

# EFEITO DA SOLDAGEM CIRCUNFERENCIAL DE TUBOS API 5L X65MS, X70MS E X80MS NA ZAC E NO METAL DE SOLDA

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

## Resumo

Este trabalho analisa a tenacidade e dureza do metal de solda e ZAC da solda circunferencial de tubos API 5L 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 dos graus X65 e X70, são adequadas para o emprego em dutos terrestres. Observou-se um amolecimento na ZAC dos graus X70 e X80 que, de acordo com a literatura, não é crítico para projetos baseados em tensão. Para o grau 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 API 5L X65MS, X70MS AND X80MS PIPES

## Abstract

This paper analyses the HAZ and weld metal toughness and hardness of sour service API 5L 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 grade X65 and grade 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.

## I INTRODUÇÃO

Os aços utilizados em dutos são fabricados para garantir propriedades específicas definidas para cada projeto. No caso dos dutos terrestres que escoam o gás do pré-sal, os tubos precisam ser especificados com requisitos adicionais de serviço ácido, devido à presença de H<sub>2</sub>S no gás. Outra

característica importante destes dutos é a elevada pressão, que resulta na necessidade de utilizar aços de elevada resistência mecânica. Os projetos onde estes materiais poderiam ser empregados, são os Gasodutos Rota 2, que liga os campos do pré-sal ao terminal de Cabiúnas, e o Rota 3, que liga o pré-sal

<sup>1</sup>Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: g.zacca@petrobras.com.br

<sup>2</sup>ATNAS Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>3</sup>Centro de Pesquisas Tenaris, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.



ao Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ). No trecho terrestre destes dutos, o emprego de aços com resistência inferior ao grau X65, resulta 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 X65MS, X70MS e X80MS, nos quais a letra “M” significa que a chapa foi produzida por processamento termomecânico e a letra “S” significa que o tubo foi fabricado para serviço ácido, de acordo com os requisitos do Anexo H da norma API 5L [1]. O grande desafio para estes materiais é que quanto maior é o grau de resistência do tubo, mais complexo se torna o processo de fabricação para garantir resistência ao fenômeno da corrosão sob-tensão [2,3]. É necessário conseguir uma combinação de composição química e parâmetros de laminação que resulte simultaneamente em elevada resistência mecânica e resistência ao fenômeno da corrosão sob-tensão. De acordo com Kalwa e Hillenbrand [2], é de grande importância utilizar um aço de baixo C e baixo Mn. Um baixo teor de Mn evita a formação de inclusões de MnS e o baixo C contribui para uma microestrutura mais homogênea através diminuição da fração volumétrica de perlita [4]. O teor de S deve ser reduzido para valores abaixo de 0,001% e posteriormente o aço deve ser tratado com Ca para globulizar as inclusões remanescentes. Além disso, deve-se evitar a segregação central durante o processo de lingotamento, que também é minimizada mantendo o mais baixo possível os elementos C, Mn, S e P [2,5]. Para compensar os baixos teores de C e Mn, elementos de liga precisam ser adicionados e a técnica do resfriamento acelerado precisa ser utilizada juntamente com a laminação controlada. O objetivo final é conseguir uma microestrutura refinada ferrítica ou ferrítica/bainítica que seja resistente à corrosão sob-tensão e possua elevada resistência mecânica.

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 [6,7]. Tal fenômeno é função do efeito do aporte térmico nos mecanismos de endurecimento utilizados para estes aços. Como os aços para serviço ácido são produzidos por resfriamento acelerado e possuem menores teores de elementos de liga, pode ser que também sejam susceptíveis ao amolecimento da ZAC. Duan et al. [8] comentam que o efeito do amolecimento resulta em uma elevada concentração de deformação plástica na ZAC, o que é indesejável no caso de projetos baseados em deformação (*strain based design*), nos quais o material é projetado para se deformar plasticamente, diferentemente dos projetos baseados em tensão (*stress based design*) nos quais o material trabalha no regime elástico. Por outro lado, dependendo do aporte térmico, pode ocorrer um aumento de dureza na ZAC para

valores acima dos limites definidos para serviço com H<sub>2</sub>S. Outro fator que precisa ser verificado na ZAC é a possibilidade de ocorrer fragilização devido ao crescimento de grão e formação de fases frágeis. Peppler et al. [9] 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. [10] 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 Yu et al. [11], pode deteriorar ou melhorar as propriedades, dependendo da sua morfologia ou concentração de carbono. No metal de solda é preciso avaliar se os elevados valores de resistência mecânica requeridos não prejudicam a tenacidade e não aumentam a dureza acima dos limites estabelecidos para emprego em serviço ácido. Apesar de estudos sobre a soldagem de aços de alta resistência serem facilmente encontrados na literatura, o mesmo não se pode dizer sobre os aços de alta resistência para serviço ácido, principalmente em tubos de elevada espessura. 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 na construção de dutos terrestres projetados por tensão (*stress based design*).

## 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" × 1,452" (610 mm × 36,88 mm) para o grau X65; 20" × 1" (508 mm × 25,4 mm) para o grau X70 e 24" × 1,25" (610 mm × 31,8 mm) para o grau X80.

### 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 a norma ASME B31.8 [12].

A soldagem dos anéis foi executada utilizando os processos GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) 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.

A Tabela 3 mostra a composição química dos consumíveis utilizados no enchimento. Os valores foram obtidos através dos certificados emitidos pelos fabricantes e são relativos à análise química da mesma corrida do consumível utilizado nos testes. Para cada consumível, a análise química foi realizada de acordo com os requisitos da norma AWS correspondente. Pode ser observado que quanto maior o grau de resistência, maior é a quantidade de elementos de liga utilizada.

A soldagem foi conduzida seguindo as mesmas técnicas de soldagem de dutos que são empregadas no campo. O gás de proteção utilizado na raiz foi 100% Ar para os três graus de tubo testados. Para a soldagem com arame tubular, foi utilizado 100% CO<sub>2</sub> na soldagem do tubo API 5L X65 e mistura de 80%Ar e 20%CO<sub>2</sub> para os tubos API 5L X70 e X80. Foi utilizada uma temperatura de preaquecimento de 100°C e interpasso de 175°C.

Os parâmetros adotados na soldagem das juntas API 5L X65, X70 e X80 estão descritos na Tabela 4.

**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

**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	Raiz e passe de reforço AWS A5.18 ER 70S-6	525	595	70J/-30°C	400	480	27J/-30°C
	Enchimento e acabamento AWS A5.20 E71T-1CJ	565	605	130J/-40°C	390	490-670	27J/-40°C
X70	Raiz e passe de reforço AWS A5.18 ER 70S-3	500	600	200J/-20°C	400	480	27J/-20°C
	Enchimento e acabamento AWS A5.29 E81T1-NiC	642	693	89J/-30°C	470	550-690	27J/-30°C
X80	Raiz e passe de reforço AWS A5.18 ER 70S-3	420	515	90J/-30°C	400	480	27J/-20°C
	Enchimento e acabamento AWS A5.29 E101T1-G	654	709	70J/-40°C	610	690-830	--

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

**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-NiC	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

**Tabela 4.** Parâmetros de soldagem

Material	X65	X70	X80
Corrente (A)	Raiz: 100-130	Raiz: 150-155	Raiz: 150
	Passe quente: 160-176	Passe quente: 200-215	Passe quente: 198
	Enchimento: 135-190	Enchimento: 185-215	Enchimento: 198-220
Voltagem (V)	Raiz: 9-12	Raiz: 10,5-11	Raiz: 12
	Passe quente: 10-14	Passe quente: 10,5-11	Passe quente: 13
	Enchimento: 22-27	Enchimento: 21,1-22,7	Enchimento: 21,9-22,5
Aporte Térmico (kJ/mm)	Raiz: 0,85-0,91	Raiz: 2,8-2,9	Raiz: 4,46
	Passe quente: 1,15-1,61	Passe quente: 1,7-1,8	Passe quente: 2,49
	Enchimento: 1,11-2,63	Enchimento: 0,7-2,3	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 para emprego em projetos baseados em tensão (*stress based design*). Com o ensaio de dureza busca-se verificar se os valores máximos atingidos atendem os requisitos definidos para emprego em serviço ácido e também avaliar se ocorre o amolecimento da ZAC. O ensaio de CTOD tem o objetivo verificar se algum fenômeno de fragilização pode ser observado na ZAC e no metal de solda.

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 [13]. No metal de solda, o entalhe foi feito seguindo a orientação NP de acordo com a notação da BS 7448 [13] e na ZAC, seguindo a orientação NQ de acordo com a notação da BS 7448 [13], 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 grau X65 e X80 e -10°C para o grau X70. Na prática, a temperatura do ensaio depende da temperatura do ambiente onde o tubo será futuramente empregado. Durante a realização dos ensaios dos tubos API 5L X65 e X80 havia sido definida a temperatura de 0°C, posteriormente, optou-se por adotar uma condição mais conservativa para o tubo API 5L X70 e a temperatura foi redefinida para -10°C.

Para o ensaio de dureza, foram extraídos corpos de prova da geratriz inferior da junta soldada. Foi utilizado o método Vickers com carga de 10 kgf e o perfil de dureza especificado pela norma ISO 15156-2 [14], que define os requisitos para serviço com H<sub>2</sub>S. A Figura 1 mostra o perfil de dureza utilizado.

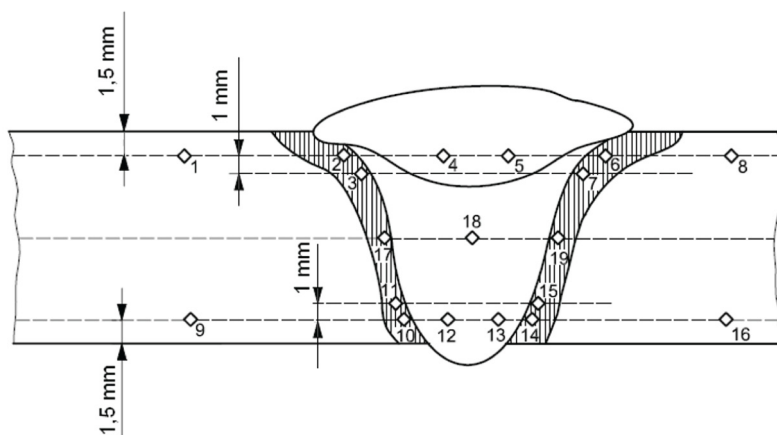


Figura 1. Locais de medição de dureza [14].

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de CTOD foram utilizados para verificar o comportamento da tenacidade do metal de solda. A Figura 2 mostra uma comparação entre os valores de CTOD do metal de solda dos materiais API 5L X65, X70 e X80. A nomenclatura “CP” no eixo horizontal refere-se a corpo de prova. A linha tracejada horizontal no gráfico representa um valor mínimo desejado de 0,15 mm recomendado por Hopkins e Denys [15] 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 [15].

Comparando os resultados de tenacidade obtidos no metal de solda dos três materiais analisados, pode-se verificar que a tenacidade foi pior para os graus mais elevados. Geralmente, a adição de elementos de liga na composição química do eletrodo para atender os elevados níveis de resistência mecânica, aumenta a dificuldade de se obter elevada tenacidade no metal de solda. Felber [16] 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-1C, que apresenta ainda, um menor teor de Mn.

De acordo com Procario e Melfi [17], 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. Isto pode ter ocorrido para os graus mais elevados X70 e X80, que possuem maior teor de Mo.

Para o metal de solda do API 5L X70, alguns valores ficaram abaixo do valor mínimo desejado de 0,15 mm. Uma alternativa para melhorar a tenacidade do API 5L 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, conseqüentemente, reduzir a tenacidade [18]. 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 inclusões que podem aumentar a fração volumétrica de ferrita acicular e contribuir para uma melhora na 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 3 mostra que os resultados de CTOD foram superiores.

Os valores de CTOD da ZAC, para as soldas realizadas no API 5L X65, X70 e X80, podem ser vistos na Figura 4.

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 [19] 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 intercítico na soldagem multipasse. Essas zonas frágeis podem ocorrer devido à formação de microconstituintes AM (Austenita-Martensita).

Segundo Barnes [20] 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.

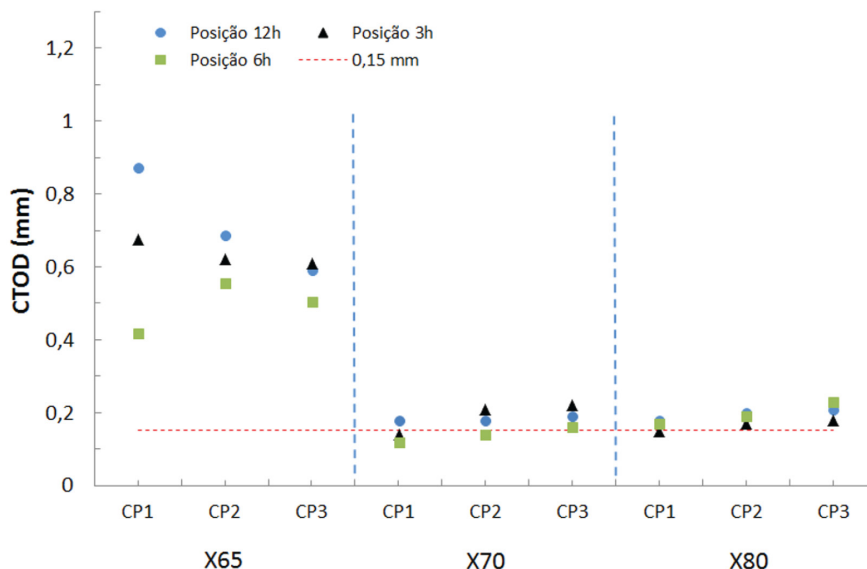


Figura 2. Valores de CTOD do metal de solda para o API 5L X65, X70 e X80.

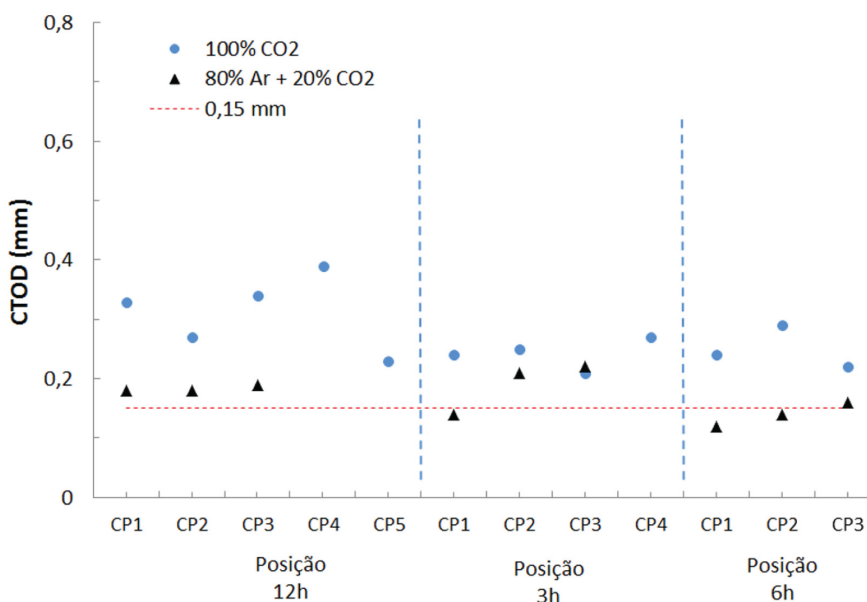


Figura 3. Valores de CTOD para o metal de solda do API 5L X70.

Uma maneira de avaliar melhor a causa da baixa tenacidade obtida na ZAC do API 5L X80 seria a realização de um estudo, baseado na norma API RP 2Z [21], no qual 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 API 5L X65, X70 e X80 são mostrados na Figura 5.

De acordo com a ISO 15156-2 [14], o valor máximo de dureza aceitável para aplicação em ambientes com H<sub>2</sub>S 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<sub>2</sub>S. Na Figura 5 pode ser observado que para o API 5L X70 soldado com 80% Ar e 20% CO<sub>2</sub> os valores de dureza nos pontos 4 e 5, correspondentes aos passes de acabamento, apresentaram

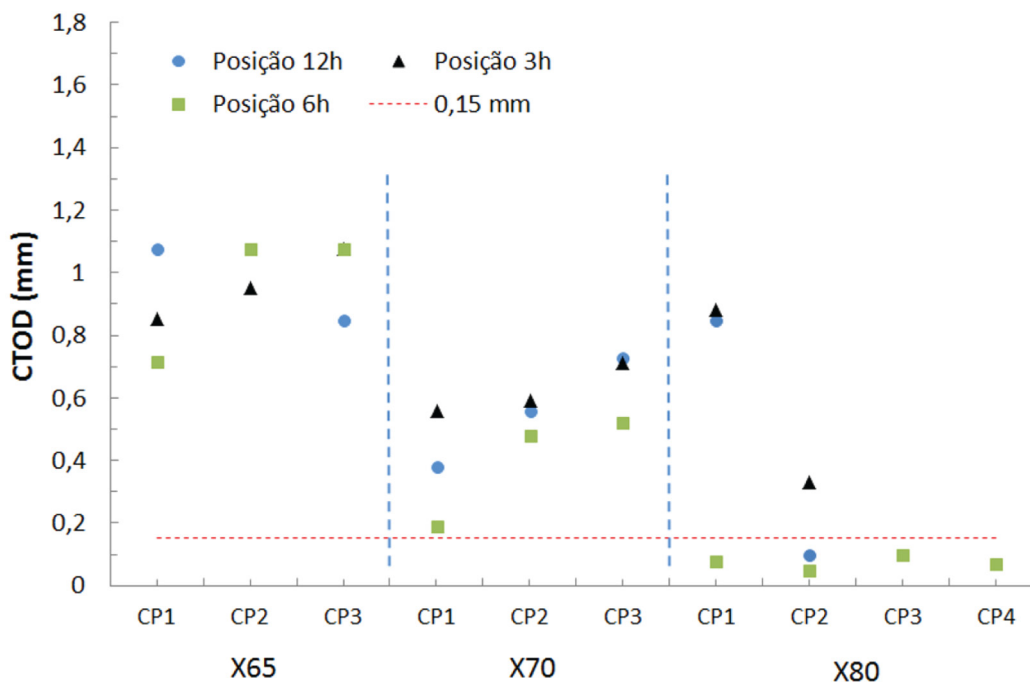


Figura 4. Valores de CTOD da ZAC para o API 5L X65, X70 e X80.

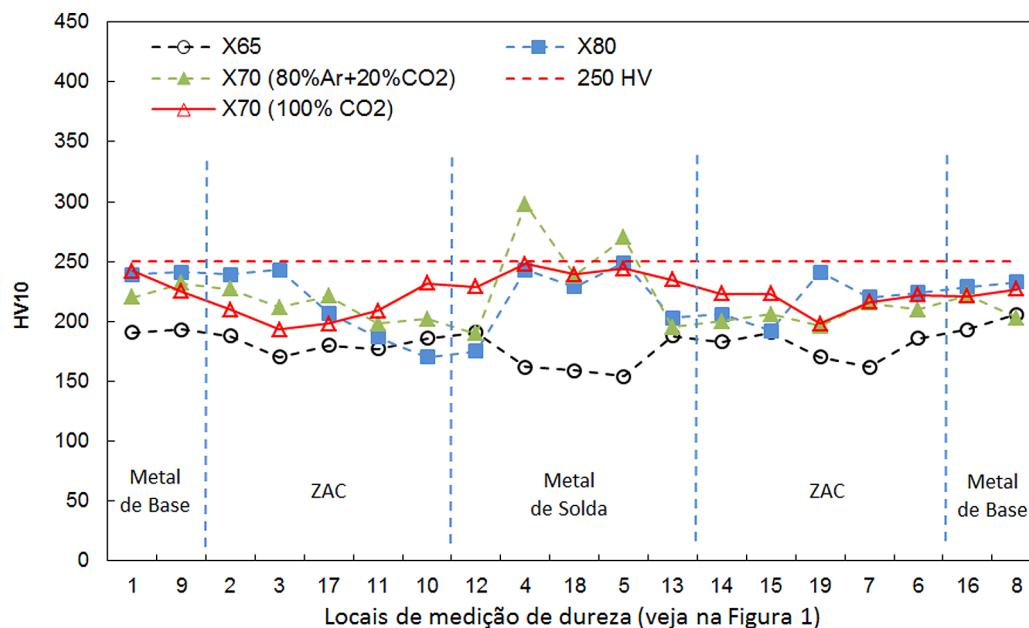


Figura 5. Perfil de dureza.

298 HV e 270HV, respectivamente. Neste caso, como ultrapassou o limite de 275HV, a ISO 15156-2 [14] 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<sub>2</sub> reduz a quantidade de Mn e Si no metal de solda resultando em menores valores de dureza.

A Figura 5 também mostra um pequeno amolecimento da ZAC, sendo mais pronunciado nos graus X70 e X80. De acordo com Denys e Lefevre [6], 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 et al. [8], o efeito do amolecimento pode ser crítico no caso de soldagem com arco submerso, no qual 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 et al. [8] 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 baseados em 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.

Conforme comentado por Procaro e Melfi [17], 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.

## REFERÊNCIAS

- 1 American Petroleum Institute – API. API 5L: specification for line pipe. 45th ed. Washington: API; 2012.
- 2 Kalwa C, Hillenbrand HG. Europipe's experience and developments on pipe material for sour service applications. In: Proceedings of the Microalloyed Steels for Sour Service International Seminar; 2012; São Paulo, Brasil. Araxá: CBMM; 2012.
- 3 Ishikawa N, Endo S, Muraoka R, Kakihara S, Kondo J. Material design of high strength/heavy gauge linepipes for sour service. In: Proceedings of the Microalloyed Steels for Sour Service International Seminar; 2012; São Paulo, Brasil. Araxá: CBMM; 2012.

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>. Isto também é interessante do ponto de vista econômico, uma vez que o CO<sub>2</sub> tem um menor custo do que a mistura Ar e 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 API 5L 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 API 5L X65 e X70 atendem os requisitos de tenacidade e serviço ácido enquanto que o API 5L 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.

- 4 Stallybrass C, Haase T, Konrad J, Bosch C, Kulgemeyer A. Alloy design for UOE linepipe material for standard and non-standard HIC conditions. In: Proceedings of the Microalloyed Steels for Sour Service International Seminar; 2012; São Paulo, Brasil. Araxá: CBMM; 2012.
- 5 Nieto J, Elías T, López G, Campos G, López F, De AK. rocess and quality controls for production of linepipe slabs for sour service applications at ArcelorMittal Lazaro Cardenas. In: Proceedings of the Microalloyed Steels for Sour Service International Seminar; 2012; São Paulo, Brasil. Araxá: CBMM; 2012.
- 6 Denys RM, Lefevre T. Effects of welding on HAZ softening of X70/X80 TMCP linepipe steels. Virgínia: Pipeline Research Council International; 2000.
- 7 Chen Y, Wang YY. Microstructure modeling of HAZ softening in microalloyed high strength linepipe steels. In: Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference; 2007; Lisbon, Portugal. Golden: International Society of Offshore and Polar Engineers; 2007.
- 8 Duan D, Lazor R, Taylor D. evaluation of double jointing girth welds of high grade line pipes. In: Proceedings of the 8th International Pipeline Conference; 2010; Calgary, Alberta, Canada. USA: ASME; 2010.
- 9 Peppler E, Hillenbrand H G, Kalwa C, Liessem A. Suitable HAZ testing to predict linepipe safety. In: Proceedings of the Pipeline Technology Conference; 2009; Ostend, Belgium. 2009.
- 10 Terada Y, Kiyose A, Doi V, Morimoto H, Kojima A, Nakashima T, et al. High strength linepipes with excellent HAZ toughness. Japan: NSSMC; 2004. Nippon Steel Technical Report no. 90.
- 11 Yu X, Babu SS, Brust FW. A generalized microstructure model for microalloyed high strength pipeline weldments. In: Proceedings of the Pipeline Technology Conference; 2009; Ostend, Belgium. Germany: EITEP; 2009.
- 12 The American Society of Mechanical Engineers – ASME. ASME B31.8: gas transmission and distribution piping systems. USA: ASME; 2010.
- 13 British Standards Institution – BSI. BS 7448: fracture mechanics toughness tests. London: BSI; 1991.
- 14 International Organization for Standardization – ISO. 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. 2nd ed. Geneva: ISO; 2009.
- 15 Hopkins P, Denys R. The european pipeline research group's guidelines on acceptable girth weld defects in transmission pipelines. In: Proceedings of the 8th Symposium on Line Pipe Research; 1993; Houston, Texas. Washington: American Gas Association; 1993.
- 16 Felber S. Pipeline engineering. Ohio: Welding Research Council; 2009.
- 17 Procario JR, Melfi T. Weld metal alloy systems for seam welding of niobium micro-alloyed pipe steels. In: Proceedings of the International Seminar on Welding High Strength Pipeline Steels; 2011; Araxá.
- 18 The James F. Lincoln Arc Welding Foundation – JFLF. The procedure handbook of arc welding. 14th ed. Ohio: JFLF; 2000.
- 19 Barnes AM. The effect of thermomechanically controlled processing of steels on heat affected zone properties. Ohio: Welding Institute; 1995.
- 20 Barnes AM. Local brittle zones in C-Mn steel multipass weld. Welding Research Council; 1990. Ohio: Welding Institute Bulletin.
- 21 American Petroleum Institute – API. API RP 2Z: recommended practice for preproduction qualification for steel plates for offshore structures: API recommended practice 2Z. 4th ed. Washington: API; 2005.

Recebido em: 19 Out. 2015

Aceito em: 5 Abr. 2016