

COMPARAR A INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG E SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO, QUANTO AO RISCO DE PERFURAÇÃO E VAZAMENTO DE FLUIDO, ASSIM COMO O RISCO DE TRINCA A FRIO

Fernando Marques Fernandes¹, Carlos Alberto Amaral Moino², Heitor Pereira Bernardes³, Larissa Pagotto Gomes⁴, Luis Rodrigo Rochelle⁵, e Thaís Dantas Silva⁶

^{1 a 6} Departamento de Engenharia Mecânica – UNISANTA – Universidade Santa Cecília
Rua Oswaldo Cruz, 277 – Santos – São Paulo – Brasil – fmarques@unisanta.br

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo comparar a influência dos processos de soldagem TIG (GTAW) e soldagem com eletrodo revestido (SMAW), em uma tubulação sendo resfriada com a passagem de fluido, o que caracteriza a soldagem em operação. Os aportes térmicos de soldagem para cada processo de soldagem foram avaliados. A soldagem foi realizada na parede externa do tubo API 5L Gr. X65 – CE: 0,41% e com espessura de 7,10 (0,280”), simulando o enchimento com solda. Água potável na temperatura ambiente, em torno de 20,4 °C, foi utilizada como fluido de resfriamento. A temperatura interna do tubo e a taxa de resfriamento foram monitoradas. Ensaio não destrutivo (inspeção visual e líquido penetrante), ensaios destrutivos (tração e dureza) e análise macrográfica e micrográfica, realizados nos 4 trechos de enchimento com solda, serviram de base para a avaliação. Os resultados mostraram que a possibilidade de perfuração e vazamento de fluido durante a soldagem em operação não ocorreu, pois, a temperatura na parede interna do tubo ficou muito abaixo da temperatura estabelecida por norma (980 °C de acordo com PRCI R2269-01R – Final Report). No entanto, a zona de fusão (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA) tiveram maior penetração no processo SMAW. Não foi observado o aparecimento de fases frágeis devido ao resfriamento rápido (estrutura martensítica), porém o resfriamento causado pelo fluido provocou o aumento da dureza na ZF e ZTA, e ainda reduziu o alongamento no ensaio de tração. Este aumento ficou mais evidente no processo de soldagem com Eletrodo Revestido. Pelos resultados apresentados e de acordo com os aportes térmicos (HI – Heat Input) empregados (HI TIG ≈ HI SMAW) é possível verificar que o processo de soldagem SMAW oferece maior risco de perfuração.

Palavras Chave: Soldagem em Operação; Soldagem em carga; Tubulações Industriais.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivo

Comparar a influência dos processos de soldagem TIG (GTAW) e soldagem com Eletrodo Revestido (SMAW), quanto ao risco de perfuração e vazamento de fluido, assim como o risco de trinca a frio (“Hydrogen Cracking”), levando em consideração os aportes térmicos (HI – “Heat Input”), em um tubo sendo resfriado com a passagem de fluido (água na temperatura ambiente de 20,4 °C), o que caracteriza a soldagem em operação (“In-Service Welding”).

1.2. Revisão Bibliográfica

A soldagem envolve muitos fenômenos metalúrgicos como, por exemplo, fusão, solidificação, transformações no estado sólido, deformações causadas pelo calor e tensões de contração, que podem causar muitos problemas práticos. Os problemas podem ser evitados ou resolvidos aplicando-se parâmetros de soldagem adequados para uma determinada atividade.

A maioria dos processos de soldagem por fusão é caracterizada pela utilização de uma fonte de calor intensa e localizada. Esta energia concentrada pode gerar em pequenas regiões temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos, variações bruscas de temperatura e, conseqüentemente, extensas variações de microestrutura e propriedades em um pequeno volume de material.

Após a soldagem a dissipação de calor ocorre principalmente por condução na peça das regiões de maior temperatura para o restante do metal. A variação da temperatura em diferentes pontos da peça durante a soldagem pode ser estimada na forma de uma curva denominada ciclo térmico de soldagem. Os pontos mais próximos da junta sofrerão uma variação de temperatura devido à passagem da fonte de calor. Essa curva apresenta pontos importantes: temperatura de pico (T_p), temperatura crítica (T_c), tempo de permanência acima de uma temperatura crítica (t_p).

Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas-Shielded Tungsten Arc Welding) é um processo que utiliza eletrodo sólido de tungstênio não consumível. O eletrodo, o arco e a área em volta da poça de fusão da solda são protegidos por uma atmosfera protetora de gás inerte. Para a solda TIG podemos utilizar um metal de enchimento (chamado vareta), ele é adicionado no limite da poça de fusão. A soldagem TIG produz uma solda limpa e de alta qualidade e como não gera escória, a chance de inclusão desta no metal de solda é eliminada, e a solda não necessita de limpeza no final do processo. Os tipos de gases mais indicados para o processo TIG são argônio, hélio ou mistura entre esses dois gases.

A soldagem em eletrodo revestido também conhecida como Shielded Metal Arc Welding (SMAW) é um processo manual no qual um fio elétrico é mantido entre a extremidade do eletrodo metálico revestido e a peça a ser trabalhada com alto calor. Esse calor que é produzido pelo fio, vai fundindo

o metal juntamente com o eletrodo e o revestimento. Conforme a soldagem vai acontecendo, os gases que vão se soltando, vão protegendo o metal de solda da contaminação.

Esse processo de soldagem é bastante utilizada para soldar ferro e aço, mas também pode ser usado em ligas de níquel, cobre e alumínio.

Além de ser encontrados facilmente no mercados, os eletrodos revestidos proporcionam uma solda limpa e rápida na peça. É um processo onde há baixo investimento, pois os equipamentos podem ser usados para diversos outros processos, além da flexibilidade de aplicação.

Mas, além de suas vantagens, esse processo possui uma baixa produtividade e requer cuidados especiais com os eletrodos e delicadeza na hora da soldagem. E há também um volume maior de gases e fumos gerados no processo.

O eletrodo revestido é um ótimo condutor metálico que permite facilmente a passagem da corrente elétrica. É formado por um núcleo metálico, chamado alma. Essa alma tem como principal função, conduzir a corrente elétrica e fornecer metal para a junta da peça. Já o seu revestimento, é extrusado sobre varetas metálicas.

1.3. Metodologia

O tubo utilizado foi o API 5L Gr. X65, com diâmetro nominal de 12" (323 mm) e espessura de parede de 7,10 mm (0,280"), Figura 1. A composição química do tubo foi testada por análise com espectrômetro de emissão óptica e ratificada através do Certificado de Material fornecido na aquisição do material.

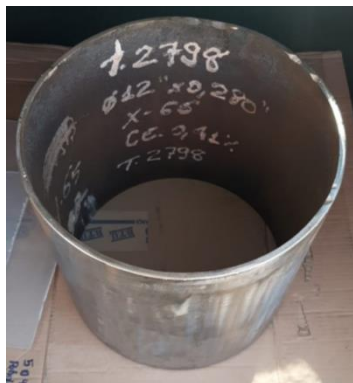


Figura 1: Tubo utilizado para o ensaio

As soldagens de enchimento com solda, foram executadas em 4 regiões da parede externa do tubo, com 200 mm de comprimento cada. No intuito de avaliar os efeitos do resfriamento acelerado, causado pela passagem do fluido interno, foram avaliadas as seguintes condições:

Condição 1 - Utilizado o processo soldagem TIG (GTAW) com corrente contínua e polaridade direta (CC-), corrente elétrica de 156 A, tensão elétrica de 22 V, velocidade de avanço de 6 cm/min., aporte térmico (HI – “Heat Input”) de 20,59, varetas classe ER70S-3, com gás de proteção argônio 99,99% de pureza, com passagem de fluido interno.

Condição 2 - Utilizado o processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) com corrente contínua e polaridade inversa (CC+), corrente elétrica de 98 A, tensão elétrica de 25 V, velocidade de avanço de 6 cm/min., aporte térmico (HI – “Heat Input”) de 22,05, eletrodo revestido classe E7018, com passagem de fluido interno.

Condição 3 - Utilizado os mesmos parâmetros do processo TIG acima, porém sem a passagem de fluido interno (soldagem convencional);

Condição 4 - Utilizados os mesmos parâmetros do processo Eletrodo Revestido acima, porém sem a passagem de fluido interno (soldagem convencional).

As variáveis do fluido no interior do tubo, como vazão, pressão e temperatura de entrada da água foram mantidas fixas. As variáveis do processo: intensidade de corrente elétrica e tensão elétrica foram registradas através de alicate amperímetro e voltímetro, respectivamente. Calculada a velocidade de avanço através da relação entre o comprimento da solda e o tempo gasto para sua realização.

Foi utilizado termopar tipo “K” (temperatura máxima de leitura: 1.300 °C), fixado com poliuretano (PU) na parede interna do tubo, sob as regiões soldadas, para as leituras das temperaturas, a fim de registrar as temperaturas máximas nas regiões sob as poças de fusão, nas quatro condições de soldagem apresentadas acima, Figura 2.



Figura 2: Taxa de resfriamento obtida com aquecimento em 3 pontos defasados 120° e passagem de fluido

Ensaio Não Destrutivos: Após a soldagem, 100% das juntas soldadas foram submetidas à inspeção visual e líquido penetrante (LP). Os ensaios de LP foram conduzidos de acordo com a norma ASME Section V [1] e por Inspetor Certificado.

Ensaio Mecânicos: Realizado ensaio de tração transversal e dureza em todas as soldas. Os ensaios foram realizados com base nas especificações de fabricação dos materiais e nas normas aplicáveis na qualificação dos procedimentos de soldagem, no caso as normas API 1104 [2] e ASME Seção IX [3]. A norma ASTM A370 [4] estabelece os métodos e definições para os ensaios mecânicos.

Exame Macrográfico e Ensaio de Dureza Rockwell C (HRC): realizado o exame macrográfico para identificar as regiões e extensão da zona termicamente afetada (ZTA), assim como a ocorrência de descontinuidades internas nas soldas. Um corpo de prova (CP) foi preparado para cada solda. As amostras foram cortadas, lixadas e atacadas com Nital 10% por cerca de 20 segundos. O ensaio de dureza Rockwell C (HRC) foi realizado com carga de 100 Kgf nos CPs de macrografia. As medições de dureza no metal de base, ZTA e poça de fusão foram realizadas na face do corte transversal a face da solda. A norma ASTM E 140-07 [5] foi utilizada para a conversão de dureza HRC para dureza Vickers (HV).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Análise Química

A Tabela 1 demonstra que, a composição química do tubo atendeu às exigências da norma API 5L para o material informado. O carbono equivalente (CE) foi calculado conforme indicado Equação 1 em 0,41%, próximo do limite máximo previsto para o Grau X-65, que é de 0,43%. O tubo foi escolhido para este trabalho, de forma que o CE estivesse próximo ao limite máximo da especificação, pois na soldagem, altos valores de CE implicam em uma maior susceptibilidade a formação de estruturas frágeis e trincas a frio.

Tabela 1: Composição Química dos Materiais de Base

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ELEMENTOS (%)								
Elemento/Amostra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Tubo	0,134	0,215	1,540	0,015	0,005	0,020	0,022	0,010
Norma API SPEC 5L	0,28 máx.	-	1,40 máx.	0,030 máx.	-	-	-	-

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ELEMENTOS (%)							
Elemento/Amostra	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	B
Tubo	0,021	0,003	< 0,002	0,037	< 0,001	0,052	< 0,001
Norma API SPEC 5L	-	-	-	-	-	-	-

2.2. Cálculo do Carbono Equivalente – CE (%)



$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (1)$$

$$CE_{IIW} = 0,134 + \frac{1,54}{6} + \frac{(0,020+0,022+0,052)}{5} + \frac{(0,010)}{15} \quad (2)$$

$$CE_{IIW} = 0,41\% \quad (3)$$

2.3. Parâmetros de Soldagem

- Posição de soldagem: 5F
- Processo usado: manual
- Cordões de solda sobre superfície livre (semelhante ao amantegamento)
- Vazão de fluido (água) no tubo: 5,3 l/min

2.4. Execução da Soldagem

Condição 1 - Utilizado o processo soldagem TIG (GTAW) com corrente contínua e polaridade direta (CC-), corrente elétrica de 156 A, tensão elétrica de 22 V, velocidade de avanço de 6 cm/min., aporte térmico (HI – “Heat Input”) de 20,59, varetas classe ER70S-3, com gás de proteção argônio 99,99% de pureza, com passagem de fluido interno.

Condição 2 - Utilizado o processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) com corrente contínua e polaridade inversa (CC+), corrente elétrica de 98 A, tensão elétrica de 25 V, velocidade de avanço de 6 cm/min., aporte térmico (HI – “Heat Input”) de 22,05, eletrodo revestido classe E7018, com passagem de fluido interno, Figura 3.



Figura 3: Primeiro passe de solda com eletrodo revestido e passagem de fluido

Condição 3 - Utilizado os mesmos parâmetros do processo TIG, porém sem a passagem de fluido interno (soldagem convencional);

Condição 4 - Utilizados os mesmos parâmetros do processo Eletrodo Revestido, porém sem a passagem de fluido interno (soldagem convencional).

Equação de Aporte Térmico (HI – “Heat Input”)

$$HI \text{ (KJ/cm)} = \eta \times \frac{\text{corrente (A)} \times \text{tensão (V)}}{\text{velocidade (cm/min)}} \quad (4)$$

Onde: η – eficiência de transferência (TIG = 60% e Eletrodo Revestido = 90%)

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados e o cálculo do aporte de calor (HI).

Tabela 2: Informações Sobre os Procedimentos de Soldagem

PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM					
Processo de Soldagem	Tipo de corrente / Polaridade	Tensão Elétrica (V)	Corrente Elétrica (A)	Velocidade (cm/min.)	Aporte Térmico (KJ/cm)
TIG	CC (-)	22	156	6	20,59
Eletrodo Revestido	CC (+)	25	98	6	22,05

2.4.1. Controle da Temperatura Durante a Soldagem

A Tabela 3 mostra que a temperatura do fluido interno ficou por volta de 20,4 °C. Desta forma, conclui-se, que durante os experimentos foi possível manter as faixas de temperatura do fluido pré-estabelecidas.

Tabela 3: Temperaturas Registradas Durante a Soldagem

REGISTRO DA TEMPERATURA MÁXIMA DURANTE A SOLDAGEM				
Localização/Processo	SEM FLUIDO		COM FLUIDO	
	Eletrodo Revestido	TIG	Eletrodo Revestido	TIG
Fluido Interno (°C)	-	-	20,4	20,4
Parede externa, adjacente a solda (°C)	450	440	410	390
Parede interna, sob a poça de fusão (°C)	594	594	509	500
$\Delta t_{250-100}$ (°C/s)	0,92		21,4	

Em relação a temperatura interna da parede do tubo, a Tabela 3 apresenta os máximos obtidos, e pode ser observado que:

A máxima temperatura interna da parede do tubo foi de 594 °C nos procedimentos com Eletrodo Revestido e TIG, ambos sem fluido, e 509 °C no procedimento com Eletrodo Revestido com fluido. A norma N-2163 [6] 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 todos os procedimentos, a temperatura interna máxima do tubo está abaixo da máxima especificada por norma, minimizando a possibilidade de perfuração durante a soldagem.

Em relação aos resultados da taxa de resfriamento ($\Delta t_{250-100}$), pode ser observado que:

A taxa de resfriamento para a condição sem fluido foi muito inferior à obtida com a presença do fluido no interior do tubo. Isto mostra o forte efeito de resfriamento provocado pelo fluido durante a soldagem em operação.

Os resultados permitem concluir que, sobre as temperaturas máximas obtidas e as taxas de resfriamento no interior do tubo, nos procedimentos realizados, não houve risco de perfuração durante a soldagem.

2.5. Ensaios Não Destrutivos

Os corpos de prova para ensaios, foram extraídos perpendicularmente aos cordões de solda.

Foram realizados: Ensaio Visual e Líquido Penetrante (Figura 4), estes não apresentaram evidências de descontinuidades. Os enchimentos com solda, foram considerados aprovados conforme os critérios de aceitação das normas ASME seção IX [3] e API 1104 [2].



Figura 4: Ensaio de líquido penetrante realizado no cordão de solda – processo SMAW

2.6. Macrografia

Para cada procedimento foram realizados 3 passes e 1 camada, com e sem a passagem de fluido. A penetração da zona de fusão (ZF) e zona afetada termicamente (ZTA) foi maior para o processo SMAW. Figura 5 e Figura 6.



Figura 5: Polimento e ataque com nital 10% para ensaio de macrografia

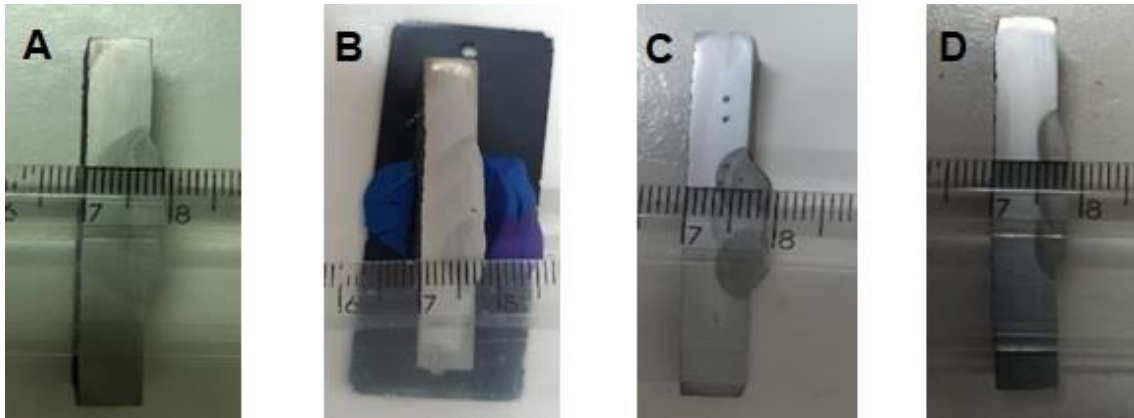


Figura 6: **A** - Eletrodo revestido sem fluxo, **B** - TIG sem fluxo, **C** - Eletrodo revestido com fluxo e **D** - TIG com fluxo

2.7. Micrografia

A microestrutura do metal de base (MB) é constituída de estrutura tipicamente hipoeutetóides ($C < 0,77\%$), composta por ferrita e perlita em proporções similares. ZF é constituída em sua maioria de ferrita e perlita alinhada.

As amostras de Eletrodo Revestido e TIG, com passagem de fluido, não apresentaram formação de fases frágeis (estrutura martensítica), Figura 7 e Figura 8.



Figura 7: Microestrutura do eletrodo revestido com passagem de fluido



Figura 8: Microestrutura do processo TIG com passagem de fluido

2.8. Ensaio de Dureza

Dureza Vickers: A Tabela 4 apresenta os resultados de dureza obtidos, o valor máximo da média de dureza encontrado foi de 302 HV, para a zona fundida (ZF) do procedimento com Eletrodo Revestido e passagem de fluido. Pode ser observado um acréscimo significativo na média de dureza tanto na ZF como na ZTA para todos os procedimentos em comparação ao metal de base utilizado (tubo). Os valores de dureza obtidos nas ZFs das 2 soldas também são bem superiores aos procedimentos de soldagem convencional, onde os consumíveis de soldagem utilizados (TIG e eletrodo revestido) apresentam dureza entre 180 e 220 HV.

Os resultados da dureza ratificam os valores obtidos nos ensaios de tração, Tabela 5, tendo sido observado um aumento da dureza acompanhado com um aumento do limite de resistência e queda da ductilidade.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de dureza

RESULTADOS ENSAIOS DE DUREZA				
	PROCESSO	Trecho	HV (10 Kgf)	
			Ensaio	API 1104
sem fluido	Metal de Base (MB)	Tubo	205	245 máx.
	Eletrodo Revestido	ZTA	202	350 máx.
		ZF	214	275 máx.
	TIG	ZTA	192	350 máx.
ZF		215	275 máx.	
com fluido	Eletrodo Revestido	ZTA	257	350 máx.
		ZF	302	275 máx.
	TIG	ZTA	236	350 máx.
		ZF	260	275 máx.

2.9. Ensaio de Tração

A Tabela 5 apresenta, de forma geral, uma relativa queda no alongamento da solda, quando comparado ao metal base, atribuído ao efeito do resfriamento do fluido. A soldagem com eletrodo revestido apresentou uma redução de alongamento mais elevada do que a permitida pela norma. Esta queda mais acentuada na ductilidade foi atribuída a maior penetração da poça de fusão e maior proximidade entre o fluido e a fonte de calor de soldagem, que proporcionou um aumento na taxa de resfriamento.

Tabela 5: Resultados dos Ensaio de Tração

RESULTADOS ENSAIOS DE TRAÇÃO								
	PROCESSO	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)		LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)		ALONGAMENTO (%)	REGIÃO FRATURA	
		Tubo	API SPEC 5L	Tubo	API SPEC 5L			
sem fluido	Metal de Base (MB)	523	450 mín.	610	535 mín.	30,0	20 mín.	MB
	Eletrodo Revestido	520		603				ZTA
	TIG	528		615		18,1	17 mín.	MB
com fluido	Eletrodo Revestido	510		620		11,3		ZTA
	TIG	515		618		14,8		MB

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

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

Os resultados mostraram que o risco de perfuração, durante a soldagem em operação, é mínimo para os parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho, pois a temperatura na parede interna do tubo (509 °C com fluido) ficou abaixo da temperatura máxima estabelecida por norma (PETROBRAS N-2163 [6]).

No entanto, a zona de fusão (ZF) e zona afetada termicamente (ZTA) tiveram maior penetração no metal de base para o processo SMAW.

Não foi observado o aparecimento de fases frágeis (estrutura martensítica) devido a taxa de resfriamento maior, contudo o resfriamento causado pelo fluido provocou o aumento da dureza na ZF e ZTA, e ainda reduziu o alongamento no ensaio de tração. Este aumento ficou mais evidente no processo de soldagem com Eletrodo Revestido.

Com os resultados obtidos e de acordo com os aportes térmicos empregados, é possível verificar que o processo de soldagem SMAW oferece maior risco de perfuração e está mais susceptível a formação de fases frágeis quanto comparado com o processo de soldagem GTAW.

AGRADECIMENTOS



Os autores agradecem a direção da UNISANTA por todo apoio recebido durante a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] American Society for Mechanical Engineers. ASME Section V: non destructive examination. USA: ASME; 2007. 304 p.
- [2] American Petroleum Institute. API 1104: standard for welding pipelines and related facilities. Washington: API; 2013.
- [3] American Society for Mechanical Engineers. ASME Section IX: qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators. USA: ASME; 2019.
- [4] American Society for Testing and Materials. ASTM A 370: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. West Conshohocken: ASTM; 2008. 47 p.
- [5] American Society for Testing and Materials. ASTM E 140-07: Hardness conversion tables for metals.
- [6] Petrobras. N-2163: soldagem e trepanação em equipamentos, tubulações industriais e dutos em operação. Rio de Janeiro: Petrobras, 2021.