



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AVALIAÇÃO DO PROCESSO GMAW COM TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO CONTROLADO (STT) APLICADO NA SOLDAGEM CIRCUNFERENCIAL MECANIZADA

Lucas Alves do Nascimento, eng.lucasalves@gmail.com¹
Louriel Oliveira Vilarinho, vilarinho@mecanica.ufu.br¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica Uberlândia, MG, Brasil.

Resumo: A grande extensão territorial brasileira e as constantes previsões de crescimento na demanda pelo consumo de petróleo e gás criaram um grande desafio nacional para a expansão rápida e confiável de gasodutos. A necessidade de construção e recuperação de novos dutos exigem processos de soldagem de alta produtividade, confiáveis e que produzam cordões de solda de qualidade, em detrimento do processo eletrodo revestido, atualmente o mais utilizado na união de dutos. Portanto, este trabalho apresenta o estudo da soldagem relacionada à união de dutos por soldagem circunferencial em meia cana de dutos em aço carbono (API 5L, 2012) de 8" de diâmetro nominal e 8,0 mm de espessura. As soldagens foram realizadas em progressão descendente por meio de dispositivo de deslocamento orbital (soldagem mecanizada), utilizando-se arame ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro e protegido pela mistura de Ar+25%CO₂. O material foi depositado em junta de topo com chanfro em V e bisel de 15°, 1 mm de altura de nariz, 3mm de abertura de raiz e sem cobre-junta. Para a junta proposta avaliou-se o processo GMAW com transferência metálica por curto-circuito em modo derivativo utilizando fonte comercial STT (Surface Tension Transfer). Neste contexto, foram investigados parâmetros de soldagem na junta soldada proposta em dois passes (um de raiz e outro de enchimento/acabamento). As análises dos cordões de soldas foram obtidas por meio da inspeção visual e ensaios mecânicos voltados para a sua qualificação (tração uniaxial, dobramento de face e raiz, nick-break, ensaio de impacto charpy, macrografia e perfil de dureza). Os resultados mostram que foi possível obter um conjunto de parâmetros robusto para a junta proposta, em função dos critérios de aceitabilidade da Norma API 1104 (2010).

Palavras-chave: Soldagem de dutos; Transferência Metálica Controlada; STT; Progressão descendente

1. INTRODUÇÃO

A grande extensão territorial brasileira e as constantes previsões de crescimento na demanda pelo consumo de petróleo e gás criaram um grande desafio nacional para a expansão rápida e confiável de gasodutos. A necessidade de construção e recuperação de novos dutos exigem processos de soldagem de alta produtividade, confiáveis e que produzam cordões de solda de qualidade, em detrimento do processo eletrodo revestido, atualmente o mais utilizado na união de dutos. Assim, o processo GMAW (Gas Metal Arc Welding) passa a ser visto com opção real em função da sua versatilidade e produtividade (Acuña *et al.* (2013)), sendo que novas fontes e técnicas de controle avançadas têm sido desenvolvidas visando melhorar a transferência metálica, proporcionar menor aporte térmico para a peça soldada e diminuir respingos e fumos (Vargas, 2011).

Neste contexto, o processo GMAW derivativo utilizado na versão de transferência do metal em curto-circuito (também conhecido como curto-circuito controlado) tornou-se uma tendência na soldagem de dutos e tubulações. Tais fontes controladas adotam a ideia de sinergia (autoregulação a partir de um conjunto de parâmetros pré-determinados) e ainda requerem o ajuste de parâmetros que antes não existiam para o processo GMAW convencional.

Dentre as várias fontes controladas comerciais que utilizam a transferência por curto-circuito, pode-se citar a patente de 1994 da empresa Lincoln Electric com a tecnologia STT (Surface Tension Transfer), que foi desenvolvida prometendo um avançado controle do processo de curto-circuito ao utilizar uma fonte inversora de alta potência para produzir uma solda de alta qualidade com menos respingos, radiação de calor e fumos.

A tecnologia STT faz uso da eletrônica para controlar a corrente durante todo o ciclo de soldagem. Este processo GMAW derivativo não tem características de fonte corrente constante e nem de fonte de tensão constante. Em vez

disso, a fonte de alimentação de corrente ajusta automaticamente para os requisitos instantâneos de calor do arco e controla a corrente de soldagem, independentemente da velocidade de alimentação (Nadzam, 2014).

A Figura 1a apresenta o formato real de onda de tensão e corrente característicos do processo adquiridos neste trabalho. Já a Figura 1b apresenta o comportamento real da gota na tecnologia STT e a Figura 1c as posições de soldagem e detalhe superficial dos cordões.

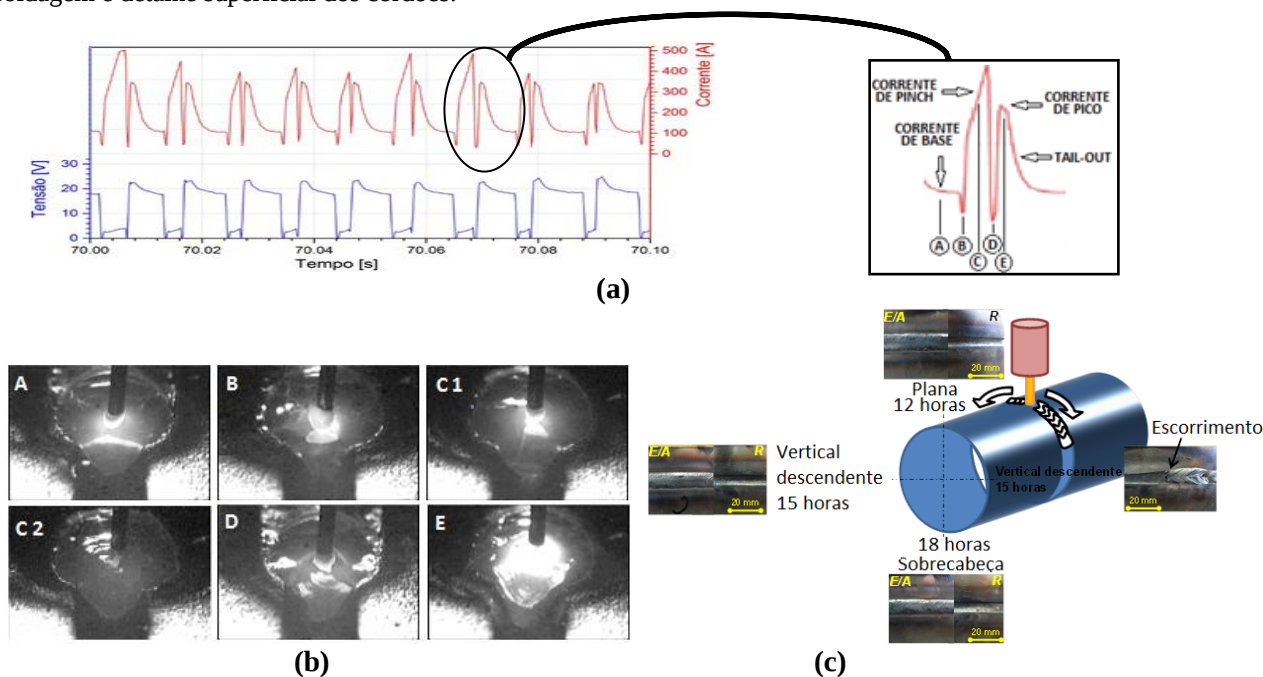


Figura 1. (a) Formatos reais de onda de tensão e corrente da tecnologia STT; (b) Comportamentos reais da gota na tecnologia STT (ADAPTADO DE Mota *et al.* (2014)); (c) Posições de soldagem e detalhe superficial dos cordões, demonstrando o escoamento da posição 15 horas e aspecto superficial dos cordões em ambos os passes na posição 5G (E/A – Enchimento/Acabamento e R – Raiz).

É possível observar na Figura A (Fase A), que o ciclo de transferência é iniciado com a gota se formando na ponta do arame-eletrodo, controlada pelo parâmetro denominado corrente de base (Ib). Logo em seguida, na Fase B, a gota aumenta de tamanho causando o contato com a poça de fusão. Neste momento a corrente é reduzida diminuindo o risco de repulsão da gota e respingos (Scotti *et al.* (2008)), de modo que as forças de tensão superficial possa começar a transferir a gota à poça (Nadzam, 2014). Já em curto-circuito (Fase C1 e C2), é aplicada uma corrente de Pinch, de acordo com a curva pré-determinada, de forma a acelerar o processo devido a atuação da força eletromagnética (“formação do empescoçamento”). No momento em que ocorre a separação da gota (Fase D), a corrente é reduzida pouco antes impedindo grandes quantidades de respingos (Scotti *et al.* (2008)). Por fim, na Fase E, é aplicada uma corrente de pico (Ip) para reestabelecer o arco (Nadzam, 2014). A taxa de descida entre a corrente de pico e a de base, durante a formação da gota, é controlada pelo parâmetro Tail-out. Após o término do decaimento da corrente o processo se inicia com a formação de uma nova gota.

Entretanto, a utilização do processo STT na posição 5G torna-se complicada devido à mudança no comportamento das forças que atuam sobre a gota de metal fundido com a variação contínua da orientação da tocha (Meneses, 2013). Na soldagem de dutos as posições críticas são a plana (12 horas), vertical (15 horas) e sobrecabeça (18 horas), pois, em cada uma destas posições as forças que influenciam no destacamento da gota e na configuração da poça de fusão agem de formas diferentes, sendo a força da gravidade a de maior influência (Figura 1c).

A maior limitação para imposição de maiores valores de velocidade de alimentação/corrente é o escoamento da poça na posição 15 horas. Por outro lado, na posição sobrecabeça a gravidade age no sentido de dificultar o destacamento da gota e de fazer a queda do metal fundido (COSTA, 2011). Aliado a estes fatos, outros fatores dificultam a soldagem fora de posição, dentre eles pode-se citar, a utilização de chanfro estreito (*narrow gap*) e a não utilização de cobre junta. Estes fatos demonstram a grande dificuldade da soldagem fora de posição utilizando um único conjunto de parâmetros.

Portanto, este trabalho tem como objetivo o estudo da soldagem circunferencial mecanizada relacionada à união de dutos em aço carbono (API 5L, 2012) de 8” de diâmetro nominal e 8,0 mm de espessura, fazendo uso de um único conjunto de parâmetros, utilizando o processo GMAW com transferência metálica por curto-circuito controlado, especificamente o processo derivativo com tecnologia STT, sem a utilização de cobre-junta e conduzidos em chanfro estreito. São apresentados os parâmetros de soldagem encontrados para a confecção da junta soldada em dois passes (raiz e enchimento), assim como os ensaios mecânicos voltados para sua qualificação (tração uniaxial, dobramento de face e raiz, nick break, impacto, macrografia, micrografia e perfil de dureza).

2. METODOLOGIA

A bancada experimental montada e a fonte de soldagem utilizada para a execução dos testes são apresentadas na Figura 2. Para a execução do processo GMAW curto-circuito-controlado, utilizou-se fonte de soldagem eletrônica inversora de multiprocessos da fabricante Lincoln Electric de modelo Power Wave 450/STT (Electric, 2014).

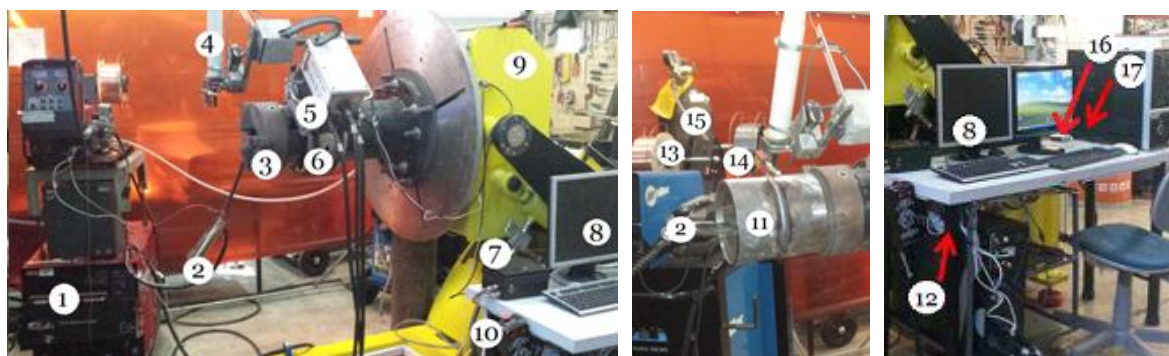


Figura 2. Bancada experimental utilizada, sendo: 1. Fonte de soldagem; 2. Cabo terra da fonte de soldagem (aterramento em ambos os lados do tubo); 3. Suporte do tubo teste (“castanha”); 4. Tocha de soldagem; 5. Carrinho de movimentação da tocha (Tartilope V4); 6. Cinta de suporte para movimentação angular do carrinho. 7. Sistema de controle de ajuste automático da DBCP; 8. Monitor de visualização dos parâmetros de movimentação da tocha; 9. Mesa posicionadora; 10. Controle manual de manipulação da tocha; 11. Tubo teste; 12. Sistema de controle do manipulador da tocha (Tartilope); 13. Arame ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro; 14. Sensor *laser*; 15. Cilindro de gás; 16. Placa de aquisição; 17. Sistema de aquisição de dados.

Para a investigação dos parâmetros foi utilizado como metal de adição o arame-eletrodo AWS ER70S-6 com 1,2mm de diâmetro e a mistura Ar+25%CO₂ como gás de proteção com vazão de 15 l/min. Não foi possível obter uma condição robusta para o gás CO₂ puro, pois a tendência ao escorrimento na posição vertical descendente foi muito alta.

Foi recebido e utilizado o duto API 5L X65 preparado com chanfro estreito (bisel: 15°). A análise química do metal de base (API 5L X65) utilizado neste estudo é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do metal de utilizado em porcentagem (%).

B	Sn	Ca	Co	S	W	Ni	Ti	Cu
0,0002	0,0012	0,0014	0,0025	0,0033	0,0053	0,0129	0,0171	0,0175
P	V	Al	C	Nb	Si	Cr	Mo	Mn
0,0184	0,0253	0,031	0,0526	0,0627	0,1866	0,2075	0,2145	1,8165

Destaca-se nessa tabela, o baixo teor de carbono e o alto teor de manganês em relação aos requisitos químicos indicados na API 5L, 2012 para o aço API 5L X65. Com relação ao carbono equivalente (CE) do material utilizado, encontrou-se CE(Pcm) = 0,179 e CE(IIW) = 0,447, lembrando-se que quando o teor de carbono for menor ou igual a 0,12% deve-se utilizar o CE(Pcm). A partir desses números, é possível inferir que o material possui boa soldabilidade.

A montagem dos tubos de teste seguiu o esquema apresentado na Figura 3. Como sistema de fixação dos tubos, utilizou-se pequenos dispositivos (“cachorros”), com 15 mm de comprimento, fabricados a partir de cantoneiras de 1”x1/8”, posicionados em intervalos regulares internamente aos tubos para garantir que a junta não se altere ao longo da soldagem (Figura 3c).

As soldagens foram conduzidas de forma mecanizada utilizando o manipulador de tocha da marca Tartilope V4, executadas em progressão descendente e em dois passes (um de raiz e outro de enchimento/acabamento). Como forma de facilitar a execução de soldagens de campo, cada junta soldada foi executada com o mesmo processo/fonte, ou seja, tanto a raiz, quanto o enchimento foram feitos com este processo e, ambas com transferência por curto-circuito.

A realização dos passes em progressão descendente foram feitas em duas etapas. A primeira começa no ponto mais alto do tubo, às 12 horas (0°), passando pela posição vertical às 15 horas (90°) e termina no ponto mais baixo, às 6 horas (180°), por um lado, conforme anteriormente apresentado na Figura 1c. A segunda etapa do processo começa novamente às 12 horas e o cordão é depositado em volta do outro lado do tubo até se encontrar com o primeiro cordão, às 6 horas.

O passe de raiz é o primeiro a ser depositado na soldagem orbital. Após a execução do passe de raiz é necessário aguardar que o tubo teste entre em equilíbrio térmico com o ambiente para realização do passe de enchimento. O tempo entre passes foi de aproximadamente 30 minutos. Além disso, deve-se remover a escória e possíveis óxidos formados durante o período de esfriamento do duto. Para tanto, optou-se por escovar o cordão de solda entre passes com escova de aço (modelo EN 1083 para 9000 rpm) acoplada em uma esmerilhadeira. Para silicatos que por ventura não puderam ser removidos, devido estarem fortemente aderidos ao metal de base, utilizou-se de picadeira.

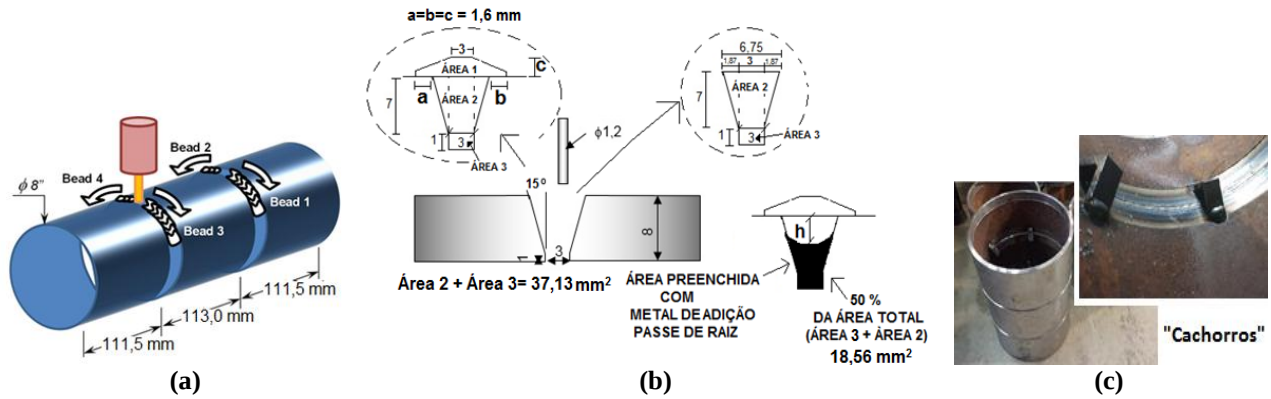


Figura 3. Esquema de montagem do tubo teste (unidades em mm). (a) Dimensões do corpo de prova; (b) representação da geometria do chanfro utilizado sem Hi/Low; (c) Corpo de prova montado.

A necessidade de manter a mesma taxa de deposição de material de adição na junta, se fez necessário estabelecer uma relação entre a velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem. Segundo Magalhães (2012), conhecendo-se o diâmetro do arame, a velocidade de alimentação, e a seção transversal desejada a ser soldada, pôde-se determinar a velocidade de soldagem para o passe de raiz.

$$V_s = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot A_s} V_a \quad (1)$$

Onde, “D” é o diâmetro do arame, “As” é a área da seção transversal do chanfro, “Va” é a velocidade de alimentação e “Vs” a velocidade de soldagem.

Ao final de cada solda do passe de raiz é analisado se houve penetração na raiz conforme norma API 1104 (2010) e mensura-se a distância entre a superfície da raiz e a superfície da face do duto. Este valor servirá de entrada para o cálculo da velocidade de soldagem a ser utilizada no passe de enchimento. Para o cálculo da velocidade de soldagem no passe de enchimento é necessário determinar a nova área a ser preenchida (As) por meio das Equações 2,3,4 e 5 e, em seguida aplicar a Eq. 1, novamente. A Figura 3b apresenta a geometria do chanfro e algumas incógnitas e definições utilizadas nas equações. É de saber que a velocidade de soldagem calculada por meio da Eq. 1 necessita de correção, pois, a velocidade parametrizada no sistema de controle (console) do Tartilope V4 não é a velocidade real, portanto, deve-se dividir o valor parametrizado no console por 1,277 (fator de calibração) para termos a velocidade real de deslocamento do manipulador da tocha.

$$A_s = \text{Área}(1) + Ah \quad (2)$$

$$\text{Área}(1) = \frac{(B+b) \cdot h}{2} = \frac{(9,95+3) \cdot 1,6}{2} = 10,36 \text{ mm}^2 \quad (3)$$

$$Ah = A_s = \frac{(B+b) \cdot h}{2} = \frac{(6,75+b) \cdot h}{2} \quad (4)$$

$$b = -(0,536 \cdot h) + 6,751 \quad (5)$$

Ressalta-se que os valores de velocidade de soldagem calculados serviram de referência, mas foram modificadas no decorrer das soldagens em detrimento do comportamento da poça de fusão (escorrimientos), geometria da raiz para o passe de enchimento e das respostas para os valores de corrente durante os ensaios.

Além do ajuste da relação V_a/V_s destacado na Eq.1, a frequência de oscilação da tocha também deve ser calculada durante o processo de execução da soldagem. A frequência “f” de oscilação da tocha, apresentado na Eq. 6, é função da velocidade de soldagem (V_s) e do comprimento de onda do tecimento (λ). Deve-se ressaltar que a frequência de oscilação da tocha normalmente é limitada pelo sistema orbital mecanizado em função da amplitude de tecimento e velocidade de soldagem. Desta forma, se o resultado da Eq. 6 for maior que a frequência limite do equipamento, o valor limite disponibilizado pelo sistema de controle do equipamento deve ser adotado. Além do mais, o comprimento de onda do tecimento (λ) foi adotado de 1,6 mm (AWS D10.12 (ANSI/AWS, 1989), uma vez que a API 1104 (2010) não menciona.

$$f \text{ (Hz)} = \frac{V_s}{\lambda} \cdot \frac{10}{60} \quad (6)$$

As soldagens foram instrumentadas, em conformidade com a ISO 17662 (2005), com sistema de aquisição de sinais de corrente e tensão desenvolvido por Machado, 2012, onde os valores obtidos para cada um dos passes foram tratados pelo software desenvolvido em Matlab, denominado Curto 3, dedicado do Laprosolda. Foi desenvolvido também um software em linguagem de programação Labview® para processamento dos dados, disparo automático e sincronizado entre o sistema de aquisição de dados e os equipamentos envolvidos (Fonte de soldagem e Tartilope V4).

Não foi elaborado um planejamento experimental devido à grande interação entre os parâmetros. Assim, os ensaios foram realizados com base na experiência da influência de cada parâmetro do processo no resultado final do cordão.

2.1. Ensaios Mecânicos

A Tabela 2 apresenta os ensaios mecânicos requeridos com base nos requisitos da API 1104 (2010) e discutidos entre a equipe de trabalho. Os corpos de prova (CP) foram retirados dos tubos soldados conforme a mesma norma (Figura 4).

Tabela 2. Ensaios mecânicos executados e suas respectivas quantidades e localizações.

Ensaio	Quantidade de Corpos de Prova (CP)
Metalografia	3 CP's, um para cada posição: 12 horas, 15 horas e 18 horas
Dureza	3 CP's, um para cada posição: 12 horas, 15 horas e 18 horas
Tração uniaxial	2 CP's prismáticos transversais a solda
Dobramento	4 CP's: 2 de face e 2 de raiz
Nick Break	2 CP's: um em cada quadrante
Charpy	3 CP's no quadrante superior e 3 CP's no quadrante inferior

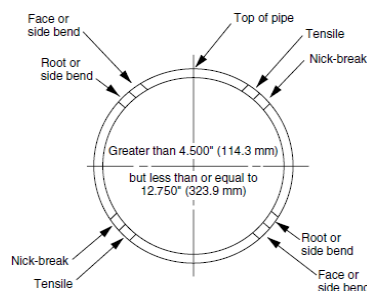


Figura 4. Posição de retirada dos corpos de prova (API 1104, 2010).

Os ensaios de dureza foram realizados em microindentador Digital Microhardness Tester HVS-1000, com penetrador de piramidal de diamante de 136° de conicidade. As medidas foram realizadas com a movimentação do corpo de prova sobre a bancada do aparelho, com a observação por meio de lente de ampliação de 100 vezes para localizar as regiões. Foi utilizada uma carga de 4,9 N em 20 segundos de tempo de aplicação. A tomada da dureza foi realizada por meio da observação da impressão no corpo de prova por uma lente de ampliação de 400 vezes. Onze medidas foram tomadas na face superior dos corpos de prova a 2 mm do limite da face e onze medidas na face inferior a 2 mm do limite da raiz, em conformidade com as normas ISO 9015-2 (2003) e ISO 6507-1 (2005). De acordo com a Tabela 2 desta norma foi respeitada a distância entre indentações de 0,7 mm para ensaios com HV 5.

Para os ensaios de tração uniaxial e dobramento, utilizou-se máquina universal de ensaios instrumentada da marca Shimadzu, modelo Autograph AG-X, com capacidade de 300 kN, controlada por meio de software Trapezium X, do mesmo fabricante. A aplicação da força de tração sobre o corpo de prova deve ser uniforme e contínuo.

Para o ensaio de charpy, utilizou-se equipamento Losenhauen com capacidade de 217 ft-lbf (295 J), sendo o entalhe feito no corpo de prova de tal forma que a propagação da trinca ocorra paralelamente ao eixo do cordão soldado, conforme visto na Figura 5. As dimensões dos corpos de prova (CP's) foram do tipo *sub-size*, em função da espessura do tubo ser 8,0 mm, menor que os 10 mm requeridos para os CP's *full-size* especificados na ASTM A370-12 (CP *full-size* de dimensões iguais a 10 x 10 x 55 mm).

Destaca-se que a API 1104 (2010) requer mínimo de 80% da espessura de parede do tubo, o que seria 6,4 mm, neste caso. Assim, num primeiro momento esta foi a mínima espessura buscada. Entretanto, ao se observar a própria ASTM A370-12 e a ASTM E23-12c, os valores indicados para os CP's *sub-size* são 2,5, 5,0 ou 7,5 mm (sendo as duas outras dimensões 10 e 55 mm). Assim, neste caso, o ideal seria um CP de 7,5 mm, que estaria em conformidade com todas estas normas (Figura 5).

Entretanto, esta dimensão não foi possível de ser obtida, pois a raiz foi usinada para alinhar os tubos, em função de desvio de circularidade, além do efeito da própria curvatura do tubo. Desta forma, optou-se por seguir as recomendações da API 1104 (2010) (CP de 6,4 x 10 x 55 mm) quando possível. Para o corpo de prova *sub-size* de 6,4 mm, o requerimento do ensaio Charpy no presente trabalho é de 25,6 J @ -12,2 °C, o que equivale a 40 J @ 0 °C. Assim, para se atingir a esta temperatura final de -12,2 °C na amostra, utilizou-se uma mistura de monoetilenoglicol, álcool etílico e água.

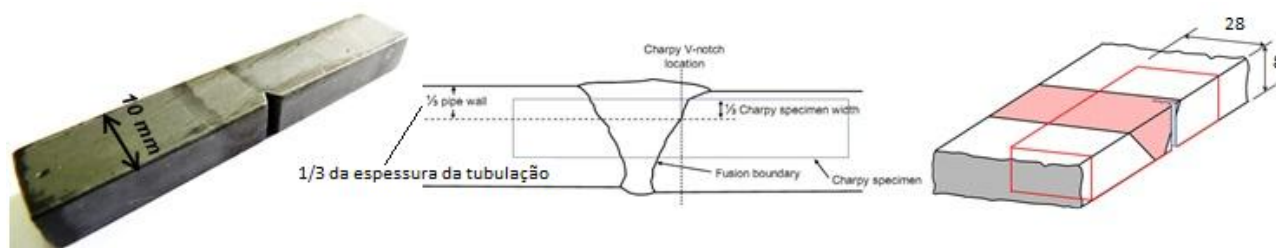


Figura 5. Detalhe dos corpos de prova para ensaio de impacto Charpy com base nas normas API 1104:2010 (meio) e ISO 15653:2010 (direita), e exemplo CP (esquerda).

E, por fim, as micrografias foram realizadas, em todos os pontos indicados no ensaio de perfil de dureza (Figura 10), por meio de microscopia óptica em microscópio Olympus BX41M com aumento de 400 e 100 vezes nas soldas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Determinação dos parâmetros para o passe de raiz

A condição inicial para o passe de raiz foi estabelecida com base em estudos por Vilarinho *et al.* (2014), no qual os autores deste artigo tem participação ativa. Os parâmetros utilizados durante as soldagens são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem definidos por Vilarinho *et al.* (2014) para o passe de raiz no processo derivativo (STT).

Velocidade de alimentação (m/min)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Frequência de tecimento (Hz)	Amplitude de tecimento (mm)	Ip (A)	Ib (A)	Tailout	Burnback Time (s)
5,75	35,0*	3,6	3 (±1,5)	350	130	10	0,03

*A velocidade de soldagem parametrizada no console do Tartilope foi de 45 cm/min, considerando o fator de calibração.

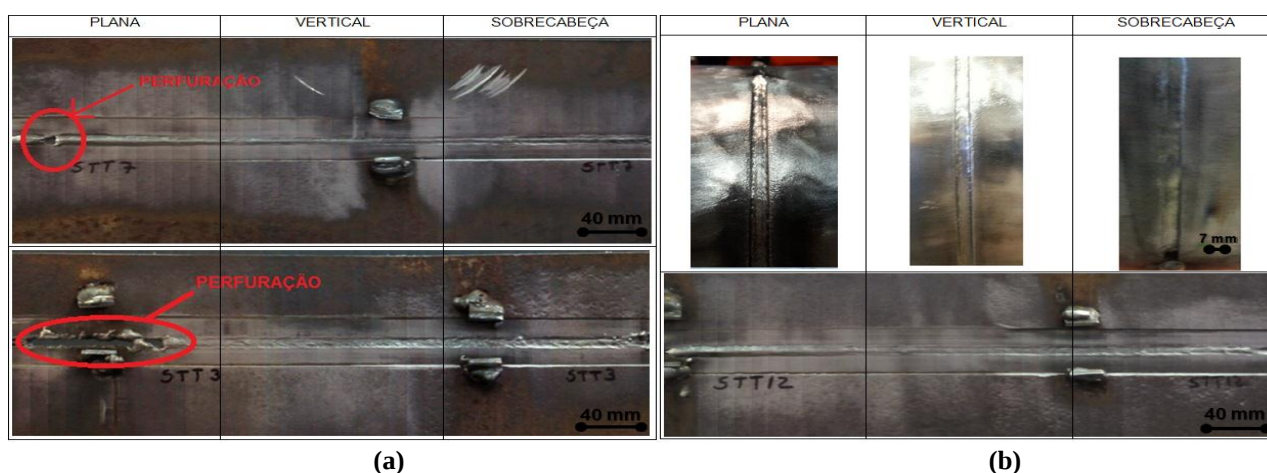


Figura 6. (a) Perfuração inicial da raiz para dois testes preliminares (STT3 e STT7) utilizando-se o processo derivativo (STT); (b) Aspecto visual do cordão de solda para o passe de raiz executado entortando o arame em 3 mm para o Teste STT12.¹

¹ Apesar dos cordões de solda serem circulares (meia cana de tubulação) as imagens serão apresentadas no formato de imagens planificadas concentrando as três posições de soldagem em uma única imagem. A técnica de planificação aqui aplicada é descrita detalhadamente em Nascimento, 2015 e foi desenvolvida por este autor.

Foram executadas no total 14 soldas com os mesmos parâmetros para verificar a robustez e todos os cordões de solda foram reproduzidos com facilidade. Entretanto, nas primeiras soldas ocorreu a perfuração da raiz no início do cordão, conforme pode ser visto na Figura 6a.

Afim de sanar este problema para configuração de junta proposta adotou-se a boa prática de entortar a ponta do arame em 3 mm formando um ângulo de 90° antes de iniciar os testes. A técnica se mostrou eficiente, a abertura do arco ocorreu de maneira suave e, não apresentou perfurações na raiz. A Figura 6b apresenta o cordão de solda para o passe de raiz executado com este procedimento.

Assim, o conjunto de parâmetros encontrado está apto em um primeiro momento para a aplicação desta pesquisa, pois a solda está de acordo com as exigências de inspeção visual da API 1104 (2010), estando livre de trincas, mordeduras e penetração inadequada. A penetração na posição plana, vertical e sobrecabeça para a solda STT12 foram respectivamente: 1,60 mm; 0,20 mm e 0,10 mm. Nas posições plana e vertical do passe de raiz conseguiu-se aproximadamente 60% de preenchimento da junta, já para a posição sobrecabeça o preenchimento foi de aproximadamente 70% da junta soldada. É perceptível, também, uma razoável concavidade na parte superior do cordão e que favorece a deposição do passe seguinte.

Os valores de tensão média, tensão RMS, corrente média, e corrente RMS foram respectivamente 15,4 V; 17,4 V; 220 A e 246 A.

A análise por macrografia do passe de raiz será realizada em conjunto com o passe de enchimento.

3.2. Determinação dos parâmetros para o passe de enchimento

Os parâmetros utilizados na execução dos passes de enchimento assim como os valores medidos de corrente média (I_m), tensão média $V(m)$, corrente RMS (I_{rms}) e tensão RMS (V_{rms}) e Índice Vilarinho de Regularidade (Machado, 2013) são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros utilizados nos passes de enchimento do processo derivativo (STT).

Teste	Identificação da amostra	Va (m/min)	Vs** (cm/min)	Inclinação da tocha (°)	I_m	I_{rms}	V_m	V_{rms}	IVcc	Relação Va/Vs	IVcc
					(A)	(A)	(V)	(V)			
1	STT11	4,5	23,5	0	196	226	15,1	17,1	0,98	19,15	0,98
2	STT3	4,5	28,2	0	188	217	15,3	17,2	0,92	15,96	0,92
3	STT1	4,5	21,5	0	183	212	15,8	17,7	1,26	20,93	1,26
4	STT5	4,2	28,2	0	175	206	16	17,8	1,02	14,89	1,02
5	STT4	4,3	28,2	0	189	217	15,3	17,3	0,47	15,25	0,47
6	STT12	4,3	21,5	0	177	204	15,9	17,8	1,38	20,00	1,38
7	STT6	4,4	28,2	0	192	221	15	17	0,87	15,60	0,87
8	STT7	4,4	28,2	0	192	222	15,1	17,1	1,31	15,60	1,31
9	STT8	4,4	27	0	181	208	15,6	17,5	0,9	16,30	0,90
10	STT14	4,4	22,7	0	187	216	15,5	17,5	1,22	19,38	1,22
11	STT13	4,4	22,3	0	191	221	15,2	17,1	1,12	19,73	1,12
12	STT16	4,4	22,3	0	195	223	15,3	17,5	1,03	19,73	1,03
13	STT15	4,4	22,3	0	187	216	15,5	17,5	1,22	19,73	1,22
14	STT18	4,4	22,3	0	203	235	14,7	16,9	0,77	19,73	0,77
15	STT17	4,4	22,3	0	204	236	14,6	16,8	0,76	19,73	0,77
16	STT19	4,4	22,3	15	203	234	14,9	17,1	0,88	19,73	0,88
17	STT20	4,4	22,3	15	200	229	15,2	17,3	0,74	19,73	0,74

*Os parâmetros amplitude do tecimento = 4 mm (+/- 2 mm), frequência de tecimento = 2,5 Hz, DBCP = 12 mm, I_b = 100 A, I_p = 320 A e T_{out} = 8 foram mantidos constantes.

**A velocidade de soldagem parametrizada no console do Tartilope é dada por $V_s * 1,277$.

A estratégia adotada aqui foi de aumentar a velocidade de alimentação e produzir uma resposta de corrente eficaz maior que 198 A com aproximadamente 18,4Vrms, uma vez que estes resultados mínimos colaboraram para o aparecimento de falta de fusão lateral em análises macrográficas realizadas por Vilarinho *et al.* (2014).

A relação Va/Vs que proporcionou a execução de um cordão de solda sem escorrimientos e com resposta em corrente satisfatória foi de 19,73 na velocidade de alimentação 4,4 m/min para o passe de enchimento. Para relação Va/Vs acima de 19,73 ocorreram escorrimientos na posição vertical e na transição entre a posição plana e vertical. Para relação Va/Vs menores que 19,73 podem ocorrer escorrimiento na posição sobrecabeça. Portanto, conforme mostrado na Tabela 4 a relação entre Va/Vs que poderia contemplar uma possível solda sem escorrimiento estaria entre 19,38 e 20,00.

Nos Testes 3 e 6 os escorrimientos foram na transição entre a posição plana e vertical, já nos Testes 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9 e 10 os escorrimientos se apresentaram na transição entre a posição vertical e sobrecabeça e na sobrecabeça. O Teste 11 não apresentou escorrimientos, mas apresentou erro de execução. Já o Teste 12 executado com os mesmos parâmetros do Teste 11 pode confirmar a robustez e o não escorrimiento desse esse parâmetro.

Ambos os cordões (raiz e enchimento) dos Testes 13, 14, 15, 16 e 17 executados nos ensaios de enchimento estão livres de trincas, mordeduras, e portanto, à primeira vista de acordo com a API 1104 (2010). Os Testes 16 e 17 foram realizados com a tocha inclinada em 15° puxando e com os mesmos parâmetros dos Testes 13, 14 e 15.

Dessa forma, os Testes 13, 14 e 17 foram examinados macrograficamente, pois, à primeira vista estão em conformidade com a API 1104 (2010). O Teste 12 também foi analisado macrograficamente, embora, sua execução deva-se apenas para confirmação do resultado do Teste 11.

Destaca-se que os ensaios apresentados aqui são os mais significativos e outros ensaios com os mesmos parâmetros foram executados para confirmar os resultados.

Foram realizadas também medidas da geometria do cordão para os testes 1, 2 e 3 e, à medida que diminui a velocidade de soldagem e mantém o mesmo conjunto de parâmetros o cordão se alarga e o reforço aumenta nas três posições.

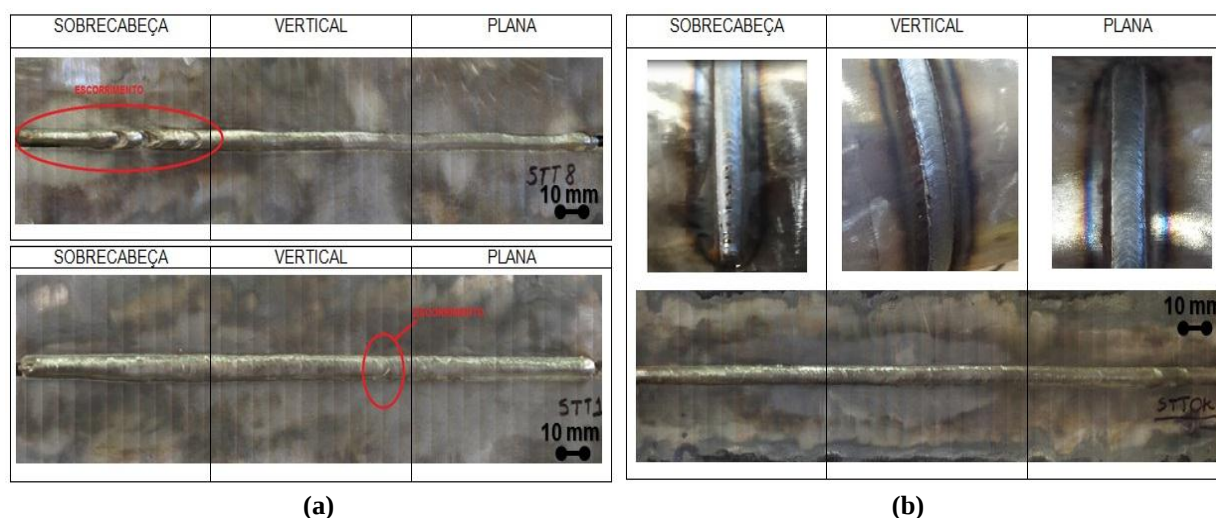


Figura 7. (a) Exemplo de cordão de solda com $Va/Vs < 20,00$ (Escorrimiento vertical/sobrecabeça) e $Va/Vs \geq 20,00$ (Escorrimiento plana/vertical); (b) Cordão de solda sem escorrimientos $Va/Vs = 19,73$.¹

Nos Testes 2 e 7 nota-se que no Teste 2, embora possuindo uma maior velocidade de alimentação, apresentou menor corrente de soldagem se comparado ao Teste 7. Isto se deve ao fato da maior regularidade do Teste 7 ($IV_{cc} = 0,87$ contra 0,92 do Teste 2), ou seja, extinções e reignições mais suaves do arco elétrico. Nos testes em que houveram escorrimientos, a poça de fusão pode ter prolongado o tempo de curto-circuito durante o seu acúmulo ou causado a falha de reignição do arco devido a escorrimientos momentâneos fora de posição, interferindo assim nos resultados de corrente e tensão. Como outro exemplo dessa observação, tem-se os Testes 2 e 5, que possuem correntes próximas, mas verifica-se que o IV_{cc} é diferente, sendo o IV_{cc} do Teste 2 aproximadamente o dobro do Teste 5, justificando a maior regularidade do Teste 5, o que levou a uma corrente igual para uma menor velocidade de alimentação.

3.3. Resultados dos Ensaios Mecânicos

Embora o processo derivativo (STT) aparenta ter uma boa qualidade superficial dos cordões produzidos, as macrografias revelaram imperfeições internas.

A Figura 8 apresenta as macrografias obtidas para cada uma das posições de soldagem (12 horas – plana, 15 horas – vertical descendente e 18 horas – sobrecabeça) realizando-se cortes transversais nos cordões de solda e com embutimento, lixamento (até lixa #1200) e ataque com Nital a 2%. Por estas imagens, é possível visualizar que somente no teste 17 não apresentou defeito em nenhuma das três posições analisadas (12, 15 e 18 horas), estando livre de falta de fusão, falta de penetração, mordeduras e portanto em conformidade com a API 1104 (2010) e apto aos ensaios mecânicos. Nota-se na posição sobrecabeça um leve excesso de reforço, mas inevitável devido a soldagem ser realizada com um único conjunto de parâmetros. Conforme API 1104 (2010), o reforço é considerado excessivo quando possui

mais de 3 mm na face e mais de 2 mm na raiz, como garantia da qualidade da produção de junta soldada. Portanto, na posição sobrecabeça, uma opção seria o esmerilhamento desse reforço para soldas de campo.

No Teste 14, na posição vertical constata-se a presença de um (1) poro. Entretanto, como descrito no Item 9.3.9.2 da API 1104 (2010) e observado no critério de aceitabilidade da API 1104 (2010), a porosidade, para ser considerada um defeito, deve exceder individualmente a 3mm. Neste caso, percebe-se visualmente e por meio de mensuração utilizando o ImageJ que o poro possui dimensão de 0,7 mm e, portanto, não é considerado um defeito para esta seção transversal. Por não realizar ensaio de ultrassom, toda imperfeição será considerada um defeito nas macrografias que apresentarem falta de fusão lateral ou entre passes, independente da sua extensão, sendo o cordão de solda descartado, uma vez que, nos ensaios mecânicos a amostra possa ser reprovada.

Destaca-se nas imagens da Figura 8, a boa qualidade do passe de raiz, onde a concavidade de raiz existente está de acordo com a API 1104 (2010), pois tal concavidade da raiz da solda é aceitável para qualquer comprimento, desde que não haja mordeduras e falta de concordância (concentrador de tensões). Por outro lado, é possível buscar melhorias no projeto da junta de forma a se reduzir esta concavidade da raiz. Por exemplo, aumentando-se a abertura da raiz ou aumentando-se o ângulo do chanfro. Entretanto, o objetivo foi estabelecer condições paramétricas para a junta em específico.

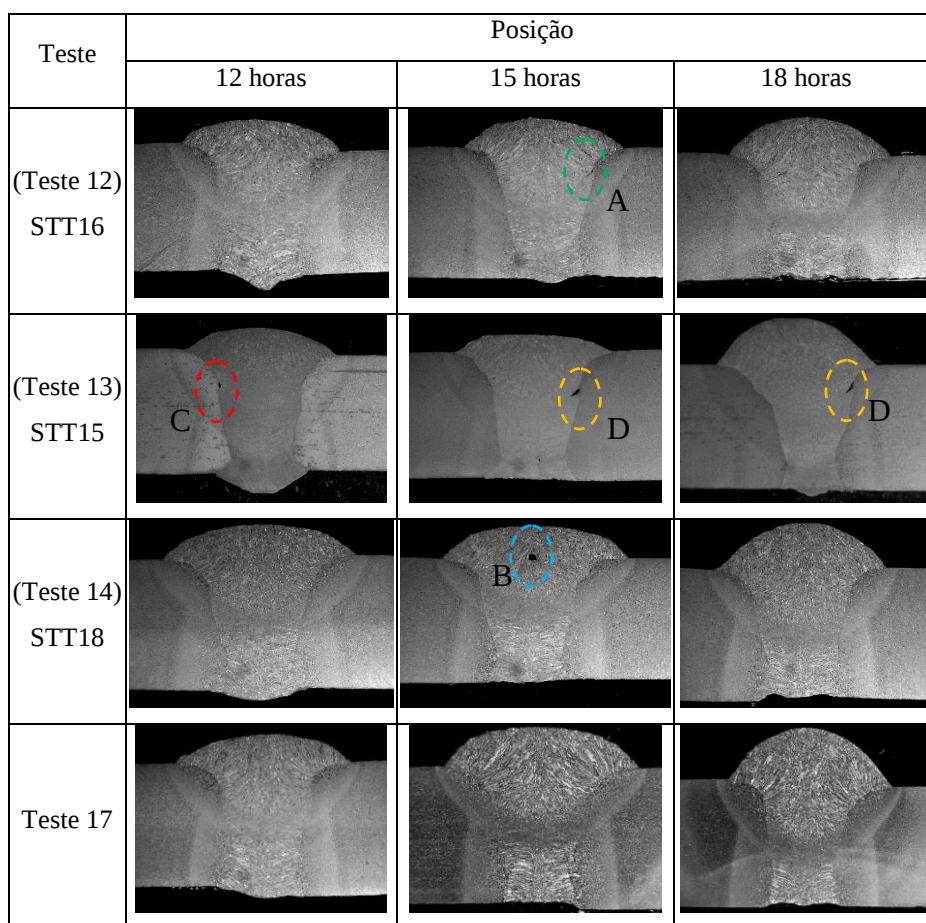


Figura 8. Macrografias dos cordões de solda para o processo STT com ângulo de inclinação da tocha em 0° (espessura da chapa: 8,0 mm); As imperfeições foram denominadas como “A” para falta de fusão entre passes, “B” para a presença de poros, “C” para falta de fusão lateral entre metal de adição e metal base e “D” para falta de fusão entre passes e lateral.

Para os valores medidos no ensaio de perfil de dureza, a maior dureza encontrada foi de 210 HV0,5 para o metal de solda no passe de enchimento e a menor de 140 HV0,5 para o metal de base. Com relação a valores médios, para o passe de raiz, o metal de base apresentou dureza de $149,3 \pm 3,2$ HV0,5, a ZAC de $156,5 \pm 5,6$ HV0,5 e o metal de solda de $193,1 \pm 9,4$ HV0,5 (em função do revenimento do passe de acabamento). Já para o passe de enchimento, o metal de base apresentou dureza de $153,0 \pm 4,2$ HV0,5, a ZAC de $165,7 \pm 10$ HV0,5 e o metal de solda de $201,4 \pm 9,4$ HV0,5. A Figura 10 apresenta os resultados obtidos.

Dada a pequena dispersão entre as medidas, considera-se que não sejam necessárias medições no corpo de prova do Teste 16, pois, o comportamento é bastante similar para as amostras investigadas.

Neste sentido, todos estes valores são adequados e inferiores a 350 HV, estabelecido na API 1104 (2010) como risco para ocorrência de trinca a frio.

Com relação aos resultados para o ensaio de dobramento, a Figura 9 apresenta os corpos de prova para cada processo, quadrante (superior ou inferior) e região da solda (face ou raiz). Já a Tabela 5 discrimina as dimensões dos corpos de prova utilizados e a distância entre os apoios. Destaca-se que API 1104 (2010) requer um cutelo de 45 mm de diâmetro, que não havia disponível. Assim, foi utilizado um cutelo de 39 mm de diâmetro. Uma vez que o diâmetro é menor, considera-se adequado, pois o dobramento passa a ser mais severo.

Tabela 5. Dimensões dos corpos de prova fabricados para ensaio de dobramento.

Amostra	Quadrante	Identificação	Dimensões [mm]			
			Espessura	Largura	Comprimento	Distância dos apoios
Teste 16	Superior	(D1F)	7,58	25,28	223,0	120
	Superior	(D1R)	7,64	25,35	223,0	120
Teste 17	Inferior	(D2F)	7,59	24,96	223,0	120
	Inferior	(D2R)	7,72	25,55	223,0	120

Todos os corpos de provas dobraram sem trincamento. Além do mais, uma vez que o passe de raiz não apresentou qualquer imperfeição no dobramento de raiz, considera-se que os parâmetros de soldagem para o passe de raiz sejam adequados para a junta proposta. Esta constatação é de suma importância, pois mesmo ocorrendo possíveis descontinuidades na raiz, como concavidade da raiz da solda apresentada e discutida no item 3.1 e visto na Figura 8, os ensaios de dobramento de raiz e tração foram todos aprovados.



Figura 9. Corpos de prova após ensaios de dobramento, com indicações de trincamento.

Já o ensaio de tração uniaxial foi executado com velocidade constante de 5 mm/min. Após a execução dos ensaios, foram encontrados os resultados de limite de escoamento, tensão máxima, alongamento e tensão de ruptura para os testes 16 e 17 e apresentados na Tabela 6. Nesta mesma tabela, estão apresentados os valores encontrados para o metal de base para as três amostras retiradas de diferentes regiões do tubo, assim como as dimensões dos corpos de prova fabricados para ensaio de tração uniaxial.

Destaca-se que os valores nominais do aço API 5L X65, segundo a API 5L (2012) são 448 MPa para o limite de escoamento, 531 MPa para o limite de resistência e 19,6% de alongamento mínimo (calculado com base na equação indicada pela Tabela 3A da Norma API SPEC 5L e valor encontrado no apêndice D da referida norma para área de seção transversal do corpo de prova de 200 mm²).

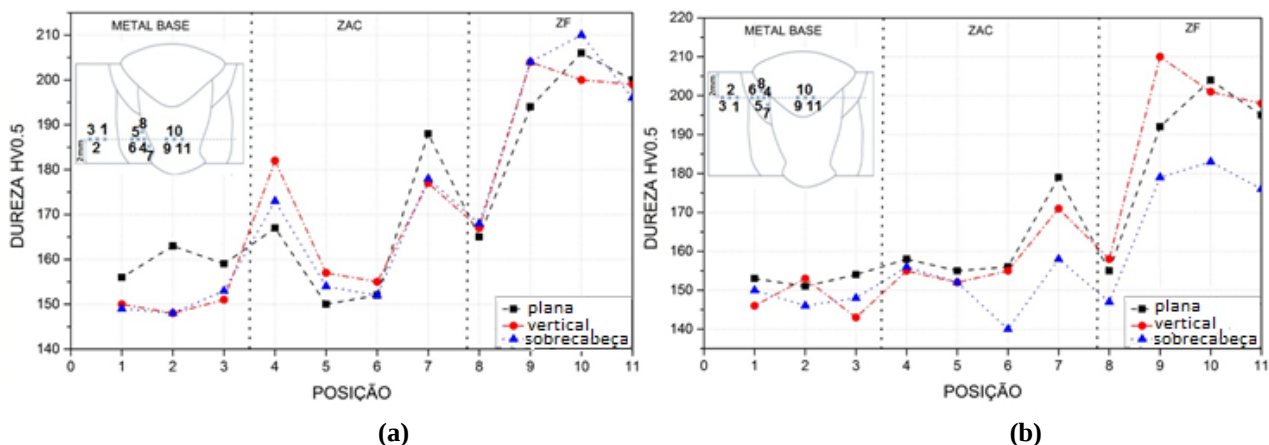


Figura 10. Valores de dureza obtidos para a raiz (a) e enchimento (b).

Embora os valores encontrados estejam abaixo do especificado na norma para os limites de escoamento e resistência, os valores encontrados durante a soldagem são superiores ao metal de base para o limite de escoamento e limite de ruptura. Já o limite de resistência do corpo de prova inferior apresentou-se com valores inferiores ao do metal de base.

A Tabela 3A norma API 5L (2012), classifica os materiais de acordo com os requisitos mínimos de limites de escoamento e resistência. Comparando-se estes valores com os valores apresentados na norma para o metal de base, se pode afirmar que o material analisado é o API 5L X42. Neste contexto, o valor encontrado do limite de resistência para o metal soldado, no que se referente ao corpo de prova inferior, está respeitando o requisito mínimo deste material. Nesse ponto, deve-se recordar da análise química feita na Tabela 1, onde a composição química reflete àquela de um aço comum ao carbono, que realmente não possuiria maiores propriedades mecânicas.

Tabela 6. Dimensões dos corpos de prova fabricados e resultados para ensaio de tração uniaxial.

Amostra	Quadrante	Dimensões [mm]			Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência [MPa]	Limite de ruptura [MPa]	Elongamento [%]
		Espessura	Largura	Comprimento Livre				
Teste 17	Superior (T1)	7,22	25,41	80	345	425	390	18,1
Teste 16	Inferior (T2)	7,31	25,42	80	330	414	350	21,3
Metal de base	Amostra 1	8,07	25	60	300	423,2	308	23,5
	Amostra 2	8	24,75	60	313,6	421,1	309,5	23,5
	Amostra 3	8,05	24,41	60	311,1	416,1	304,2	25

Na Figura 11 são mostradas as curvas tensão-deformação obtidas durante os ensaios para as soldas feitas pelo processo derivativo (STT), conforme posição de retirada do corpo de prova, e do metal de base. Já a Figura 12 apresenta o aspecto visual de cada corpo de prova após o ensaio e detalhe de sua fratura.

Nota-se na Figura 12 que os corpos de prova avaliados sofreram ruptura na região do metal de base a uma distância segura da zona termicamente afetada (ZAC), ou seja, fora da região do cordão de solda e da zona termicamente afetada. Levando-se em consideração as análises acima realizadas, as soldas estão aprovadas com respeito ao ensaio de tração.

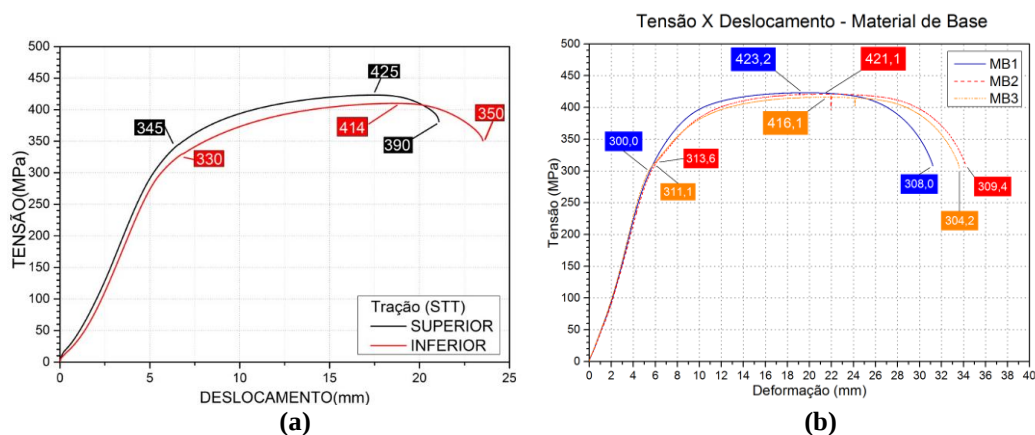


Figura 11. Curvas tensão-deformação para os ensaios de tração uniaxial: (a) metal soldado (Teste 17); (b) metal de base.

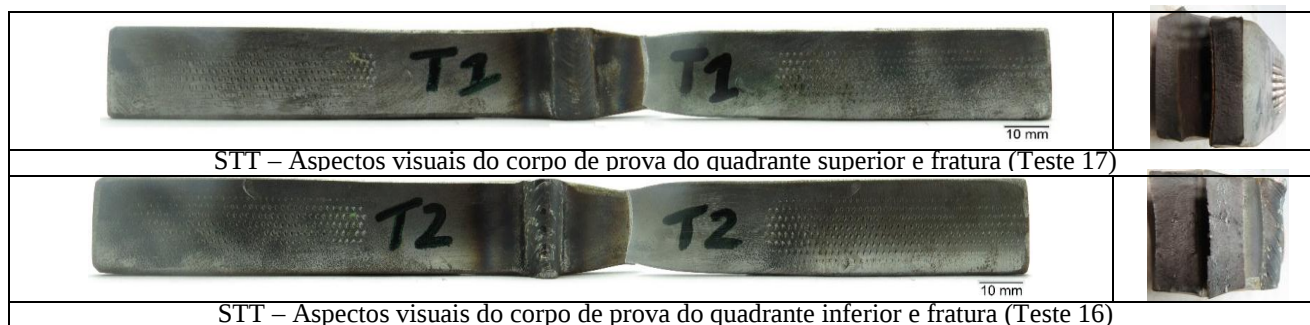


Figura 12. Aspectos visuais do corpo de prova do quadrante superior (T1) inferior (T2) e fratura.

Já para o ensaio de Nick Break a Figura 13 traz as imagens dos corpos de prova após os ensaios. Destaca-se que o centro do cordão de solda não se rompeu no primeiro impacto utilizando 3 mm como entalhe lateral e de 1,6 mm no reforço na face em conformidade com a API 1104 (2010) para processo mecanizado, o que permite afirmar que há uma boa resistência mecânica da junta. Para observar internamente a solda foi necessário realizar um entalhe maior de 3 mm no reforço e de 1,6 mm na lateral no corpo de prova. Ao se observar a fratura exposta esta ocorreu de forma dúctil sem descontinuidades.



Figura 13. Detalhe da área de ruptura do corpo de prova quadrante superior(N1) e inferior (N2) após ensaio de Nick-Break (teste 17).

Os resultados obtidos do ensaio de charpy são apresentados na Tabela 7, já corrigidos os efeitos de tamanho do corpo de prova. Por estes resultados, nenhum corpo de prova apresentou energia absorvida menor que 40 J, conforme especificado na API 1104 (2010), tendo como referência a temperatura de 0 °C ou 25,6 J em -12,2 °C. Ou seja, todas as soldas estão aprovadas do ponto de vista de tenacidade, uma vez que este aço e metal de adição não possuem maiores complexidades para se atingir o requerimento de tenacidade.

Tabela 7. Resultados do ensaio de impacto charpy (corpo de prova - Teste 17).

Quadrante	Identificação da amostra	Energia absorvida (kgf.m)	Energia absorvida (J)	Energia absorvida média (J)	Energia absorvida desvio padrão (J)
Inferior	I1	28.9	221	205	36
Inferior	I2	21.4	164		
Inferior	I3	29.9	229		
Superior	S1	28.2	216	152	56
Superior	S2	15.0	115		
Superior	S3	16.2	124		

Além do valor da energia em si, deve-se observar o aspecto da fratura. Assim, a Figura 14 apresenta exemplos de fraturas observadas, que se caracterizam por fratura dúctil na região analisada, o que corrobora os bons resultados de tenacidade. Entretanto, vale a pena destacar as deformações observadas na região do entalhe e propagação da trinca. As imagens desta figura demonstram grande deformação antes do rompimento do corpo de prova.

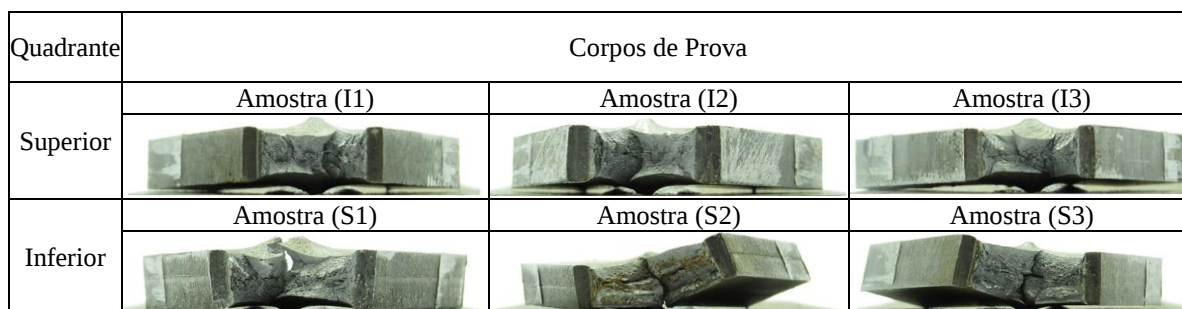


Figura 14. Detalhe das fraturas dos corpos de prova do ensaio charpy (espessura: 6,4 mm; largura: 10 mm; comprimento: 55 mm) para o Teste 17.

As imagens apresentadas na Figura 15 apresentam exemplos de micrografias que traduzem uma microestrutura esperada, ou seja, se observa os microconstituintes normalmente presentes em aços carbono como grão de ferrita e perlita no contorno deste grão ferrítico para o metal de base. Para o metal de solda, uma estrutura ferrítica acicular mais grosseira. Já para a ZAC de granulação grosseira (ZAC-GG) tem-se uma estrutura preferencialmente ferrítica acicular grosseira (~30 micra) com componentes MA, sendo que a ZAC de granulação fina (ZAC-GF) apresenta grãos menores (~6 micra).

Uma vez tanto os ensaios de dureza quanto de tenacidade charpy não apresentaram problema de fragilidade, apenas limitou-se a uma breve análise das micrografias por microscopia óptica. Entretanto, caso seja necessárias maiores análises, poderia ser discutido o uso de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) ou mesmo EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva) para caracterização de microconstituintes/fases específicas. Destaca-se que as microestruturas apresentadas na Figura 15 foram as mais representativas.



Figura 15. Exemplos de micrografias de solda realizada pelo GMAW STT.

4. CONCLUSÃO

- A melhor condição de soldagem encontrada para o passe de raiz foi utilizando-se velocidade de alimentação 5,75 m/min, velocidade de soldagem 35 cm/min, corrente de base 130 A, corrente de pico 350 A, Tout igual a 10, *BurnBack Time* igual a 0,03s, DBCP de 12 mm, amplitude de tecimento igual a 3 mm, frequência de oscilação igual a 3,6 Hz e ângulo de inclinação da tocha em 0°;
- Já a melhor condição de soldagem para o passe de acabamento/enchimento encontrada foi utilizando velocidade de alimentação 4,4 m/min, velocidade de soldagem 22,3 cm/min, corrente de base 100 A, corrente de pico 320 A, Tout igual a 8, *BurnBack Time* igual a 0,03s, DBCP de 12 mm, amplitude de tecimento igual a 4 mm, frequência de oscilação igual a 2,5 Hz e ângulo de inclinação da tocha em 15°;
- Foi possível obter somente um conjunto de parâmetros adequado e robusto, para soldar chanfro estreito, quando observado os critérios de aceitabilidade da Norma API 1104 (2010);
- A diminuição da velocidade de soldagem, aumento da velocidade de alimentação e a inclinação da tocha em 15° afetou de forma significativa o aumento da penetração dos cordões no enchimento;
- Para o chanfro estudado, deve-se utilizar uma relação V_a/V_s igual 19,73 para evitar o escorrimento da poça de fusão;
- Para sanar a perfuração da raiz na posição plana adotou-se a boa prática de entortar a ponta do arame em 3mm formando um ângulo de 90° antes de iniciar os testes;
- Os resultados mostram o uso de menores correntes para o passe de enchimento/acabamento, em relação ao passe de raiz, de forma a se evitar escorrimento na posição 15 horas e 18 horas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG pelas bolsas de estudo e pesquisa aos autores. Agradecem à PETROBRAS, pela doação dos consumíveis e incentivos a pesquisa e, aos membros e colaboradores do Laprosolda/UFU (Grupo Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem) pelo apoio e frutíferas discussões. Enfim, agradecem ao Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Uberlândia (COPEM), pela oportunidade.

6. REFERÊNCIAS

- Acuna, A. F. ; Freitas, J. C. ; Carvalho, L. P. ; Magalhaes, V. A. N. ; Vilarinho, L. O., 2013, "Evaluation of conventional and controlled short-circuit GMAW processes for root pass in pipe welding". In: Rio Pipeline 2013, 2013, Rio de Janeiro. Anais do Rio Pipeline 2013, v. 1. p. 1-9.
- ANSI/AWS. D10.12, 1989, "Recommended Practices and Procedures for Welding Low Carbon Steel Pipe".
- API 1104., 2010, "Welding of Pipelines and Related Facilities". 2010, 70p.
- API 5L., 2012, "Specification for Line Pipe. 45th edition", 180p.

- Costa, T. F. 2011. “Aplicação de Processos MAG Curto-Circuito Convencional e Controlado na Soldagem de Dutos de Aço ao Carbono”, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 184p.
- Electric, L., 2014, “Technology gets to the root of pipe welding”. Disponível em <www.lincolnelectric.com>. Acesso em: 03 abril, 2014.
- ISO 17662., 2005, “Welding – Calibration, verification and validation of equipamento used for welding, including ancillary activities” 38p.
- Machado, M. V. R., 2011, “Sistema Embarcado sem Fio para Monitoramento de Sinais Em Soldagem a arco Elétrico com Abordagem Tecnológica”, Universidade Federal de Uberlândia.
- Machado, M. V. R. ; MOTA, C. P. ; Finzi Neto, Roberto Mendes ; Vilarinho, L. O, 2013, “Determinação do Índice de Regularidade da Transferência Metálica por Curto-Circuito via Monitoramento Sonoro”. In: 7º COBEF, 2013, Penedo, Itatiaia. Anais do 7º COBEF, v. 1. p. 1-9.
- Magalhães, V. A. N., 2012, “Simulação Física Por Retificação Da Soldagem De Dutos Com Processo GMAW”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia. 151p.
- Meneses L. Y. H., 2013, “Modelagem e Simulação da Transferência Metálica no Processo GMAW-S em soldagem orbital”. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos. Universidade de Brasília.
- Mota, C.P., Machado, M. V. R., Costa, T. F., Vilarinho, L. O., Neto, R. M. F., 2014. “Assesment of Derivatives Short-Circuit Welding Monitoring With Near-Infrared Vision System”, IN: FABTECH Show 2014. Atlanta, Georgia. pp. 247-254.
- Nascimento, L. A., 2015, “Avaliação dos Processos GMAW com Transferência por Curto-Circuito Convencional e Controlado (STT) Aplicados na Soldagem Circunferencial Mecanizada”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia. pp. 72-73:271-285.
- Nadzam, J., 2014, “Gas Metal Arc Welding Guidelines”, Disponível em: <http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-50/c4200.pdf>. Acesso em: 30 Mar, 2016.
- Scotti, A. & Ponomarev, V., 2008, “Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho”, São Paulo, Artliber Editora, 284 p.
- Vargas, J. E., Alfaro, S. C. A., Pillaca, W. J. V., Vilarinho, L.O., 2014, “Parametrização do Passe de Raiz nas Posições Plana, Vertical descendente e Sobre-cabeça em Chanfro Estreito com o Processo STT”, Abril/2011. IN: COBEF, Caxias do Sul, RS. 9p.
- Vilarinho, L. O., Nascimento, L.A., Acuna, A. F., Carvalho, L. P., Freitas, J. C., 2014, “Conventional and Controlled Short-Circuit GMAW Processes for Downhill Pipe Welding”, IN: FABTECH Show 2014. Atlanta, Georgia. pp. 289-295.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EVALUATION OF GMAW PROCESSES GMAW CONTROLLED SHORT-CIRCUIT TRANSFER (STT) APPLIED TO MECHANIZED GIRTH WELDING

Lucas Alves do Nascimento, eng.lucasalves@gmail.com¹
Louriel Oliveira Vilarinho, vilarinho@mecanica.ufu.br¹

¹ Federal University of Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica Uberlândia, MG, Brasil.

Abstract: *The large Brazilian territory and the increasing demand for oil and gas consumption created a national challenge for the fast and reliable expansion of pipelines. The need for construction and maintenance and of new pipelines require welding processes with high productivity, reliable, that produce quality welds, to the detriment of the coated electrode process, currently the most used in the pipe union. Therefore, this work presents the study of girth welding of carbon steel pipes (API 5L, 2012) with 8" nominal diameter and 8.0 mm thickness. The welds were carried out in downhill progression by using orbital displacement device (mechanized welding), ER70S-6 wire with 1.2 mm diameter and Ar+25%CO₂, as shielding gas. The material was deposited on butt V joint with 15° bevel, 1 mm of root face and 3 mm root opening, without backing. For the proposed joint, GMAW processes with short-circuit metal transfer was assessed the derivative mode by using commercial power source namely STT (Surface Tension Transfer). In this context, welding parameters were investigated for root pass and filling pass. The analysis were obtained from visual inspection and mechanical tests (uniaxial tensile test, root and face bending, nick-break, charpy V-notch impact test, macrography test and hardness profile) with objective to qualify both processes. The results showed that the derivative process (STT) was capable to obtain a robust set of parameters for the proposed joint, in accordance to the acceptability criteria of standard API 1104 (2010).*

Keywords: *Pipe Welding, Controlled Metal Transfer, STT, Downhill Progression*