

# Soldagem em Operação: Parte 1 - Efeito do Arrefecimento Causado pelo Fluido em Tubulação de Espessura 11 mm

## (In-service Welding: Part 1: Effect of Freezing Caused by Fluid in 11 mm thick Pipe)

Paulo Faria<sup>1</sup>, Jefferson Pinto Soares<sup>2</sup>, Francisco Felipe da Silva Araujo<sup>1</sup>, Ronaldo Paranhos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UO/BC –PETROBRAS, Macaé, RJ, Brasil, [pfaria@petrobras.com.br](mailto:pfaria@petrobras.com.br)

<sup>2</sup>UENF-CCT-LAMAV, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, [paranhos@uenf.br](mailto:paranhos@uenf.br)

### Resumo

Este trabalho avalia, na soldagem em operação, a influência do arrefecimento causado por um líquido fluindo em contato com a parede interna de uma tubulação sendo soldada por TIG (GTAW) e eletrodo revestido (SMAW). A soldagem foi realizada na ligação de conexões de aço ASTM A105 a um tubo API 5L Gr X60 com espessura de 11 mm e de 6 mm. A circulação do fluido foi feita com água potável em duas faixas de temperatura, de 6 a 10°C e 26 a 36°C. Foram simuladas quatro juntas soldadas, avaliadas por meio de ensaios não destrutivos (inspeção visual, líquido penetrante, partículas magnéticas e ultrassom). Esta parte do trabalho apresenta os resultados dos ensaios destrutivos (tração, dobramento, impacto, fratura e dureza) e análise macrográfica e micrográfica para o tubo de 11 mm de espessura. As juntas soldadas não apresentaram os problemas típicos da soldagem em operação, como trincas a frio e risco de perfuração. Os procedimentos de soldagem puderam ser qualificados, atendendo os critérios de aceitação das normas pertinentes. Foi possível concluir que o resfriamento acelerado causado pelo fluido em circulação, elevou consideravelmente a taxa de resfriamento na superfície interna do tubo. O efeito do arrefecimento causado pelo fluido no interior do tubo foi mais significativo que a temperatura deste fluido, tendo provocado o aumento na dureza da zona fundida e zona termicamente afetada e reduzido o alongamento no ensaio de tração, porém ainda em valores adequados para o tubo de 11 mm de espessura.

**Palavras-chave:** Soldagem em Operação, Arrefecimento, TIG, Eletrodo Revestido.

**Abstract:** This work evaluates for in-service welding, the influence of cooling caused by a liquid flowing in contact with the inner wall of a pipe being welded by TIG (GTAW) and stick electrode (SMAW). The welding was done to join connections of an ASTM A105 to an 11mm and 6 mm thick API 5L Gr X60 steel pipe. The fluid circulation was made with potable water within two temperature ranges, of 6 to 10°C and 26 to 36°C. Four welded joints were simulated, evaluated by non destructive testing (visual, penetrant, magnetic and ultrasonic). This part of the work shows for 11 mm thick pipe the results for destructive testing (tensile, bending, impact Charpy V, fracture and hardness) and by macrographic and micrographic analysis. The welded joints did not presented typical problems of in-service welding, such as cold cracks and the risk of burn through. It was possible to conclude that freezing caused by the circulation fluid significantly increased the cooling rate in the inner wall of the pipe. The freezing effect of the fluid itself inside the pipe was more significant than the temperature of this fluid, having promoted increase in hardness of the fusion zone and heat affected zone and reduced elongation in the tensile testing, but still with adequate values for 11 mm thick pipe.

**Key-words:** In-service weldig, Cooling, GTAW, GMAW.

### 1. Introdução

A soldagem em operação é uma técnica onde se realiza a solda com o movimento ou fluxo contínuo de fluidos no interior da tubulação de processo ou duto, sem a necessidade de paradas operacionais. Pode ser realizada para reparos diretos na parede, reforços e instalação de conexões para posterior trepanação [1].

A soldagem em operação diferencia-se da soldagem convencional, pois utiliza processos de soldagem de baixa

energia e está associada a um escoamento acelerado de fluidos no interior do tubo. Como consequência, o ciclo térmico de soldagem é alterado, a velocidade de resfriamento tende a ser significativamente maior, trazendo riscos inerentes à fragilização da microestrutura e aumento da dureza.

Há dois riscos potenciais a serem considerados na soldagem em operação: a formação de trincas a frio e o excesso de penetração do cordão de solda na parede do duto, podendo causar a perfuração do tubo.

As trincas a frio podem surgir devido à alta concentração de hidrogênio na solda (proveniente do revestimento dos eletrodos, caso não recebam tratamento adequado), a uma microestrutura susceptível (martensita ou bainita), à presença de tensões residuais elevadas e à baixa temperatura [2]. É característica de

---

(Recebido em 19/09/2011; Texto final em 28/06/2012).

processos de soldagem de baixa energia, podendo ocorrer na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida (ZF) [3].

A perfuração da tubulação poderá ocorrer caso a área não fundida adjacente à poça de fusão não tenha resistência suficiente para suportar as tensões provenientes da pressão interna da tubulação [4]. O risco de perfuração é devido à sobrepenetração do arco, sendo função da espessura da parede, dos parâmetros de soldagem e das condições de operação do duto (vazão, pressão, temperatura e propriedades térmicas do fluido). A penetração aumenta com o aumento do aporte térmico. Este risco diminui à medida que se reduz a penetração da solda e se aumenta a espessura da parede da tubulação.

A perfuração da tubulação durante a soldagem normalmente não leva a rupturas catastróficas, porém, uma parada total do sistema de escoamento se torna necessária [4]. No entanto, resulta no vazamento do fluido e em problemas para a segurança do soldador e operadores do sistema. Além do perigo físico do vazamento em si, o produto pode ainda ser tóxico ou inflamável.

Processos de soldagem de baixo hidrogênio, tais como TIG e eletrodo revestido com revestimento tipo básico, associados a um aporte térmico baixo, resultam numa condição de menor penetração. Mas, na soldagem de tubos de espessura mais elevada, onde o risco de perfuração é menor, a adoção de aporte térmico mais elevado, para minimizar o risco do aparecimento de trincas a frio, é um procedimento freqüentemente utilizado.

Este trabalho foi realizado originalmente como uma

dissertação de mestrado [5] junto ao programa de pós-graduação de engenharia e ciência dos materiais da UENF, no intuito de simular a soldagem em operação envolvendo a união de conexões a tubos de 11 mm e 6 mm de espessura, com fluxo contínuo de água durante a soldagem. Foram testadas duas faixas de temperatura do fluido interno (temperatura ambiente e em torno de 10 °C). A seguir, foram avaliadas as taxas de resfriamento, as propriedades mecânicas e modificações microestruturais dos materiais provocadas pela soldagem em operação.

Esta parte do trabalho descreve o procedimento experimental usado para a simulação da soldagem e os controles realizados durante a soldagem de tubos de 11 mm e de 6 mm de espessura para avaliar o efeito da temperatura do arrefecimento na soldagem em operação. São avaliadas as propriedades da união de conexões a um tubo de 11 mm de espessura, com fluxo contínuo de água durante a soldagem. Os resultados para os tubos de 6 mm de espessura serão comentados em uma segunda parte, a ser publicado posteriormente.

## 2. Materiais e Métodos

O tubo utilizado foi um API 5L X60 com diâmetro nominal 12'' (323 mm) e espessura da parede de 11 mm. Parte do tubo foi usinada radialmente para a espessura de 6 mm. As conexões foram feitas com quatro chapas ASTM A572 Gr50 de espessura 22 mm, cuja composição química e soldabilidade são similares

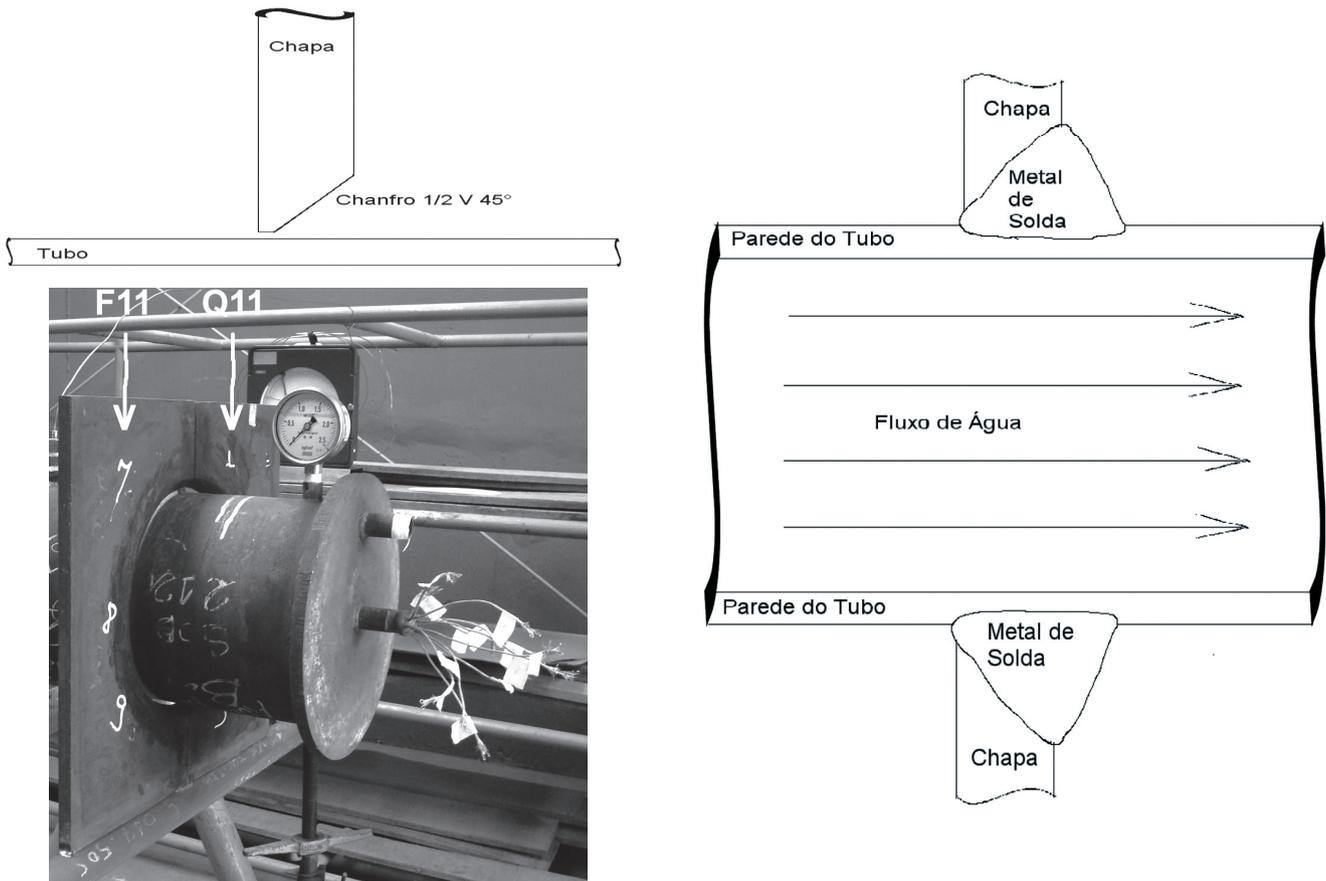


Figura 1. Detalhes do Aparato Experimental. (a) Detalhe Típico da Junta do Experimento; (b) Aparato Experimental e Posição das Soldas; (c) Detalhe da Solda e Fluxo do Experimento.

às conexões reais, fabricadas conforme a norma ASTM A105 [6]. A composição química destes materiais foi testada por análise com um espectrômetro de emissão óptica.

**Soldagem:** foram executadas quatro juntas de ângulo, com 500 mm de comprimento cada, soldadas com penetração total, cujo aparato experimental é mostrado na Figura 1. No intuito de avaliar os efeitos do resfriamento acelerado causado pelo fluido interno, foram testadas duas situações: uma com fluxo à temperatura ambiente e outra com o fluxo resfriado abaixo de 10 °C. As soldas foram identificadas como: Q11: solda ligando uma peça à parte do tubo com 11 mm, com o fluxo à temperatura ambiente; F11: solda ligando uma peça à parte do tubo com 11 mm, com o fluxo à temperatura abaixo dos 10°C. Q6: solda ligando uma peça à parte do tubo com 6 mm, com o fluxo à temperatura ambiente; F6: solda ligando uma peça à parte do tubo com 6 mm, com o fluxo à temperatura abaixo dos 10°C.

Os processos de soldagem utilizados foram TIG com corrente contínua polaridade direta (CCPD) no passe de raiz e reforço da raiz, utilizando varetas classe ER70S-3 [7] com gás de proteção Argônio 99,99%. A seguir, foi utilizado eletrodo revestido classe E7018 [8], com corrente contínua polaridade inversa (CCPI), para os passes de enchimento e acabamento. Os soldadores foram previamente qualificados, nos dois processos, em procedimento de soldagem convencional.

**Controle Durante a Soldagem:** A circulação do fluido no procedimento Q11 e Q6 foi realizada com água à temperatura ambiente. Nos procedimentos F11 e F6, a circulação foi realizada com água resfriada artificialmente, com a adição de gelo picado

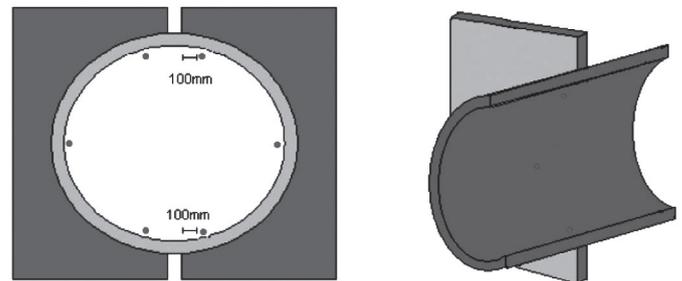
na caixa d'água, que possibilitou a obtenção de temperaturas de fluxo abaixo dos 10° C, durante toda a soldagem. As variáveis do fluxo no interior do tubo, como pressão, vazão, velocidade de escoamento e regime de escoamento foram mantidas fixas (veja Tabela 1). Durante a soldagem, as variáveis do processo foram medidas: intensidade de corrente e tensão com um multímetro; a velocidade de soldagem foi calculada pela relação entre o comprimento da solda e o tempo gasto para sua realização. Também foi medida a largura do cordão depositado (oscilação).

O controle da temperatura do fluido foi realizado utilizando um termômetro analógico, instalado no tubo o próximo à entrada de água, como mostra a Figura 2. O registro destas temperaturas foi feito, de forma contínua, através de termorregistor ligado a um termopar, que foi instalado no meio do tubo, na parte superior (veja Figura 2). Serão apresentadas apenas as temperaturas máximas e mínimas registradas.

A temperatura na peça foi medida na junta soldada e monitorada através de um conjunto de termopares ligados a um termoregistor. Foram instalados, pelo lado interno do tubo na direção da solda, três termopares do tipo K em cada junta soldada, totalizando 6 termopares, como mostra a Figura 2. A instalação foi feita antes da montagem do aparato e a fixação dos termopares foi efetuada pelo método de solda por pontos. O objetivo foi registrar as temperaturas máximas e mínimas, no centro da junta, alcançadas durante a soldagem em cada procedimento. Utilizou-se também um pirômetro ótico para medir a temperatura entre passes e a temperatura das peças durante a soldagem.



(a)



B

(b)

Figura 2. Detalhes dos instrumentos utilizados para a monitoração da temperatura. (a) Termômetro, termopar e termo-registor. (b) posição de instalação dos tempopares internos.

Tabela 1. Variáveis do fluxo no interior do tubo.

Fluido	Água
Pressão do Fluido (kg/cm <sup>2</sup> )	0,2
Vazão do Fluido (l/s)	0,6
Velocidade de Escoamento do Fluido (m/s)	0,002
Número de Reynolds	806
Regime de Fluxo	Escoamento Laminar

A taxa de resfriamento da peça ( $\Delta T_{350-150}$ ) entre 350°C e 150°C foi estimada. A metodologia usada consistiu em aquecer localmente o tubo em uma região próxima à solda, utilizando um maçarico oxi-acetileno como fonte de calor. O tubo foi aquecido até 400°C, em seguida a chama foi interrompida e iniciou-se a contagem do tempo de resfriamento a partir de 350°C até 150°C, usando um pirômetro ótico e um cronômetro. A taxa de resfriamento foi calculada em °C/s. Foram realizadas cinco medições, sendo calculada a média dos resultados. Este procedimento foi realizado para duas espessuras do tubo (11 mm e 6 mm) e para as duas temperaturas do fluido (temperatura ambiente e 10° C). Também foi medida para os tubos sem fluxo interno, que representa o procedimento de soldagem convencional, sem fluido de arrefecimento, para efeito de comparação.

**Ensaio Não Destrutivos:** após a soldagem, 100% das juntas soldadas foram submetidas à inspeção visual, líquido penetrante, partículas magnéticas e ultra som. Os ensaios foram conduzidos de acordo com a norma ASME Section V [9] por inspetores qualificados.

**Ensaio Mecânicos:** Apenas as juntas de espessura 11 mm (Q11 e F11) foram avaliadas, por meio dos ensaios de impacto Charpy V, tração, fratura, dureza e dobramento. A Tabela 2 mostra a quantidade de corpos de prova usados. Os ensaios foram programados com base nas especificações de fabricação dos materiais e nas normas aplicáveis na qualificação dos procedimentos de soldagem, no caso as normas API 1104 [10] e ASME Seção IX [11]. A localização e orientação para a retirada dos corpos de prova são mostradas na Figura 3. Os ensaios foram conduzidos de acordo com a norma ASTM A 370 [12], seguindo os critérios de aceitação referentes à qualificação destes procedimentos de soldagem, ASME IX [11] e API 1104 [10].

Tabela 2. Ensaio Destrutivos Realizados.

	Total de Corpos de Prova	Q11	F11	Metal Base
Tração	5	2	2	1
Dobramento	8	4	4	-
Impacto	15	6	6	3
Fratura	8	4	4	-

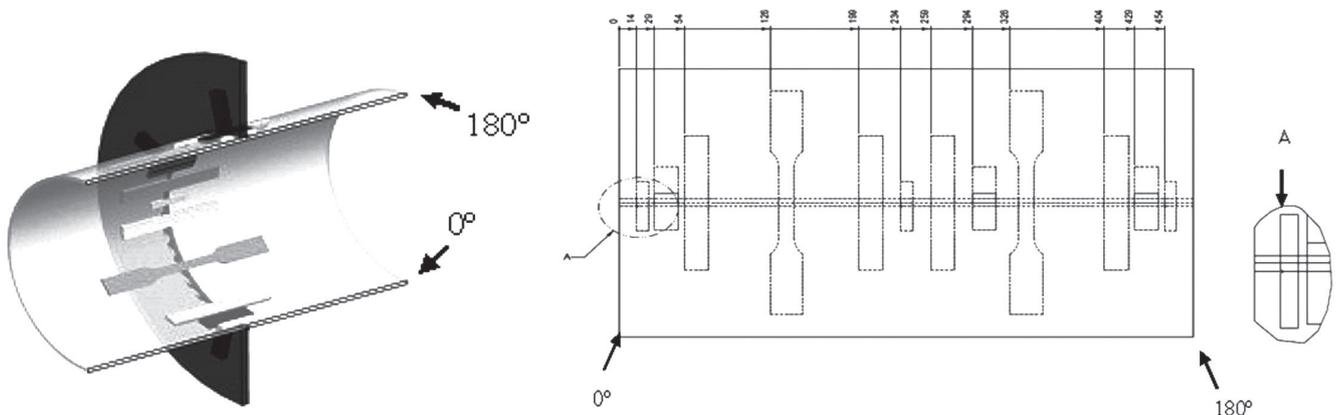


Figura 3. Orientação para Retirada dos CP.

**Ensaio de Impacto Charpy V:** para cada junta soldada foram preparados 6 corpos de prova, sendo 3 com entalhe no centro da solda e 3 na ZTA próximo a região de grãos grosseiros. A dimensão destes CP's foram de 55X10X7,4 mm. Para o metal de base foi preparado 3 CP's com a dimensão padrão de 55X10X10 mm. Todos foram ensaiados à temperatura de 0° C. Para a comparação dos resultados, a energia absorvida foi convertida por meio da equação abaixo.

$$\text{Média Convertida} = \frac{(\text{Média} \times 10)}{\text{espessura}}$$

**Ensaio de Tração:** o CP do metal base foi retirado no sentido longitudinal de laminação do tubo. Para cada junta soldada, 2 CPs transversais à solda foram preparados para cada procedimento.

**Fratura (Nick Break):** realizado em 8 CPs, 4 para cada procedimento. Este ensaio tem a finalidade de verificar a existência de descontinuidades internas, hidrogênio e outros gases retidos na rede cristalina do cordão de solda.

**Ensaio de Dobramento:** realizado em 8 CPs, 4 para cada procedimento, sendo dobrada a face da solda, com a finalidade de medir a ductilidade do material na região da junta soldada.

**Exame Macrográfico e Ensaio de Dureza vickers:** o exame macrográfico foi realizado para identificar as regiões e extensão da ZTA, assim como a ocorrência de descontinuidades nas juntas soldadas. Cinco CPs foram preparados para cada junta soldada. As amostras foram cortadas, lixadas e atacadas com Nital 10% (HNO<sub>3</sub> 10% em álcool etílico) por cerca de 20 segundos. O ensaio de dureza vickers foi realizado com carga de 10 kgf nos corpos de prova de macrografia e conduzido conforme a norma ASTM E 92 [13]. Foram feitas medições de dureza em 22 pontos em cada amostra do exame macrográfico, seguindo duas linhas com 1 mm de distância das bordas do CP, uma no lado da face e outra no lado da raiz, com 11 impressões de cada lado, como mostra a Figura 4. No total, foram 220 medições entre a chapa, o tubo, a ZTA e o metal de solda para as 2 juntas soldadas.

**Microestrutura:** foi observada em microscópio ótico (MO) com aumentos de 400X e 500X na amostra Q11. O intuito foi identificar a microestrutura resultante do processo de soldagem com superesfriamento. A Figura 5 identifica os locais de remoção dos CP. A região escolhida para análise foi a do último passe depositado, onde não houve passe posterior de reaquecimento.

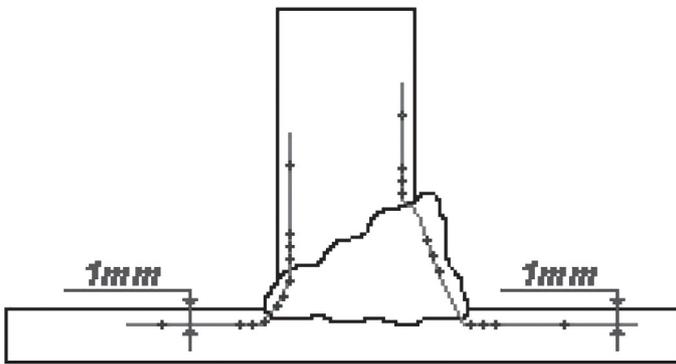


Figura 4. Arranjo para Medição de Dureza.

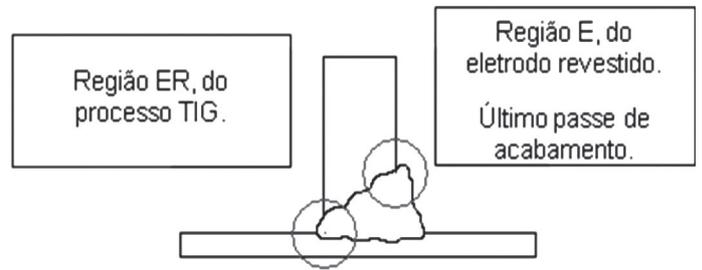


Figura 5. Região das Amostras para Micrografia.

Tabela 3. Composição Química dos Materiais de Base.

Composição Química				
Elemento	Tubo		Chapa	
	Ensaio	Norma (máx) API 5L	Ensaio	Norma (máx) ASTM A105
C (%)	0,188	0,24	0,22	0,35
Mn (%)	1,24	1,40	1,17	1,35
Cr (%)	0,007	-	0,017	0,30
Mo (%)	0,044	-	0,002	0,12
V (%)	0,054	0,10	0,001	0,08
Ni (%)	0,05	-	0,002	0,40
Cu (%)	0,003	-	0,003	0,40
CE(%)	0,42	0,43	0,42	0,48
$CE(\%) = (\%C) + \frac{(\%Mn)}{6} + \frac{(\%Cr) + (\%V) + (\%Mo)}{5} + \frac{(\%Ni) + (\%Cu)}{15}$				

Tabela 4. Parâmetros de Soldagem.

Procedimento		Parâmetros de Soldagem	Tipo de corrente / Polaridade	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Oscilação (mm)	Heat input (KJ/cm)
Q11		Raiz	CCPD	13	148	3	7	38,5
		Reforço	CCPD	11,5	141	6	8	16,2
		Enchimento	CCPI	24-26	140-150	10-22	7-10	21,0
		Acabamento	CCPI	26	100	11-20	7-8	14,2
F11		Raiz	CCPD	14	205	7,5	7,1	23,0
		Reforço	CCPD	15,2	226	12	10	17,2
		Enchimento	CCPI	25-29	130-150	7-20	9-11	30,1
		Acabamento	CCPI	28-30	11-105	11-17	8-9	15,8

**Execução da Soldagem:** a Tabela 4 mostra os parâmetros de soldagem utilizados e o cálculo do aporte de calor (HI) conforme a equação 1 abaixo.

$$HI \text{ (KJ/cm)} = 0,06 \times \frac{\text{corrente (A)} \times \text{tensão (V)}}{\text{velocidade (cm/min)}} \quad \text{Equação 1}$$

### 3. Resultados e Discussão

**Análise Química:** a Tabela 3 mostra que a composição química do tubo atendeu às exigências da norma API 5L para

este material. O CE foi calculado em 0,42%, próximo do limite máximo previsto para o grau X-60, que é de 0,43%. A composição da chapa ASTM A105 também atendeu à especificação, com CE calculado em 0,42%, sendo o máximo permitido de 0,48% para este material. Tanto o tubo como a chapa foram cuidadosamente escolhidos para este trabalho, de forma que o CE de ambos estivessem próximos ao limite máximo das especificações, pois na soldagem, altos valores de CE implicam em uma maior susceptibilidade a formação de estruturas frágeis e trincas a frio [3].

**Ensaio Não Destrutivo:** foram realizados de acordo com os métodos previstos. Ensaio visual, LP e PM não mostraram evidências de descontinuidades. O ensaio de US não detectou descontinuidades internas. As juntas foram consideradas aprovadas conforme os critérios de aceitação das normas ASME B 31.3 [14], ASME seção IX [11] e API 1104 [10].

A seguir são apresentados apenas os resultados dos procedimentos com espessura 11 mm (Q11 e F11). Outro trabalho apresentará os resultados com espessura 6 mm.

**Controle da Temperatura durante a Soldagem:** a Tabela 5 mostra que a temperatura do fluido foi entre 26 e 36 °C para o procedimento Q11 e entre 6 e 10 para F11, como previsto. A máxima temperatura interna da parede do tubo foi de 338 °C no procedimento Q11 e 298 °C em F11. A norma N-2163 [1] especifica que, para evitar perfuração durante a soldagem em operação, a temperatura interna da parede deve ser inferior a 980 °C. Conclui-se que para Q11 e F11 a temperatura interna do tubo está abaixo da máxima especificada por norma, minimizando a possibilidade de perfuração durante a soldagem. A taxa de resfriamento medidas foi de 37,5 °C/s para Q11 e 50 °C/s para F11. A taxa de resfriamento para o mesmo tubo sem o fluxo utilizado em procedimentos convencionais de soldagem sem fluxo é de 2 °C/s. Pode-se concluir que o efeito do arrefecimento do fluido no tubo foi mais significativo que a temperatura deste fluido.

Tabela 5. Intervalos das Temperaturas Registradas.

		Q11	F11	**
Tubo (°C)	mínima	25,6	6,7	-
	máxima	31,8	10	-
Líquido (°C)	mínima	26	6	-
	máxima	36	10	-
Termopares Internos (°C)	mínima	221	250	-
	máxima	338	298	-
$\Delta t$ (300 -150)(°C/s)		37,5	50	2
** Sem líquido interno				

**Macrografia:** a figura 6 mostra as regiões da junta soldada, a quantidade de passes e camadas, a transição entre o metal de adição e o metal de base e identifica a extensão da ZTA. A macrografia foi considerada aprovada.

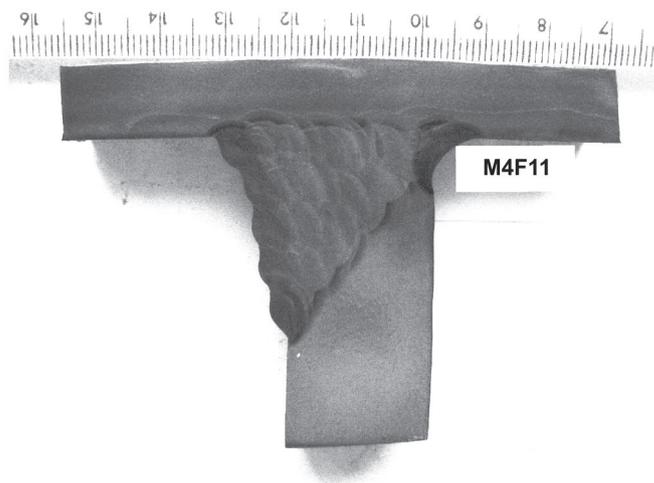


Figura 6. Macrografia típica, relativa ao procedimento F11.

**Ensaio de Tração:** a Tabela 6 mostra que tanto o tubo usado (metal base) como as juntas soldadas Q11 e F11 atenderam os requisitos da norma API 5L PSL-2 [15]. Nota-se uma relativa queda no alongamento das juntas soldadas, quando comparado ao metal base. A queda na ductilidade é atribuída ao arrefecimento do fluido.

**Fratura (Nick Break):** o objetivo deste ensaio [10] é atestar a inexistência de defeitos nas juntas soldadas. Os ensaios dos 8 CP não evidenciaram descontinuidades significativas, sendo considerados aprovados.

**Ensaio de Dobramento:** não foram constatadas descontinuidades acima de 3 mm na região de dobramento, sendo considerados aprovados conforme [10].

**Dureza vickers:** a tabela 7 mostra os resultados obtidos (média, desvio padrão e coeficiente de variância). O valor máximo encontrado foi de 280 HV, para a ZF da junta Q11. A tabela 7 mostra um acréscimo na dureza da ZF e da ZTA para ambos os procedimentos Q11 e F11 em comparação aos metais de base (chapa e tubo). Os consumíveis de soldagem utilizados (tig e eletrodo revestido) apresentam dureza entre 180 e 220 HV [7,8] quando usados na soldagem convencional, sem arrefecimento. O aumento da dureza foi atribuído ao efeito do arrefecimento do fluido interno, que aumentou significativamente a taxa de resfriamento (veja tabela 5). Por outro lado, observa-se que a

Tabela 6. Resultados dos Ensaio de Tração.

	Escoamento (MPa)		Resistência (MPa)		Alongamento (%)		Redução de Área (%)	FRATURA
	ensaio	Ref. [15]	ensaio	Ref. [15]	Ensaio	Ref. [15]		
MB	498	415 (Mín.)	586	520 (Mín.)	33,8	20 (Mín.)	70,0	-
Q11	507		590		21,2		62,2	MB
	485		535		20,8		70,4	MB
F11	519	565 (Max)	605	760 (Max)	22,8	20 (Mín.)	56,8	MB
	515		596		20,2		43,7	ZF

redução da temperatura do fluido interno de 26 -36 °C para 6 -10 °C não influenciou significativamente os resultados de dureza.

Os resultados da dureza ratificam os valores obtidos nos ensaios de tração (veja tabela 6) tendo sido observado um aumento da dureza acompanhado com um aumento do limite de resistência e queda da ductilidade.

Tabela 7. Média e desvio padrão do ensaio de dureza vickers com carga de 10 kgf.

	Região	Média (HV)	Desvio Padrão	Coef. de Var.
Metal Base	Tubo	187	15	3
	Chapa	229	16	3
F11	ZTA	255	25	10
	ZF	269	23	8
Q11	ZTA	263	14	5
	ZF	280	12	4

**Ensaio de Impacto:** os resultados são mostrados na Tabela 8. A energia absorvida (EA) pelo metal base foi 268 J. Os procedimentos Q11 e F11 apresentaram EA convertida acima da do metal base. A norma API 5L PSL-2 [15] estabelece para o Grau X60 o mínimo de 27 J a 0 °C. Assim, tanto o arrefecimento como a temperatura do fluido interno não alteraram a tenacidade da ZF e da ZTA.

Os resultados dos ensaios apresentados acima (ensaios não destrutivos, dobramento, fratura, tração, dureza e impacto) permitem aprovar e qualificar o procedimento de soldagem conforme ASME seção IX [11] para a soldagem em operação de tubo com 11 mm de espessura com fluido interno até a temperatura mínima de 6 – 10 °C.

**Microestrutura:** foi avaliada apenas a amostra Q11, que apresentou maior dureza na ZF. A microestrutura do MB (tubo) é constituída de uma fina ferrita poligonal, figura 7. A ZF é constituída de ferrita acicular e ferrita poligonal, com alguma ferrita com segunda fase alinhada, figura 8. A região de grãos finos (RGF) da ZTA é constituída de uma fina ferrita poligonal, figura 9. A região de grãos grosseiros (RGG) da ZTA é constituída predominantemente de ferrita de widmanstatten. Não há evidências de fases frágeis. A microestrutura obtida é compatível com os resultados de dureza (tabela 7) e tenacidade ao impacto (tabela 8).

Tabela 8. Resultados do ensaio de impacto Charpy V a 0 °C.

CP	Dimensão (mm)	Entalhe	Energia Absorvida (J)			Média (J)	Média da EA Convertida (J)	API 5L PSL-2 [15] (J)
MB	55X10X10	MB	266	266	273	268	268	27 (mín)
Q11	55X10X7,4	ZF	209	201	203	204	272	27 (mín)
	55X10X7,4	ZTA	203	216	199	206	274	
F11	55X10X7,4	ZF	237	273	279	263	355	
	55X10X7,4	ZTA	227	251	261	246	332	

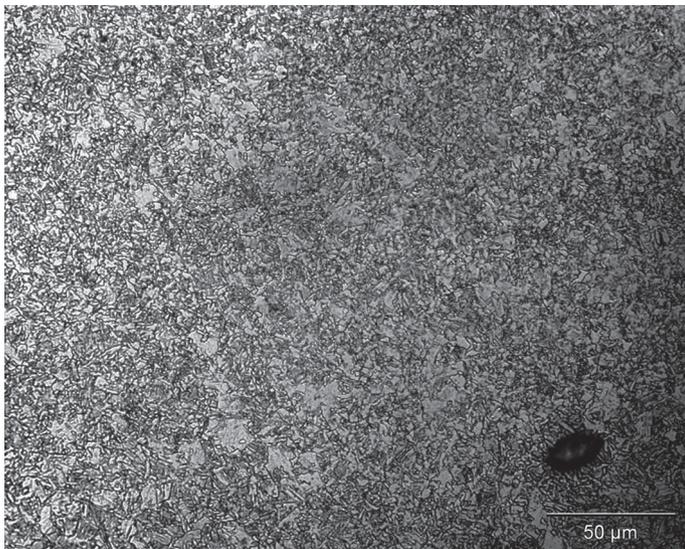


Figura 7. Metal base (tubo) 400X.

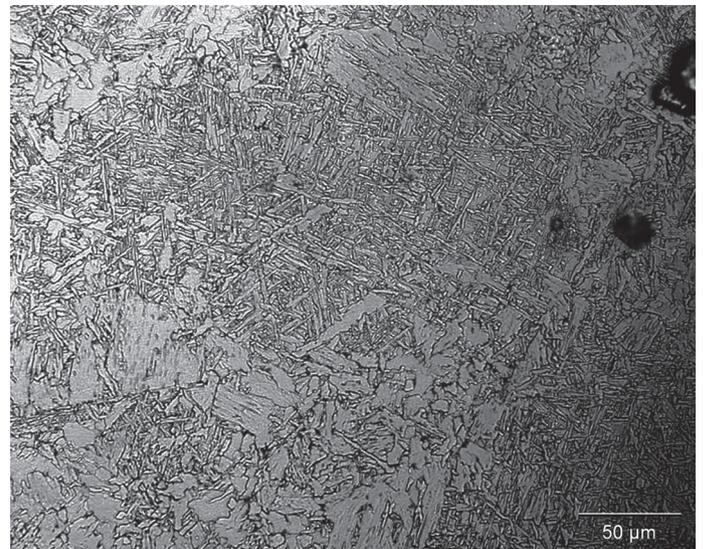


Figura 8. Zona fundida 400X.



Figura 9. Região de grãos finos da ZTA (TIG, tubo) 500X



Figura 10. Região de grãos grosseiros da ZTA (TIG, chapa) 400X.

#### 4. Conclusões

A avaliação na soldagem em operação da influência do arrefecimento causado pelo fluido em contato com a parede interna de uma tubulação de 11 mm espessura, utilizando os processos de soldagem TIG (GTAW) e Eletrodo Revestido (SMAW) permite concluir que:

Na soldagem em operação, o resfriamento causado pelo fluido em circulação, elevou significativamente a taxa de resfriamento na superfície interna do tubo, quando comparado à soldagem convencional, sem arrefecimento.

O efeito do arrefecimento do fluido no interior do tubo foi mais significativo que a temperatura deste fluido.

O arrefecimento causado pelo fluido provocou aumento na dureza da ZF e ZTA, e reduziu o alongamento no ensaio de tração, porém ainda em valores adequados para o tubo de 11 mm de espessura. Demais propriedades não foram alteradas.

Foi possível, pelos resultados dos ensaios não destrutivos e ensaios mecânicos obtidos, qualificar o procedimento de soldagem, com base nas normas especializadas neste processo.

Com o procedimento de soldagem adotado, não é necessária a adoção de cuidados especiais quanto à possibilidade de perfuração e vazamento de fluido de processo, visto que a temperatura máxima na parede interna do tubo foi de 338 °C.

#### 5. Referências Bibliográficas

- [1] PETROBRAS N-2163. “Soldagem e Trepanação em Equipamentos, Tubulações Industriais e Dutos em Operação”. Brasil, 2008.
- [2] COE, F. R. “Welding Steels Without Hydrogen Cracking”. The Welding Institute, Cambridge, United Kingdom. 68p., 1973
- [3] MODENESI, P. J. “Soldabilidade dos Aços Transformáveis”. Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 71p. 2006.
- [4] BRUCE, W. A. “Overview of In-service Welding Research

at EWI”. First International Conference on Welding Onto In-Service Petroleum Gas and Liquid Pipelines. Wollongong-Australia. 2000.

- [5] FARIA, P. Efeito do Arrefecimento do Fluido e da Espessura do Material na Soldagem em Operação em Plantas Offshore. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) Campos dos Goytacazes – RJ Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF, 185p., 2011.
- [6] ASTM A105. “Standard Specification for Carbon Steel Forgings for Piping Applications”. American Society for Testing and Materials. USA. 5p. 2010.
- [7] AWS A 5.18. “Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding”. American Welding Society, USA. 44p. 2005.
- [8] AWS A 5.1. “Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding”. American Welding Society, USA. 55p. 2005.
- [9] ASME Section V. Non Destructive Examination. American Society for Mechanical Engineers. USA. 304p. 2007.
- [10] API 1104. Standard for Welding Pipe Lines and Related Facilities. American Petroleum Institute, USA. 50p. 2010.
- [11] ASME Section IX. Qualification Standard For Welding And Brazing Procedures, Welders, Brazers, And Welding And Brazing Operators. American Society for Mechanical Engineers. USA. 245p. 2008.
- [12] ASTM A 370. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. American Society for Testing and Materials, USA. 47p. 2008.
- [13] ASTM E 92. Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials, USA. 9p. 2003.
- [14] ASME B 31.1. Process Piping. American Society for Mechanical Engineers, USA. 386p.
- [15] API 5L PSL-2. Specification for line pipes. American Petroleum Institute, USA. 186p. 2009.