

# AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE JUNTAS SOLDADAS CIRCUNFERENCIAIS DE AÇO API X-80 À CORROSÃO SOB TENSÃO E SUSCEPTIBILIDADE À FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGENIO<sup>1</sup>

Adriana Forero Ballesteros<sup>2</sup>  
Ivani de S. Bott<sup>3</sup>  
José Antonio Cunha Ponciano<sup>4</sup>

## Resumo

Neste trabalho objetivou-se estudar a resistência à corrosão sob tensão (CST) e susceptibilidade à fragilização por hidrogênio em presença de sulfetos, em soldas circunferenciais de tubo API 5L X-80. Foram realizados ensaios segundo norma NACE TM0177/96, Método A com solução B, variando-se as condições de carregamento e o pH, e ensaios de tração sob Baixa Taxa de Deformação (BTD) segundo a Norma ASTM G129-2006, empregando uma solução de Tiosulfato de Sódio, variando-se o pH e a concentração de Tiosulfato de Sódio. Constatou-se que o metal de base foi aprovado segundo os requisitos da NACE TM0177/96. Os metais de solda originados pelos diferentes processos de soldagem estudados apresentaram susceptibilidade à corrosão sob tensão em presença de sulfeto, segundo o mesmo critério, fraturando em um período inferior a 720h. Esta susceptibilidade à CST por sulfetos e fragilização pelo hidrogênio, foi comprovada pelos resultados dos ensaios de tração BTD, onde foi observada uma queda significativa no limite de resistência, alongamento e tempo de ruptura, comparativamente aos ensaios realizados ao ar na mesma taxa de deformação.

**Palavras-chave:** Solda circunferencial; Corrosão; Hidrogênio; Aços API.

## EVALUATION OF THE RESISTANCE OF API 5L -X80 GIRTH WELDS TO STRESS CORROSION CRACKING AND THE SUSCEPTIBILITY TO HYDROGEN EMBRITTLEMENT

### Abstract

This work studies the tensile strength of API 5L-X80 Girth Welds to Stress Corrosion Cracking (SCC) and their susceptibility to hydrogen embrittlement (HE) in the presence of sulphides. NACE tests were carried out according to the NACE TM0177-96 Standard, Method A with solution B, varying the conditions of loading and pH, and Slow Strain Rate Tensile Tests (SSRT) were performed according to ASTM G 129-00, employing a sodium thiosulfate solution, varying the pH and sodium thiosulfate concentration. In accordance with the requirements of NACE TM0177/96 the base metal was considered approved. All weld metals, obtained by the different welding processes studied, showed susceptibility SCC in the presence of sulphides, fracture occurred in a period of less than 720h. This susceptibility to SCC in the presence of sulphides and to HE was confirmed by the results of the SSRT tests, where there was a significant drop in the tensile strength, as well as the strain and time to rupture, as compared to tests in air at the same strain rate.

**Key words:** Girth weld; Corrosion; Hydrogen; API steels.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Doutoranda Eng. Materiais – PUC – RIO.*

<sup>3</sup> *PhD, Professora Associada do DCMM – PUC - RIO*

<sup>4</sup> *DSc, MSc, Professor Associado – COPPE/UFRJ*

# 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda no transporte de gás, petróleo e seus derivados, vem tornando cada vez mais exigentes as especificações de tubos para gasodutos, oleodutos e polidutos, tanto *on shore* quanto *off shore*. O conhecimento do comportamento mecânico e microestrutural dos aços para fabricação destes tubos, permite a garantia da integridade dos dutos, a qual é de fundamental importância para toda a indústria de petróleo e gás desde a fase de projeto, montagem e durante sua operação e aplicação em diferentes ambientes.

Propriedades mecânicas como: resistência, soldabilidade, tenacidade à fratura e ductilidade, além de propriedades como: resistência à corrosão e à fragilização pelo H<sub>2</sub>S contido no petróleo; vêm sendo obtidas com o contínuo desenvolvimento dos aços microligados da classe API. Essas propriedades, dependem do controle da composição química e dos parâmetros de processamento do aço. Entretanto, a junta soldada, dependendo do procedimento não mantém a mesma alta resistência do metal de base.

O grande desafio é portanto manter a alta resistência sem o prejuízo da tenacidade, principalmente com relação às juntas soldadas, uma vez que o procedimento de soldagem envolvido na produção dos tubos pode modificar a microestrutura do metal de base na região da zona termicamente afetada (ZTA), e conseqüentemente as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, tornando esta região da junta soldada mais susceptível à corrosão sob tensão.<sup>(1)</sup>

Este trabalho tem como objetivo estudar a resistência à corrosão sob tensão em presença de sulfetos e susceptibilidade à fragilização pelo hidrogênio, em soldas circunferenciais de tubo API 5L X80, avaliar a influência do pH e do teor de H<sub>2</sub>S na corrosividade dos meios aquosos utilizados nesta pesquisa e caracterizar fractograficamente as superfícies da fratura resultantes dos ensaios de laboratório.

A susceptibilidade à corrosão sob tensão em aços para dutos é dependente de uma série de eventos que vão desde a manufatura do aço, fabricação do tubo, montagem dos dutos e tipo de substância transportada pelo duto. Ensaios de acordo com a norma NACE TM0177/96,<sup>(2)</sup> Método A são utilizados para avaliar a resistência à CST conforme o critério de fratura/não fratura. Ensaios de tração BTD de acordo com a norma ASTM G129/2006,<sup>(3)</sup> vêm sendo amplamente utilizados como uma técnica de laboratório para avaliar a susceptibilidade de materiais metálicos à CST e fragilização pelo hidrogênio.

## 1.1 Mudanças Microestruturais Induzidas pelo Processo de Soldagem

Na relação entre microestrutura e susceptibilidade à corrosão sob tensão é importante avaliar a influência dos parâmetros de soldagem sobre o metal de base, uma vez que estes parâmetros definem as propriedades mecânicas, como por exemplo a dureza na zona termicamente afetada (ZTA).<sup>(4)</sup>

Os avanços nos processos de fabricação permitiram a produção de aços de alta resistência com baixo carbono equivalente e grãos finos. No entanto, o ciclo térmico produzido durante a soldagem associado à velocidade de resfriamento podem provocar a formação de zonas frágeis localizadas (ZFL) na ZTA em função de transformações microestruturais nestas regiões, mais especificamente na região intercrítica de grãos grosseiros.<sup>(5)</sup>

No caso do metal de solda, a microestrutura geralmente consiste de ferrita acicular com ferrita de contorno de grão em várias proporções e ferrita alinhada com constituintes martensita-austenita-carbonetos (M-A-C). Porém, a presença de elementos de liga, aumentam a temperabilidade modificando estas microestruturas por meio da precipitação de carbonitretos acarretando aumento da resistência e redução da tenacidade do metal de solda.<sup>(6)</sup>

A susceptibilidade à corrosão sob tensão depende da composição da liga e conseqüentemente da microestrutura. Nos aços grau X52, X65 e X70, a microestrutura ferrítica-perlítica é predominante. No entanto, devido a diferenças na composição química e processamento, estes podem apresentar diferenças em termos microestruturais, por exemplo, a adição de Vanádio impede a formação de perlita, mas não de ferrita e seu comportamento se reflete na microestrutura do metal de solda. Por outro lado, o Nióbio, que impede a formação de ferrita em chapas laminadas, também tende a reduzir a formação de ferrita de contorno de grão no metal de solda e, desse modo, aumenta a tenacidade, mas não inibe o crescimento das placas laterais de ferrita.<sup>(6)</sup> Tanto Nb quanto V podem formar precipitados, especialmente durante o reaquecimento do metal de solda durante os passes subseqüentes. Estes precipitados tendem a reduzir a tenacidade.

## 1.2 A Dureza da Junta Soldada

De um modo geral, na literatura, a dureza da ZTA é destacada devido ao fato que esta é considerada como um indicador de problemas potenciais como o trincamento a frio e corrosão sob tensão. A norma ASTM A370<sup>(7)</sup> menciona que os valores de dureza pode ser relacionados aqueles de resistência à tração. A dureza da ZTA é função da taxa de resfriamento e composição química, principalmente do teor de C.

Lancaster<sup>(8)</sup> menciona, para um aço ARBL, os valores de dureza na ZTA para não ser susceptível, trincamento por corrosão sobre tensão. Para uma distância entre 1 a 2 mm abaixo da borda superior da junta soldada, deve estar entre 300 e 350 HV, sendo aceitável um máximo 366 HV (350 BHN), e deve ter 250 HV máximo a uma distância entre 1 mm a 2 mm acima da borda inferior.

A dureza máxima, pode ser encontrada na proximidade da linha de fusão, já que esta zona atinge a temperatura máxima e maior tempo de permanência a alta temperatura e a taxa de resfriamento nesta região é máxima.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Metal Base

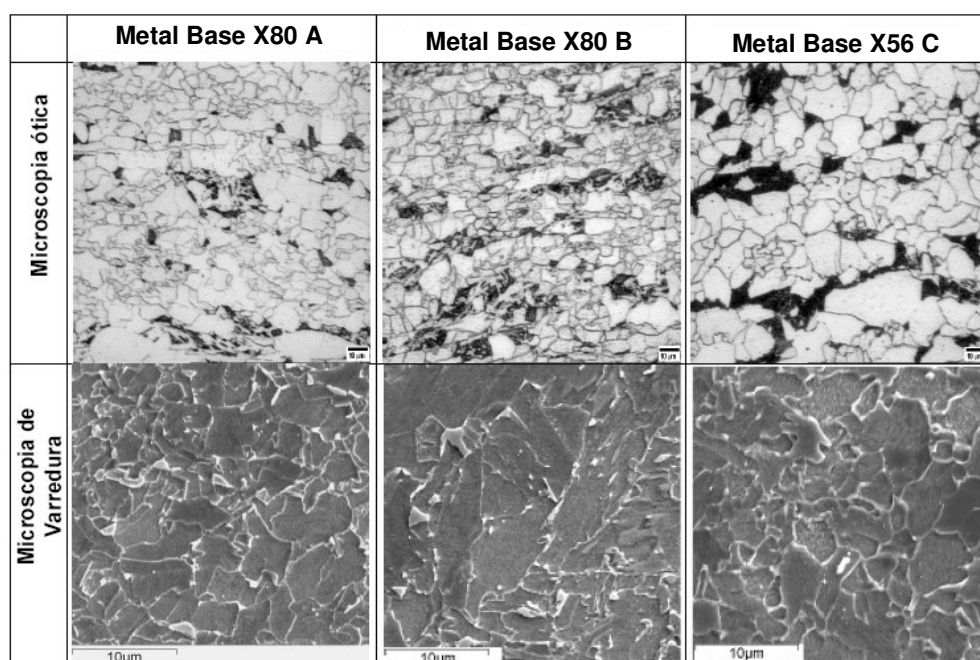
Foram avaliadas a resistência à corrosão sob tensão e susceptibilidade à corrosão em ambientes caracterizados pela presença de H<sub>2</sub>S, soldas circunferenciais de tubo API 5L X80, conformado pelo processo UOE a partir de chapas de aço produzidas por laminação controlada sem resfriamento acelerado (TMCP—Thermomechanical Controlled Process). As juntas soldadas estudadas foram obtidas a partir de seções de tubo (anel) de aços API 5L X80 e X56. A Tabela 1 apresenta a composição química dos tubos e os valores especificados na Norma API 5L.<sup>(9)</sup>

**Tabela 1** – Composição Química do Metal de Base X80 e X56 em %Wt

Tubo	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Pcm	φ ext.*	Esp*	
X80	A	0,08	0,13	1,73	0,014	0,006	0,16	0,02	0,19	0,01	0,017	0,048	0,197	508	19
	B	0,07	0,15	1,84	0,017	0,007	0,17	0,03	0,2	0,013	0,02	0,061	0,197	508	19
	API 5L	0,22	--	1,85	0,025	0,015	--	--	--	--	c, d	c, d	<0,25	--	--
X56	C	0,09	0,20	1,49	0,02	0,007	0,03	0,02	0,01	0,008	0,002	0,045	0,183	508	16
	API 5L	0,22	--	1,40 <sup>a</sup>	0,025	0,015	--	--	--	--	c, d	c, d	<0,25	--	--

\* Medidas em milímetros; <sup>a</sup> = Pela redução de 0,01% abaixo do conteúdo de carbono máximo especificado, um aumento de 0,05% acima do conteúdo de manganês máximo especificado é permitido, até um valor máximo de 1,65% para o X-56 e de 2,0% para o X-80. c= Nb, V, Ti ou suas misturas podem ser usadas a critério do fabricante. d= Nb+V+Ti deve ser menor a 0,15%

O aço X-80 apresenta matriz ferrítica com microconstituente austenita-martensita, com tamanho de grão ferrítico de 10 μm, e o aço X56 apresenta microestrutura ferrítica - perlítica, com o tamanho de grão ferrítico apresentando um valor médio de 15 μm (Figura 1).



**Figura 1.** Aço API X80 matriz ferrítica com microconstituente AM – Aço API X56 matriz ferrítica com perlita.

O objetivo da utilização do metal de base de aço API 5L X56 neste estudo, foi o de avaliar o comportamento de uma junta soldada dissimilar, para simular uma soldagem de um tubo X80 com um acessório do duto (p.e. válvulas, flanges etc.), ou a junção de segmentos de dutos novos com segmentos de dutos já existentes. A Tabela 2 apresenta os dados obtidos dos ensaios de tração para os metais base em acordo com a API 5L<sup>(9)</sup> e ASTM A370,<sup>(7)</sup> assim como requisitos da API 5L.

**Tabela 2.** Propriedades Mecânicas do Metal de Base

Tubo	LE <sub>T</sub> (MPa)	LE <sub>L</sub> (MPa)	LR <sub>T</sub> (MPa)	LR <sub>L</sub> (MPa)	(LE/LR) <sub>T</sub>	(LE/LR) <sub>L</sub>	(Ai/Ei) <sub>T</sub> (%)	(Ai/Ei) <sub>L</sub> (%)
X80 A	644	541	700	683	0,92	0,79	23	26,5
X80 B	602	542	682	663	0,88	0,81	30,9	27,1
X56 C	456	440	557	547	0,82	0,80	30,4	34
X80 - API 5L	552 - 690		621 - 827		0,93 Max.		21% Elong. Min.	
X56 - API 5L	386 - 544		490 - 758		-----		25% Elog. Min.	

## 2.2 Juntas Soldadas Circunferenciais

Foram utilizados três processos de soldagem, Eletrodo revestido (ER), Arame Tubular (FCAW-G), Eletrodo consumível sob proteção gasosa (GMAW (STT)), para os quais foram desenvolvidos quatro EPS diferentes (Tabela 3). As EPS X80-1 e EPS X80-2 foram realizadas com o processo de eletrodo revestido (ER), utilizando eletrodo celulósico E6010 para o passe de raiz e eletrodos de baixo hidrogênio E8018-G e E10018-G para o passe quente e passes de enchimento, respectivamente. Para a EPS X80-3, foi utilizado Eletrodo Revestido para o passe de raiz e passe a quente, utilizando os arames AWS E6010 e AWS E8010-P1 respectivamente, e para os demais passes foi utilizado Arame Tubular com proteção gasosa, AWS E101T1-GM-H8. Na EPS X80-4 foram utilizados processos semi-automáticos, sendo o processo MAG de Curto-Circuito com corrente controlada (MAG-STT) para o passe de raiz e o processo de arame tubular com proteção gasosa (FCAW-G) para os demais passes. Na Tabela 3, são resumidos os processos de soldagem e consumíveis utilizados para cada EPS. As juntas obtidas pelas EPS X80-1, 2, 3 e 4 serão doravante denominadas juntas X80-1, X80-2, X80-3 e X80-4, para maior simplicidade.

**Tabela 3.** Resumo dos processos de soldagem utilizados por EPS

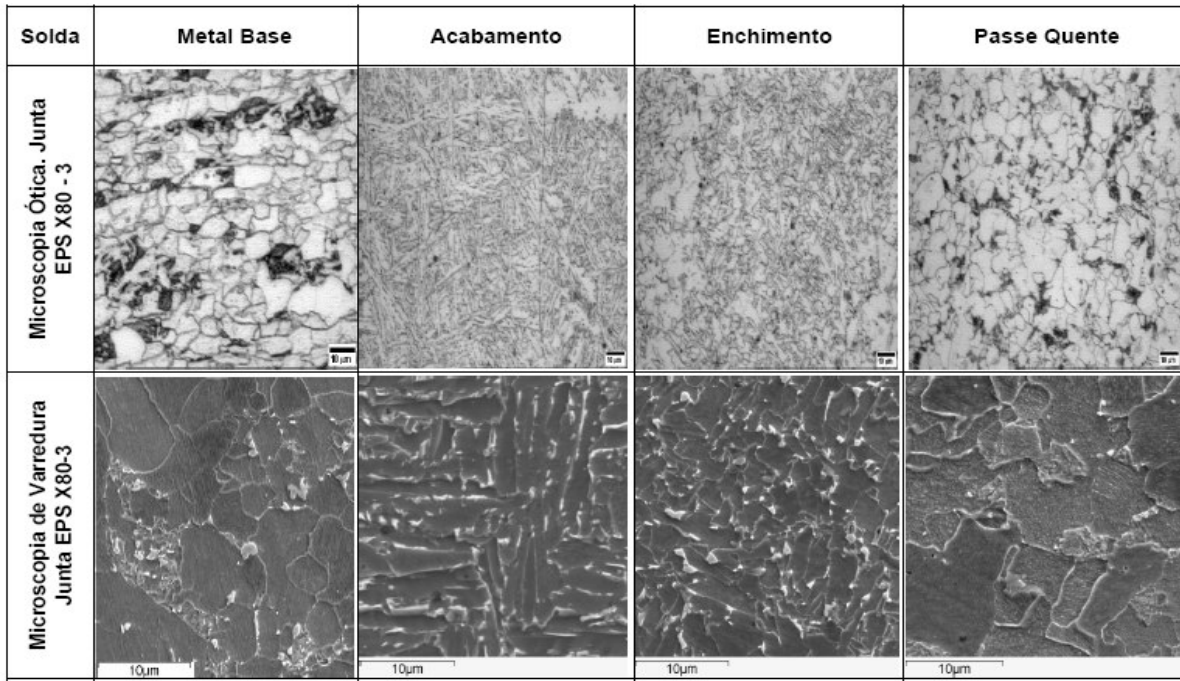
Juntas	Processos	Consumíveis			Material
		Raiz	Quente	Enchimento /Acabamento	
X80-1	ER	E 6010	E 8018-G	E 10018-G	X80– X80
X80-2	ER	E 6010	E 8018-G	E 10018-G	X80– X56
X80-3	ER FCAW-G	E 6010	E8010-P1	E 101T1-GM-H8	X80– X80
X80-4	GMAW (STT) + FCAW-G	ER 80S-G	E101 T1-GM-H8	E 101T1-GM-H8	X80– X80

Foi realizada análise química do metal de solda considerando as regiões referentes aos passes de raiz, enchimento e acabamento. Os valores médios obtidos a partir de quatro amostras para cada junta, estão mostrados na Tabela 4.

A caracterização microestrutural das juntas soldadas apresenta resultados similares, sendo representativa a estrutura ferrítica, com a presença de microconstituente AM. A morfologia do constituinte AM variou, apresentando-se massiva e parcialmente decomposta no passe de enchimento, e alongada no passe de acabamento. A Figura 2 mostra a micrografia referente à junta X80-3.

**Tabela 4.** Composição Química do metal de solda MS (% em peso)

Junta	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	V	Nb
X80-1	0,091	0,340	1,46	0,014	0,012	0,062	1,02	0,048	0,012	0,01	0,063
X80-2	0,091	0,420	1,58	0,015	0,012	0,045	1,03	0,022	0,013	0,011	<0,003
X80-3	0,087	0,276	1,46	0,011	0,010	0,061	0,44	0,223	0,020	0,014	0,011
X80-4	0,078	0,370	1,65	0,012	0,012	0,052	0,47	0,306	0,072	0,014	0,009



**Figura 2.** Caracterização microestrutural da Junta X80-3.

As juntas soldadas foram ensaiadas em tração conforme API 1104.<sup>(4)</sup> A resistência à tração foi calculada dividindo a carga máxima pela menor seção transversal do corpo-de-prova, medido antes do ensaio. Na Tabela 5, são apresentados os valores médios dos resultados obtidos dos ensaios de tração.

**Tabela 5.** Valores médios dos ensaios de tração das juntas soldadas.

Junta	LE <sub>T</sub> (MPa)	LR <sub>T</sub> (MPa)	(LE/LR) <sub>T</sub>	(Ai/Ei) <sub>T</sub> (%)	Local Ruptura
X80 - 1	612	673	0,90	ND	Fora da Solda
X80 - 2	468	545	0,86	ND	Fora da Solda
X80 - 3	611	670	0,91	ND	Fora da Solda
X80 - 4	633	683	0,92	ND	Fora da Solda
X80 - 1	601	655	0,92	22,3	Fora da Solda
X80 - 2	486	564	0,86	23,6	Fora da Solda
X80 - API 5L	552 - 690	621 - 827	0,93 Max.	21% Elong. Min.	Fora da Solda
X56 - API 5L	386-544	490-758	----	25% Elong. Min.	Fora da Solda

<sup>\*</sup> Ainda que as normas não especifiquem um LE para juntas soldadas, neste caso os LE das juntas foram calculadas considerando os mesmos critérios para os cálculos dos LE dos metais base.

### 2.3 Ensaios BTB

Para caracterizar a susceptibilidade à CST para cada condição de soldagem, utilizou-se o método de ensaio de tração sob baixa taxa de deformação (BTB) em acordo com a norma ASTM G 129-00.<sup>(3)</sup> Ensaios ao ar e em solução (Tabela 6) foram executados sob carregamento axial a uma taxa de deformação de  $2,8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , a temperatura ambiente em corpos de prova cilíndricos de 60mm de comprimento e 3,8 mm de diâmetro. Foram preparados diferentes meios corrosivos (Tabela 6), com base em uma solução de Tiosulfato de Sódio, gerando indiretamente H<sub>2</sub>S pela reação do meio ao entrar em contato com o metal.

**Tabela 6.** Composição química dos meios com Tiosulfato de Sódio.

Componentes	Tiosulfato de Sódio (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Cloreto de Sódio (NaCl)	Ácido Acético (CH <sub>3</sub> COOH)	pH
Solução 1	10 <sup>-3</sup> mol/l	5%	0,50%	3,4
Solução 2	10 <sup>-3</sup> mol/l	5%	0,50%	4,4
Solução 3	10 <sup>-4</sup> mol/l	5%	0,50%	3,4
Solução 4	10 <sup>-4</sup> mol/l	5%	0,50%	4,4

## 2.4 Ensaios NACE

Os ensaios NACE foram realizados em acordo com os procedimentos indicados na norma NACE TM0177/96<sup>(2)</sup> - Método A, objetivando verificar a susceptibilidade das juntas estudadas à corrosão sob tensão em solução hidrogenante. Os anéis de ensaio foram montados para aplicação da carga, a qual por sua vez, é função do nível de tensão a ser aplicado definido pelo limite de escoamento e do diâmetro do corpo de prova. Os corpos de prova para estes ensaios foram cilíndricos de 100 ml de comprimento e 6,35 mm. de diâmetro. Nestes ensaios as tensões aplicadas foram de 85%, 90% e 100% do limite de escoamento (Tabelas 2 e 5) dos aços X80, X56 e das juntas soldadas. Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente (25 °C), durante um tempo máximo de 720 horas ou até a ocorrência de fratura do material.

Os meios ou soluções para os ensaios NACE foram: - Solução B da norma NACE TM0177/96; - e a solução B da norma NACE com variação do pH e da saturação de H<sub>2</sub>S. A composição e características de saturação estão amostradas na tabela 7.

**Tabela 7.** Composição química das soluções utilizadas nos ensaios NACE<sup>(2)</sup>

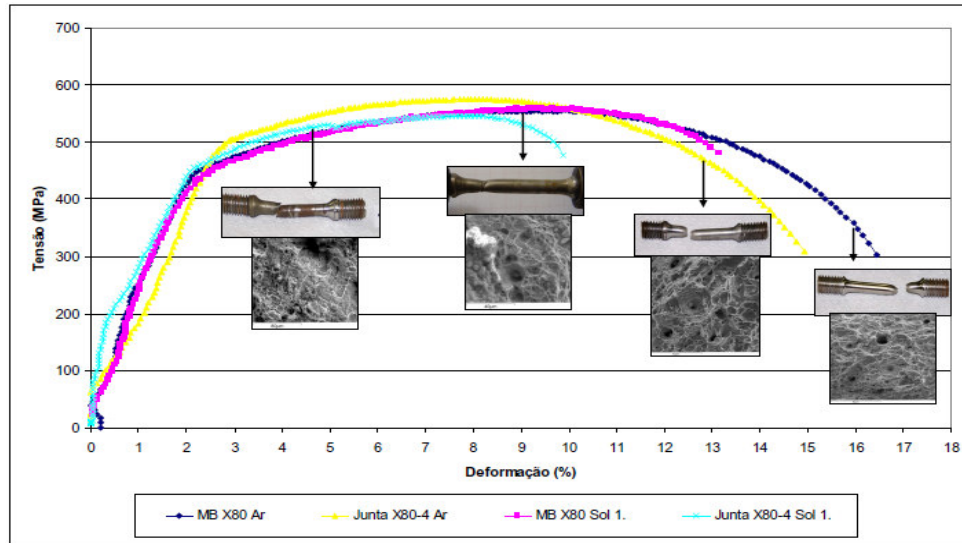
Componentes	Cloreto de Sódio (NaCl)	Acetato de Sódio (CH <sub>3</sub> COONa)	Ácido Acético (CH <sub>3</sub> COOH)	Razão de Vazão de H <sub>2</sub> S	pH
Teores	5%	0,4%	0,23%	Rápido*	3.4
Teores	5%	0,4%	0,23%	Lento**	3.4
Teores	5%	0,4%	0,23%	Rápido	4.4
Teores	5%	0,4%	0,23%	Lento	4.4

\* Saturadas com H<sub>2</sub>S gasoso a uma velocidade aproximada de 100 ml/min. durante 10 minutos. Em seguida o fluxo era reduzido e mantido durante o ensaio a uma razão de vazão rápida (3 bolhas cada 10 segundos). \*\* A etapa de saturação com H<sub>2</sub>S por 10 minutos com velocidade de 100 ml/min. foi eliminada e o fluxo de H<sub>2</sub>S reduzido a uma razão de vazão lenta (1 bolha cada 10 segundos).

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Ensaios BTB

O comportamento em tração ao ar e em solução, tanto da junta soldada quanto do metal base foram muito similares, conforme mostrado na Figura 3, onde o ensaio ao ar apresenta maior valor de deformação e menor valor de tensão de ruptura quando comparados com os ensaios em solução.



**Figura 3.** Curva Tensão-deformação para a junta soldada X80-4 em solução 1.

A susceptibilidade dos materiais ensaiados em BTB, pode ser avaliada de acordo com a equação (1):<sup>(3)</sup>

$$RRA = RA_1 / RA_2 \quad (1)$$

Onde  $RA_1$  são os valores obtidos em meio agressivo e  $RA_2$  os valores obtidos no ensaios ao ar.

A Tabela 8 mostra os resultados médios obtidos para alongamento (EI), redução de área (RA), tempo de ruptura (TR), e razão de redução de áreas (RRA). A redução de área para os corpos de prova ensaiados em solução, quando comparados aos ensaiados ao ar, indica perda de ductilidade significativa o que é coerente com a redução nos valores de deformação e menor estrição.

**Tabela 8.** Tabela da média dos valores obtidos para diferentes parâmetros dos ensaios BTB

Material	Ar			Solução 1				Solução 2				Solução 3				Solução 4			
	EI (mm)	RA (%)	TR (min.)	EI (mm)	RA (%)	RRA	TR (min.)	EI (mm)	RA (%)	RRA	TR (min.)	EI (mm)	RA (%)	RRA	TR (min.)	EI (mm)	RA (%)	RRA	TR (min.)
MB X80	4,2	63,6	249	3,2	26,5	0,41	208	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
MB X56	5,4	76,7	285	4,2	37,4	0,48	255	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Junta X80-1	4,1	67,3	254	2,2	18,3	0,27	167	2,9	39,6	0,60	153	2,0	13,1	0,20	161	3,6	68,6	1,02	212
Junta X80-2	4,0	75,2	218	2,2	31,8	0,42	154	3,7	68,0	0,90	220	2,2	40,3	0,53	163	2,9	69,2	0,92	216
Junta X80-3	3,8	69,7	233	2,4	17,0	0,24	172	3,7	68,0	0,97	223	2,4	23,6	0,34	185	3,9	72,1	1,03	228
Junta X80-4	3,2	66,8	206	2,3	23,3	0,31	163	3,6	68,9	0,93	213	2,6	23,6	0,32	172	3,8	71,7	0,97	226

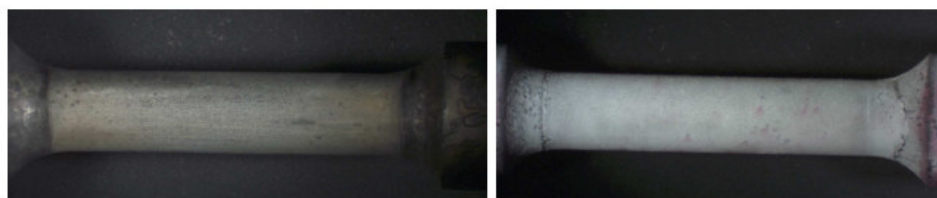
### 3.2 Ensaios NACE

Os metais base X80 e X56, resistiram às 720 horas de ensaio exigidas pela norma (Tabela 9), e não apresentaram trincas secundárias (Figura 4).



**Tabela 9.** Matriz Experimental para Ensaio NACE TM0177/96<sup>(2)</sup> e média dos tempos de ensaio obtidos

MATERIAL	pH	H <sub>2</sub> S	% LE aplicado	Média do tempo de ensaio/ Local da fratura
Metal Base X80	3,4	Saturado	90%	720 Hs. Sem trincas na superfície.
	3,4	Saturado	90%	720 Hs. Sem trincas na superfície.
	4,4	Insaturado	90%	720 Hs. Sem trincas na superfície.
Metal Base X56	3,4	Saturado	90%	720 Hs. Sem trincas na superfície.
Junta X80-1	3,4	Saturado	85%	25 Hs. Fratura pela solda
	4,4	Saturado	100%	17 Hs. Fratura pela Solda
	3,4	Insaturado	85%	812 Hs. Apresenta trincas na superfície 27,7 Hs. Fratura pela solda (LF)
	4,4	Insaturado	90%	39 Hs. Fratura pela solda (LF)
Junta X80-2	3,4	Saturado	85%	67,4 Hs. Fratura pela Solda 720 Hs. Apresenta Trincas na superfície
	4,4	Saturado	100%	19,6 Hs. Fratura pelo metal base X56 13,6 Hs. Fratura pela solda
	3,4	Insaturado	85%	811 Hs.
	4,4	Insaturado	100%	763 Hs. 7,1 Hs. Fratura pela solda (LF)
	3,4	Saturado	100%	12 Hs. Fratura pelo metal base X56
	4,4	Saturado	85%	115,5 Hs. Fratura pelo metal base X56 57,0 Hs. Fratura pela solda
	3,4	Saturado	90%	720 Hs. 175 Hs. Fratura pelo metal base X56
Junta X80-3	3,4	Saturado	90%	42 Hs. Fratura pela solda. 777 Hs.
	4,4	Saturado	100%	51 Hs. Fratura pela Solda (LF)
	3,4	Insaturado	85%	54 Hs. Fratura pela solda
	3,4	Saturado	100%	16 Hs. Fratura pela solda (LF)
	4,4	Saturado	85%	85 Hs. Fratura pela solda (LF)
	3,4	Saturado	85%	20 Hs. Fratura pela solda (LF)
	4,4	Saturado	90%	276 Hs. Fratura pela solda (LF)
Junta X80-4	3,4	Saturado	90%	63 Hs. Fratura pela solda
	4,4	Saturado	100%	52 Hs. Fratura pela solda
	3,4	Insaturado	85%	88 Hs. Fratura pela solda
	3,4	Saturado	100%	18,3 Hs. Fratura pela solda (LF)
	4,4	Saturado	85%	737 Hs. Não apresenta trincas
	3,4	Saturado	85%	17,7 Hs. Fratura pela solda 745,2 Hs. Apresenta Trincas grandes



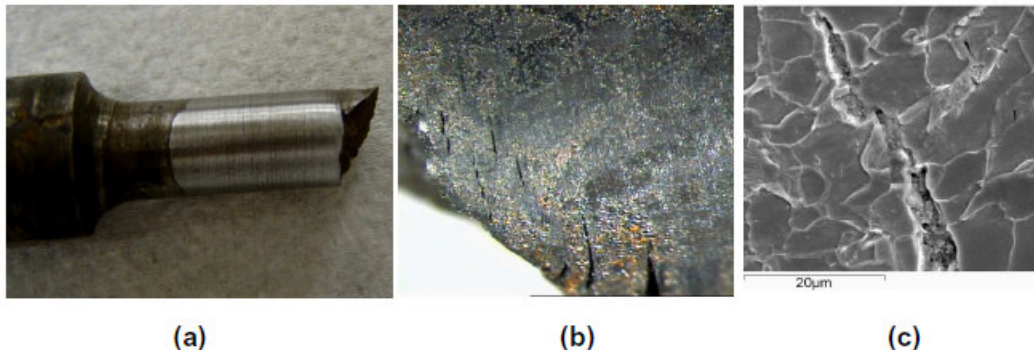
(a)

(b)

**Figura 4.** (a) Cp de MB X80 de Ensaio NACE solução B, aprovado pela Norma. (b) Ensaio de tintas penetrantes no mesmo corpo ensaio o qual a não ocorrência de trincamento na superfície do CP.

Nestas condições, este material estaria aprovado para trabalhar em ambientes ácidos. No entanto, as juntas soldadas, elaboradas pelos diferentes processos, não foram aprovadas uma vez que fraturaram antes do tempo especificado pela norma (720 horas de ensaio), e aquelas que não fraturaram

apresentaram trincas na superfície longitudinal. A iniciação e propagação de trincas foi predominantemente transgranular (Figura 5).

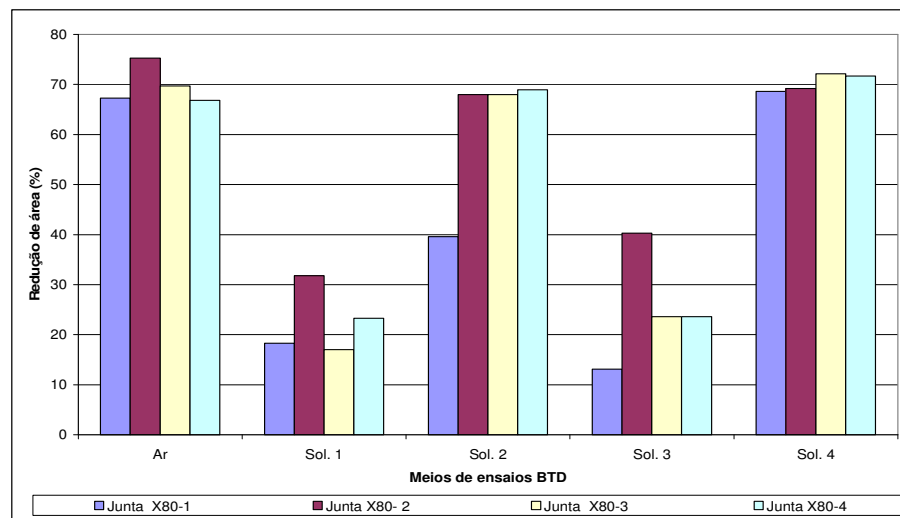


**Figura 5.** (a) Cp da Junta X80-1 do Ensaio NACE com solução B. (b) Trincas secundárias reveladas no Microscópio óptico. (c) Trincamento Transgranular revelado no MEV.

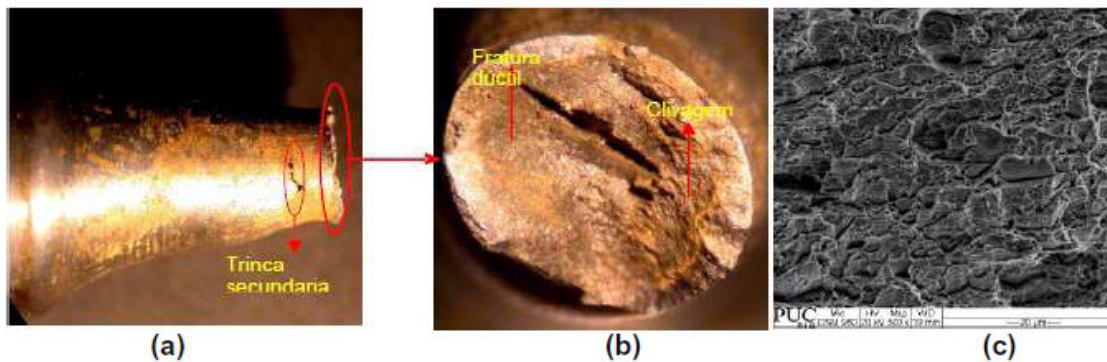
## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Ensaios BT D

Uma redução significativa da ductilidade é evidenciada (Figura 6) para os meios de ensaio 1 e 3 (pH mais ácido). Este comportamento pode ser atribuído a ação conjunta de dissolução do material e fragilização pelo hidrogênio, uma vez que estas soluções favorecem a produção de  $H_2S$  a partir de  $Na_2S_2O$ .<sup>(10,11)</sup> De acordo com Hutchens<sup>(12)</sup> a taxa de produção de hidrogênio é dependente da acidez (pH) do sistema, onde altas concentrações de espécies como  $CO_2$  e o  $H_2S$  promovem a redução do pH, aumentando a acidez e assim o risco de trincamento. Estes resultados estão em acordo com o fato que para as soluções 2 e 4 que possuem pH 4,4, o valor médio de RRA para as juntas soldadas é mais próximo de 1, indicando menor susceptibilidade à CST e fragilização pelo hidrogênio.<sup>(3)</sup>



**Figura 6.** Gráfico comparativo da Redução de área para as juntas soldadas ensaiadas em diferentes meios.



**Figura 7.** Detalhes macrográficos e micrográficos típicos das superfícies de fratura dos corpos de prova de ensaios BTB ao ar e em solução da Junta X80-1.

A avaliação da superfície de fratura por microscopia ótica e eletrônica de varredura para os ensaios em solução, evidenciou a presença de trincas secundárias (Figura 7 a) e morfologia de fratura mista apresentando tanto fratura por clivagem como fratura dúctil por *dimples* (Figuras 7b, 7c). Sendo estes resultados típicos para todas as amostras ensaiadas. Deve ser mencionado que no ensaio BTB todas as fraturas ocorreram no metal de base, exceto no caso da presença de defeitos no metal de solda tais como porosidade e inclusões que serviram como elementos concentradores de tensão, quando a fratura ocorreu nesta região.

#### 4.2 Ensaios NACE

As superfícies de fratura dos ensaios NACE apresentaram trincas secundárias no comprimento útil do corpo de prova (Figura 5). Este tipo de trinca é normalmente associado à recombinação de átomos de hidrogênio, previamente em solução sólida, para formar moléculas de hidrogênio nas interfaces microestruturais.<sup>(11)</sup>

Quase todas as fraturas ocorreram no metal de solda ou próximas à linha de fusão. Alguns autores<sup>(13,14)</sup> associam a ZTA como a região frágil de uma junta soldada em função da existência da zona de grãos grosseiros. No presente estudo a fratura ocorreu na região próxima a LF se estendendo para a ZTA e em outros casos na interface ZTA/Metal base.

A ZTA é considerada susceptível quando esta possui dureza superior a 250 Hv (22 Rc) segundo a norma NACE MR0175.<sup>(15)</sup> Neste estudo todas as ZTA, obtidas pelos diferentes processos, possuíam dureza superior a 250 Hv, (dureza média aproximadamente 256 Hv), e no metal de solda dureza média de 280 Hv. Assim sendo, segundo esta norma, todas as juntas apresentariam susceptibilidade considerando o parâmetro de dureza. Embora os ensaios realizados tivessem variação do valor de tensão aplicada, diferentes pH e concentração de H<sub>2</sub>S, a maior incidência de fratura ocorreu no metal de solda. Para os ensaios BTB esta tendência não ocorreu, havendo uma maior incidência de fratura no metal de base. Uma possível explicação é o fato que estes ensaios apresentam diferentes mecanismos, onde no caso dos ensaios NACE o fator determinante é o acúmulo de H no aço, enquanto no ensaio BTB o efeito predominante é a redução de tenacidade do material pelo efeito do hidrogênio, associada à deformação plástica imposta.

#### 5 CONCLUSÕES

Os metais base API X80 e API X56 foram considerados aprovados segundo os requisitos da Norma NACE TM0177/96, nas condições de ensaio aqui adotadas.

Porém os metais de solda originados nos diferentes processos de soldagem apresentaram susceptibilidade à CST em presença de sulfeto segundo o mesmo critério, fraturando em um período inferior a 720h ou apresentando trincas secundárias longitudinais.

As superfícies de fratura dos corpos de prova ensaiados, tanto em tração com baixa taxa de deformação quanto em meio NACE, apresentaram trincamento secundário, o que evidencia a ação do hidrogênio como elemento fragilizante dos materiais. O mecanismo de fratura predominante nos ensaios NACE foi fratura transgranular, localizando-se quase todas, na zona entre a linha de fusão e a zona de grãos grosseiros da zona afetada termicamente.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao CNPQ, CENPES – Petrobras pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa e a USIMINAS pela realização dos ensaios NACE.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 ZEEMANN, A. [www.infosolda.com.br/artigos/metso108/pdf](http://www.infosolda.com.br/artigos/metso108/pdf). Infosolda. 2003.
- 2 NACE Standard TM0177-96, Laboratory Testing of Metals for Resistance to Specific Forms of Environmental Cracking in H<sub>2</sub>S Environments, NACE International, 1996.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking- G 129 – 00. 2006.
- 4 MARTINS, F.A. Avaliação da Junta Soldada de Aço API em Meio Corrosivo. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Rio de Janeiro, 2005.
- 5 ZACCA, B.G. Curvamento por Indução de Tubo da Classe API 5L X80. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia - PUC-Rio. Rio de Janeiro, dezembro de 2005.
- 6 SAGE, A. M. Physical Metallurgy of High-Strength, Low-Alloy Line-Pipe and Pipe-Fitting Steels. The Metals Society, Vol. 10, p. 224-233, June 1983. London.
- 7 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products – A370, 2003.
- 8 LANCASTER, J.F. Handbook of Structural Welding, Abington Publishing, England, 2003.
- 9 SPECIFICATION FOR LINE PIPE, API SPECIFICATION 5L. American Petroleum Institute, March. 2004.
- 10 GUEDES, M. O. Avaliação da Fragilização pelo Hidrogênio em Juntas Soldadas de um Aço Carbono-Manganês. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1997.
- 11 KELLEN, R.S.L. BOTT, I.S. PONCIANO, J.A. Laboratory Investigation of Environmentally Induced Cracking of Api-X70 and X80 Pipelines Steels. 24<sup>TH</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE). June, 2005.
- 12 HUTCHENS, T. Carbon-Manganese and low alloys steels in sour service. TWI Knowledge Summary. 2007.
- 13 IKAWA, HI. OSHIGE, H. TANOUE, T. Effect of Martensite-Austenite Constituent on HAZ Toughness of a High Strength Steel. July, 1980.
- 14 OMWEG, G.M. FRANKEL, G.S. BRUCE, W.A. KOCH, G. The Performance of Welded High-Strength Low-Alloy Steels in sour Environments. Corrosion 2002. Paper 02048.
- 15 International Standard NACE MR0175/ISO15156 - Petroleum and Natural Gas Industries – Materials for use in H<sub>2</sub>S-containing Environments in Oil and Gas Production. 2001.