, E. et al. Suitable HAZ Testing to Predict Linepipe Safety. Pipeline Technology Conference. Ostend. October 2009.
- 5 Terada, Y. et al. High Strength Linepipes with Excellent HAZ Toughness. Nippon Steel Technical Report N° 90, July 2004.
- 6 BABU, S. S. et al. A Generalized Microstructure Model for Microalloyed High Strength Pipeline Weldments. Pipeline Technology Conference, Oostende, Belgium, October 12-14, 2009.
- 7 BS 7448. Fracture Mechanics Toughness Tests. British Standard. 1991.
- 8 ISO 15156-2. Petroleum and Natural Gas Industries – Materials for Use in H<sub>2</sub>S-Containing Environments in Oil and Gas Production. Part 2: Cracking Resistant carbon and Low-Alloy Steels, and the Use of Cast Irons. Second Edition, 2009.
- 9 Hopkins, P, Denys, R. The European Pipeline Research Group's Guidelines on Acceptable Girth Weld Defects in Transmission Pipelines. Eight Symposium on line pipe Research. September, 1993.
- 10 The James F. Lincoln Arc Welding Foundation. The Procedure Handbook of Arc Welding. Fourteenth Edition. May, 2000.
- 11 Felber, S. Pipeline Engineering. Welding Research Council. 2009.
- 12 Procario JR, Melfi T. Weld Metal Alloy Systems for Seam Welding of Niobium Micro-Alloyed Pipe Steels. Welding of High Strength Pipeline Steels. International Seminar. November, 2011.
- 13 Barnes AM. The Effect of Thermomechanically Controlled Processing of Steels on Heat Affected Zone Properties. The Welding Institute. December, 1995.
- 14 Barnes AM. Local Brittle Zones in C-Mn Steel Multipass Welds. TWI Bulletin. September/October, 1990.
- 15 API RP 2Z. Recommended Practice for Preproduction Qualification for Steel Plates for Offshore Structures. API Recommended Practice 2Z. American Petroleum Institute. Fourth Edition. September, 2005.
- 16 Denys, R. M, Lefevre, T. Effects of Welding on HAZ Softening of X70/X80 TMCP Linepipe Steels. Pipeline Research Council International, 2000.
- 17 Duan, D. Lazor, R, Taylor, D. Evaluation of Double Jointing Girth Welds of High Grade Line Pipes. 8th International Pipeline Conference. Calgary, Alberta, Canada. October, 2010.