

Technical Paper

Estudo da viabilidade da variante do processo GMAW de alta performance DynaFlex-arc na execução manual e mecanizada de reparo por abraçadeiras soldáveis de dutos em operação.

Feasibility study of the high performance GMAW process variant DynaFlex-arc in manual and mechanized repair execution by weldable clamps in pipelines in continuous operation.

Cláudio Marques Schaeffer ¹ | Régis Henrique Gonçalves e Silva ² | Mateus Barancelli Schwedersky ³ | Cleber Marques ⁴ | Rafael Albino Bernardi ⁵ | Alisson Fernandes da Rosa ⁶.

1. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC), ENGENHARIA MECÂNICA, . FLORIANÓPOLIS - SC - BRASIL, claudio.schaeffer@posgrad.ufsc.br 2. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC), ENGENHARIA MECÂNICA, . FLORIANÓPOLIS - SC - BRASIL, regis.silva@ufsc.br 3. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC), ENGENHARIA MECÂNICA, . FLORIANÓPOLIS - SC - BRASIL, m.barancelli@ufsc.br 4. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC), ENGENHARIA MECÂNICA, . FLORIANÓPOLIS - SC - BRASIL, c.marques@posgrad.ufsc.br 5. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC), ENGENHARIA MECÂNICA, . FLORIANÓPOLIS - SC - BRASIL, rafael.a.b@posgrad.ufsc.br 6. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC), ENGENHARIA MECÂNICA, . FLORIANÓPOLIS - SC - BRASIL, alisson.fernandes@posgrad.ufsc.br

Resumo

O pleno funcionamento da indústria de petróleo e gás demanda o reparo por soldagem de dutos em operação com técnicas como dupla calha, caps, abraçadeiras, dentre outros. Para tanto, são utilizados processos convencionais como o GTAW e SMAW por serem já qualificados e testados, além de exigirem menores investimentos para a implementação de novas tecnologias (novas EPS, treinamento de soldadores, adaptação de equipamentos e outros). Tais fatores resultam em uma grande inércia na mudança de paradigmas dentro da indústria como a atualização dos processos e procedimentos de reparo por soldagem, que poderiam resultar em melhor qualidade da junta e menor tempo de operação. Por exemplo, a soldagem de abraçadeiras tem intuito de se tornar um reparo permanente, porém ainda não é um procedimento consolidado e qualificado na PETROBRAS, sendo realizado exclusivamente com Eletrodo Revestido. Este fato figura uma oportunidade de se desenvolver novos processos e procedimentos de soldagem visando o aumento da produtividade destes reparos. É neste contexto que o objetivo deste estudo é avaliar a aplicação do processo de soldagem recém desenvolvido denominado GMAW *DynaFlex-Arc* e considerado de alta performance, para a soldagem de abraçadeiras em tubos API 5L Grau B. Foram utilizadas técnicas avançadas de filmagem termográfica para controle de temperatura de interpasse e avaliação do aquecimento da abraçadeira e tubo. O expressivo perfil de penetração da solda em passe único sem ocorrência de descontinuidades, demonstraram a viabilidade deste processo para esta aplicação.

Palavras-chave: Abraçadeira. MIG/MAG. Dynaflex-Arc

Abstract

The full operation of the oil and gas industry demands the repair by welding of pipelines in operation with techniques such as sleeves, caps, bolt-on clamps, among others. For this, conventional welding processes are used, such as GTAW and SMAW, for being already qualified and tested, besides requiring lower investments for the implementation of new technologies (new EPS, welder training, equipment adaptation, and others). Such factors result in slow paradigm shifts within the industry such as updating welding repair processes and procedures, which could result in better joint quality and shorter operation time. For example, the welding of clamps is intended to become a permanent repair, but it is not yet a consolidated and qualified procedure in PETROBRAS, being exclusively performed with SMAW. This fact presents an opportunity to develop new welding processes and procedures to increase the productivity of these repairs. In this context, the objective of this study is to evaluate the application of the newly developed GMAW welding process denominated *DynaFlex-Arc* and considered of high performance, for the welding of clamps on API 5L Grade B pipes. Advanced thermographic filming techniques were used to control interpass temperature and evaluate clamp and tube heating. The penetration profile of the single pass weld without the occurrence of discontinuities demonstrated the viability of this process for this application.

Keywords: Bolt-on-Clamp. GMAW. Dynaflex-Arc

Received: September 26, 2021 | **Accepted:** | **Available online:**

Article nº:

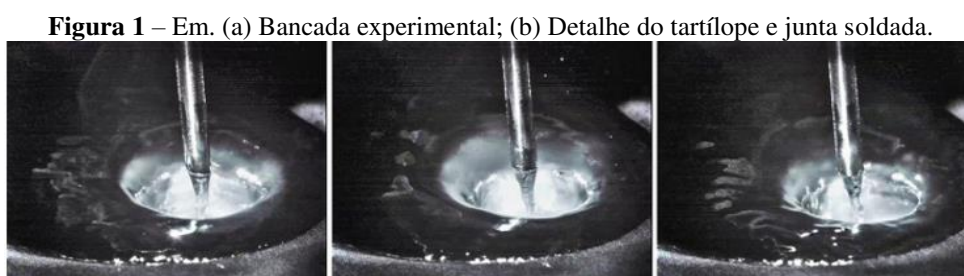
Cite as: Proceedings of the Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2022>

1. Introdução

Ao longo do tempo de operação os oleodutos terrestres sofrem degradação provocada por corrosão, vibração, oxidação, furto de fluidos etc. Diante destes fatores, manutenções de dutos em operação, envolvendo reparos por soldagem, são utilizadas por este segmento da indústria, LABSOLDA (2020). Conforme a norma PETROBRAS N-2163 (2016) uma das técnicas empregadas são as abraçadeiras aparafusadas. Estes reparos são utilizados como reforço estrutural ou contenção de vazamento, porém em algumas situações tais dispositivos são posteriormente soldados para aumentar a segurança quanto à vedação. Uma soldagem de reparo eficiente e segura ao soldador deve ter deposição suficiente com baixo aporte térmico de modo a não apresentar risco de perfuração do tubo e, ao mesmo tempo, adequado controle da poça de fusão.

Neste contexto, a justificativa para a escolha da variante *DynaFlex-Arc* para este estudo baseia-se nas condições testadas e descritas por Silva et al. (2019), que são principalmente a possibilidade de realizar uma solda de filete com adequada penetração, elevadas velocidades de soldagem e alimentação de arame. O *DynaFlex-Arc* é caracterizado principalmente pela atuação do arco elétrico enterrado na poça de fusão, o que resulta em uma soldagem com poucos respingos e oferece baixo risco de contaminação por ar atmosférico, conforme Figura 1. Para que esta condição seja possível, é necessário utilizar uma fonte de soldagem em modo de comando de tensão com um controle da indutância que garanta, na iminência de um evento de curto-circuito inesperado, o aumento rápido da corrente seguido de uma redução suave à condição de trabalho parametrizada, conforme trabalho de Dutra et al. (2020).



Fonte: Dutra et al. (2020).

Logo, este trabalho busca relatar estudos iniciais sobre metodologias e procedimentos para a soldagem de reparos por abraçadeiras de dutos com o MIG/MAG *DynaFlex-Arc*, com o objetivo de avaliar sua viabilidade em operação manual e mecanizada

2. Contextualização

Mesmo com planos de inspeções regulares atualizados, é possível que ocorram rupturas catastróficas por diversos motivos, desde falhas nas inspeções até a ocorrência de furtos de combustíveis. Além de minimizar o risco de ocorrência deste tipo de situação, um plano de inspeções regulares também serve para detectar vandalismos nas linhas ou possíveis derivações clandestinas, atividade criminosa envolvendo furtos de combustíveis diretamente das tubulações de transporte de fluidos. Prática que vem aumentando ao longo dos últimos anos e que, infelizmente, é uma realidade nas dutovias brasileiras. Tais intervenções criminosas podem trazer danos para a saúde humana, ambiental e animal, pois oferecem riscos de contaminação, incêndio e explosão.

Existem diversas opções de reparos soldáveis para sanar as possíveis avarias que podem ser constatadas em um duto em operação. Estas avarias podem ser mais sérias e demandarem a substituição de um trecho, ou menos severas e demandarem procedimentos sobre o próprio duto avariado. Em situações em que não há a necessidade de troca de trecho o uso de elementos secundários como abraçadeiras aparafusadas, tampões, chapa de reforço, calhas, dentre outros, proporcionam uma manutenção menos complexa. A escolha de cada tipo de procedimento de reparo deve ser pautada pela avaliação do risco em que a situação do dano constatado representa, pela disponibilidade de pessoal, equipamentos e materiais para a sua execução.

A soldagem de dutos em operação consiste em um procedimento altamente complexo onde existe o risco real e iminente de vazamento seguido de explosão durante, ou logo após a sua execução. Os principais riscos considerados neste tipo de situação são a perfuração do duto, e a nucleação de trincas induzidas por hidrogênio (TIH), conforme norma PCC-2 (2018).

Segundo Dalpiaz (2016), o procedimento de soldagem em regiões do duto onde houve perda significativa de espessura pode potencializar o risco de ocorrência de um defeito de soldagem catastrófico denominado *burnthrough*, caracterizado pela perfuração do duto. O aporte térmico elevado durante o procedimento de soldagem associado às pressões internas no duto, podem causar a formação de trincas nesta região. Mesmo que a falha não ocorra logo após o procedimento, é possível que a trinca nucleada se propague precipitada pelos ciclos de fadiga e acabe causando uma falha catastrófica com o passar do tempo (Oliveira, 2016). Por isso, manuais de soldagem em operação como o *Pipeline Research Council International (PRCI)* (2016) recomendam que a parametrização do processo de soldagem, e a avaliação do risco de perfuração devem ser realizados em conjunto com o auxílio de modelos de análise térmica tais como o programa do Instituto *Battelle* e o programa “*Thermal Analysis Model for Hot-Tap Welding*”. Além disso, como recomendação de prática segura do próprio manual, nestes casos a temperatura interna da parede do tubo não deve ultrapassar 982 °C durante a soldagem.

Segundo Bourgeois e Alexandrov (2022), o risco de formação de TIH está associado ao aprisionamento do hidrogênio na solda depositada, e a um processo descontrolado de resfriamento, podendo causar a nucleação de trincas. Este tipo de falha tem a sua ocorrência tipicamente constatada em até 12 horas após o reparo, no entanto, requerem a realização de inspeção 48 horas após o procedimento de reparo, PRCI (2016). Conforme descrito por Lippold (2015), este defeito ocorre nos aços ferríticos a temperaturas abaixo de 100 °C e está relacionado à coexistência de microestrutura frágil (normalmente martensita), tensões residuais de tração e presença de hidrogênio na região da solda. Segundo a norma AWS D1.1 (2008), controlar o aporte térmico em função da restrição da junta soldada, do percentual de carbono e do carbono equivalente (CE) dos materiais, consiste em um método bastante eficaz na prevenção de TIH.

No Brasil, a norma PETROBRAS N-2163 (2016), subsidiada pela API 1104 (1999), orienta a soldagem e trepanação em equipamentos, tubulações industriais e dutos em operação. Esta norma considera aplicáveis os processos *gas tungsten arc welding (GTAW)*, *gas metal arc welding (GMAW)* e o *shielded metal arc welding (SMAW)*. Assim como muitas decisões de projetos de engenharia, a escolha de cada processo deve ser pautada pela espessura do tubo, produtividade e custo.

A soldagem orbital de filete de juntas sobrepostas é uma das principais condições executadas em reparos de dutos. A quantidade de passes é definida pela espessura do tubo, do diâmetro do eletrodo e em função do volume de material depositado. Para dutos com espessuras menores que 6,4 mm se recomenda a utilização do processo *GTAW*, por fornecer menor aporte térmico e assim preservar a integridade da parede do duto. Contudo, quando operação de reparo ocorre em dutos com espessuras maiores, o processo *SMAW* é geralmente utilizado em todo o procedimento, desde o passe de raiz, passando pelos passes de enchimento até o passe final de

revenimento e acabamento Mainardi (2013). Diante destas características, que um procedimento de soldagem de reparo de dutos demanda, o *DynaFlex-Arc* representa uma opção viável, pois pode ser utilizado tanto no passe de raiz quanto nos demais passes, preservando a integridade do duto, e ainda com a possibilidade de execução de menos passes devido a sua elevada taxa de deposição de material com relação ao processo *SMAW*. Além disso, diferente do *SMAW* em que é difícil adaptar a mecanização na aplicação em soldagem orbital, devido principalmente a necessidade de troca do eletrodo, o *DynaFlex-Arc* pode executar soldagens orbitais com utilização de manipuladores mecanizados.

Neste contexto, a utilização de processos modernos de soldagem e de alta performance, podem representar uma opção viável para realizar a soldagem orbital mecanizada. Para concluir esta contextualização, diferente de processos convencionais que dependem de conjuntos de parâmetros específicos para cada trecho soldado em uma condição orbital, o processo *DynaFlex-Arc* possui um certo potencial no sentido de tornar a operação mais simples e robusta, reduzindo tempos de *setup*, com uma deposição menos sensível às condições ambientais e de posição, devido às características de arco enterrado.

3. Procedimento experimental

Conforme elencado nos objetivos deste trabalho, e pelas justificativas já expostas, foi testado o processo *DynaFlex-Arc* em uma condição de junta de filete sobreposta circunferencial.

3.1. Materiais e equipamentos

Foi determinado, dentro das condições do presente trabalho, que o reparo soldável seja de material compatível ao de um duto constituído de aço API 5L grau B com diâmetro externo de 305,8 mm e espessura de 9,52 mm, foram utilizados como materiais de base corpos de prova confeccionados a partir de seções do referido tubo. A composição química pode ser conferida na Tabela 1. Devido à compatibilidade dos materiais e disponibilidade comercial, foi utilizado o arame AWS ER 70S-6 com diâmetro de 1,2 mm. Sua composição química também pode ser conferida na Tabela 1.

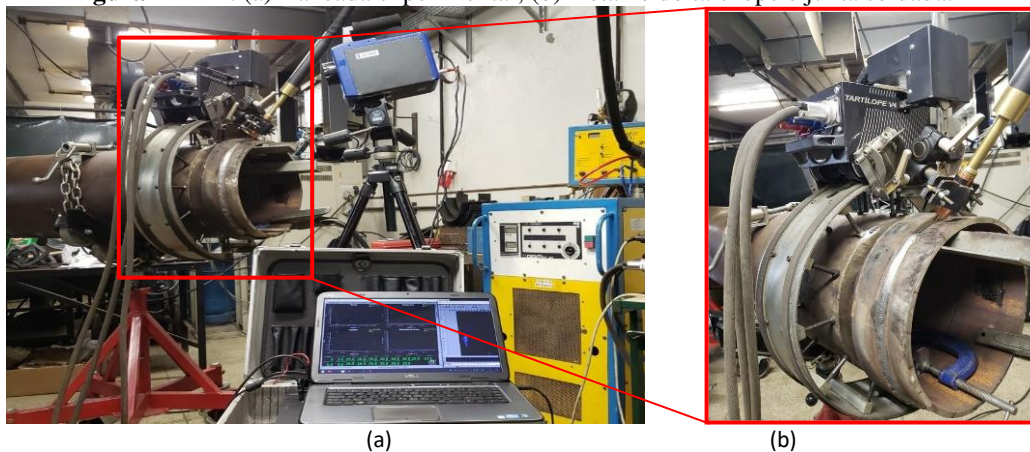
Tabela 1 – Composição química dos materiais de base e de adição.

Material	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Outros
Grade B	97,87	0,13	0,22	0,90	0,19	0,03	0,15	0,04	0,10	0,37
ER70S-6	97,53	0,11	0,40	1,10	0,01	0,03	0,15	0,10	0,15	0,42

Fonte: Nogueira (2021).

Testes de soldagem com o *DynaFlex-Arc* conduzidos por Silva et al (2019), demonstraram que o Ar+8%CO₂ apresentou melhores resultados quanto a secção transversal da solda depositada. Portanto, este foi o gás definido para a utilização nos ensaios propostos.

Os experimentos foram realizados no LABSOLDA, em uma bancada, conforme Figura 2, reservada para estudos de soldagem em tubulações, constituída por uma fonte IMC DIGIPLUS A7, um manipulador Tartilope V4, uma câmera térmica FLIR SC 7000, um sistema de aquisição de dados (SAP) IMC e termopar do tipo K.

Figura 2 – Em. (a) Bancada experimental; (b) Detalhe do tartilope e junta soldada.

(a) **Fonte:** o autor.

(b)

3.2. Metodologia

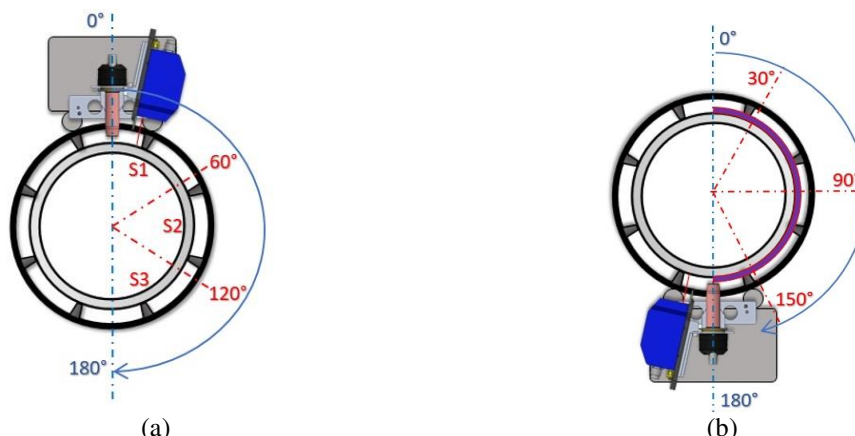
Foram realizadas 2 etapas de experimentos simulando a soldagem de junta de filete sobreposta circumferencial em reparo de duto seco na horizontal. Na primeira etapa foram definidos os melhores parâmetros de soldagem com o processo *Dynaflux-Arc* manual e mecanizado com único passe. Já na segunda etapa os experimentos foram realizados com a deposição de três passes, conforme Figura 3, com o objetivo de otimizar tanto o processo quanto a geometria final da solda, com vistas à soldagem de abraçadeira no duto.

Figura 3 – Representação da sequência de soldagem.

Fonte: o autor.

Experimentos iniciais demonstraram que a estabilidade da poça de fusão permanece em uma condição melhor quando o processo é realizado com a tocha movendo-se na progressão descendente puxando, com ângulo de ataque de 50° e ângulo de trabalho de 45° . Por isso as soldas deste trabalho foram realizadas ao longo de metade da circunferência do duto, entre 0° e 180° , no sentido descendente, conforme Figura 4 (a). Para analisar a geometria das soldas foram realizadas macrografias de amostras retiradas sempre de três posições específicas do corpo de prova. Para isso, a metade da seção transversal do tubo foi dividida em três setores de 60° cada, assim denominados como setor 1 (S1) entre 0° e 60° , setor 2 (S2) entre 60° e 120° e setor 3 (S3) entre 120° e 180° , cada um deles representando respectivamente as posições plana, descendente e sobre cabeça, conforme Figura 4 (a). Assim, na metade de cada setor em 30° , 90° e em 150° , conforme figura 4 (b) foram retiradas as amostras para fazer as macrografias.

Figura 4 – Em (a) Setores do corpo de prova; (b) Posições das macrografias.



Fonte: Silva et al (2021) adaptado.

Baseado na parametrização das variáveis apresentadas na Tabela 2, tensão (U), velocidade de arame (V_a), velocidade de soldagem (V_s), indutância de subida (K_s) e indutância de descida (K_d), os ensaios foram realizados com a expectativa de que as geometrias das seções transversais das soldas, atendessem os requisitos das normas PCC-2 (2018), B31-3 (2014) e a ISO 5817 (2003). Além de evitar falhas por defeito de *burnthrough*.

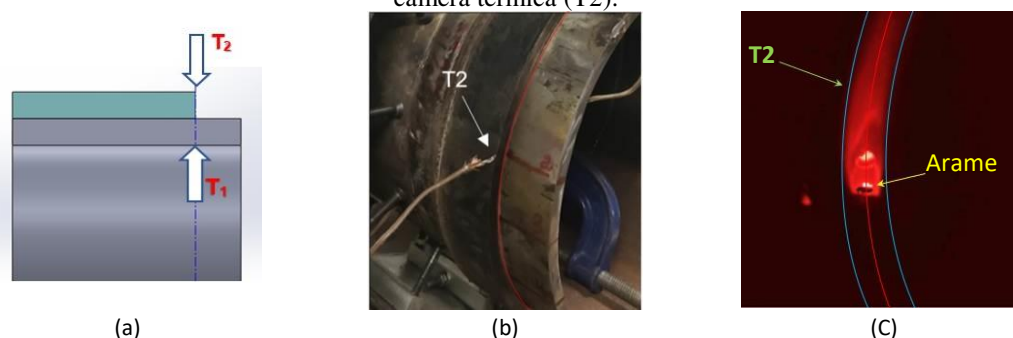
Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos experimentos.

Soldagem manual e mecanizada com um único passe						
U (V)	V_a (m/min)	V_s (cm/min)	K_s	K_d	DBCP (mm)	Posição Tocha
30,5	10,0	60,0	100	1	14	Puxando
Soldagem manual e mecanizada com três passes						
30,5	10,5	60,0	100	5	17	Puxando

Fonte: o autor.

Quanto ao monitoramento térmico, foram fixados termopares na posição 30°, na parede interna do duto alinhados com a raiz da junta, para assim monitorar a temperatura da região com maior aporte térmico do interior do tubo, conforme a posição T_1 indicada na Figura 5 (a). Quanto à região externa do duto, foram fixados termopares na posição 30°, na quina da borda da chapa de reparo, conforme a posição T_2 indicada na Figura 5 (b), e assim comparados com as aquisições da câmera térmica, conforme imagem 5 (c).

Figura 5 – Em (a) Posição dos termopares; (b) Posição do termopar (T_2); (c) Ponto de aquisição da câmera térmica (T_2).

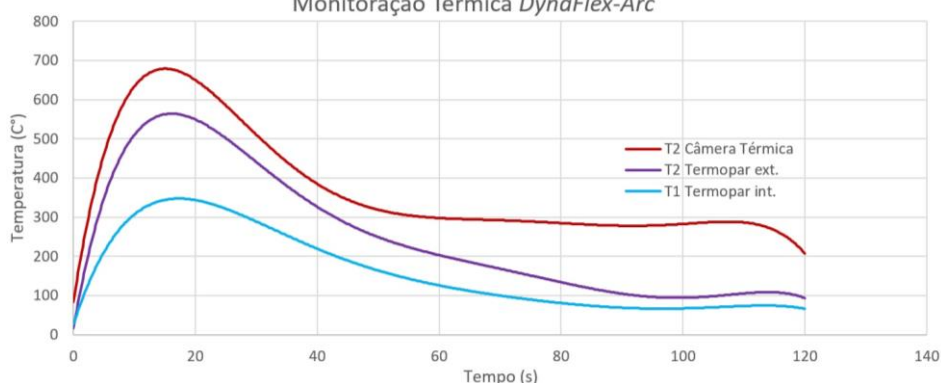


Fonte: o autor.

4. Resultados e discussões

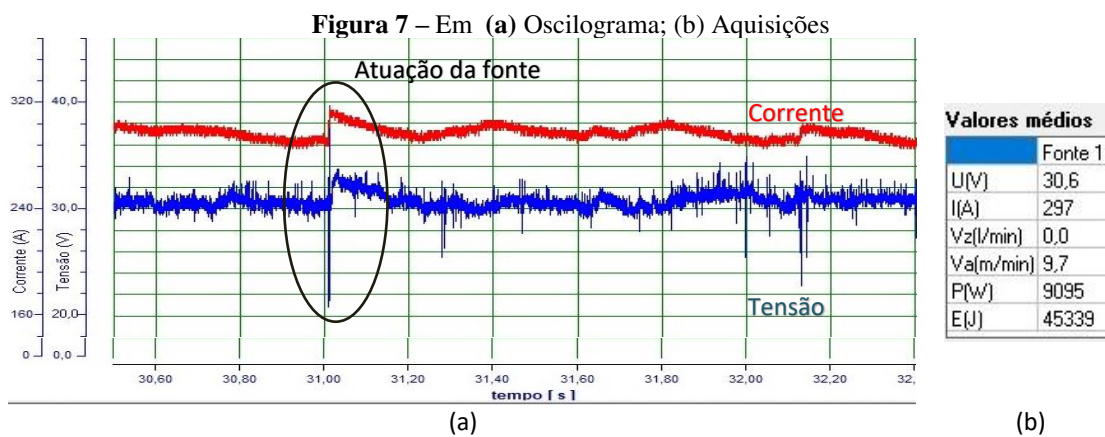
O ciclo térmico resultante do procedimento de soldagem com o *DynaFlex-Arc*, conforme Figura 6, confirmou a segurança deste procedimento quanto ao risco de perfuração do duto. A temperatura máxima na região da parede interna da tubulação (T1) permaneceu abaixo de 400 °C, quando o recomendado pelo PRCI (2006) é abaixo de 982 °C.

Figura 6. Sobreposição gráfica dos ciclos térmicos *DynaFlex-Arc* (editado).
Monitoração Térmica *DynaFlex-Arc*



Fonte: o autor.

Quanto aos transientes elétricos obtidos com o *DynaFlex-Arc* foi possível verificar, conforme aquisições apresentadas na Figura 7, que o arco se manteve estável ao longo da soldagem, em variações de faixas já previstas, conforme referências apresentadas na introdução. Sendo possível observar no instante em torno dos 31,00 segundos, conforme destaque circulado no oscilograma da Figura 7 (a), uma reação dinâmica da fonte, característica deste processo.

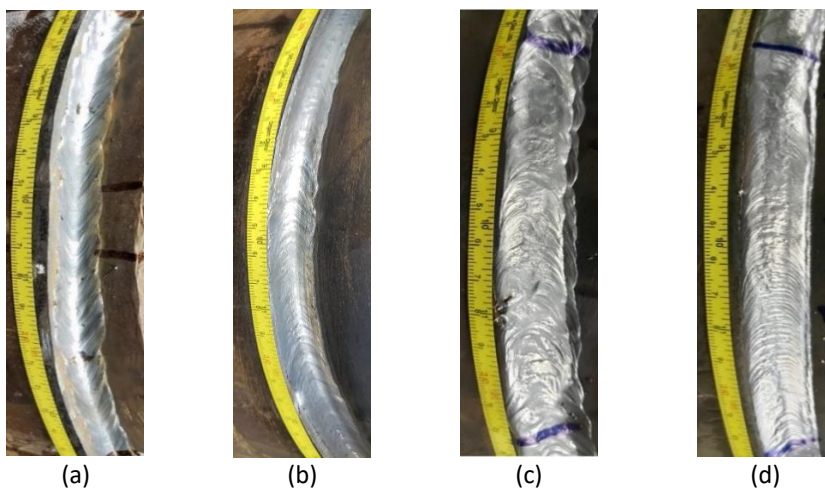


Fonte: o autor.

Inicialmente cabe destacar que, ao contrário da soldagem manual em que o soldador varia os ângulos de ataque durante todo o procedimento, o manipulador mecanizado mantém fixos estes ângulos. Mesmo com os ângulos da tocha em uma posição fixa ao longo de toda a trajetória foi possível verificar o potencial deste processo ao longo de praticamente toda a junta, conforme Figura 8. As juntas soldadas com um passe não apresentaram defeitos ou discontinuidades como poros, mordeduras ou trincas, com exceção dos últimos 10 cm do cordão executado mecanicamente que apresentou poros. Quanto às juntas soldadas com três passes, também foi possível constatar uma boa deposição, mas com o registro de falta de fusão.

Figura 8 – Em (a) Manual 1 passe; (b) Mecanizado 1 passe; (c) Manual 3 passes; (d) Mecanizado 3 passes.

Estudo da viabilidade da variante do processo GMAW de alta performance *DynaFlex-arc* na execução manual e mecanizada de reparo por abraçadeiras soldáveis de dutos em operação.



Fonte: o autor.

Além de ser um processo que oferece alta penetração, também foi possível constatar que ele é seguro quanto ao risco de perfuração da parede interna do duto, pois os ensaios foram realizados em uma condição bastante crítica para a ocorrência deste tipo de falha. Em nenhum dos ensaios realizados em laboratório foi constatado o defeito de *burn through*, conforme Tabela 3. Cabe destacar que em nenhuma das amostras apresentadas a área da ZTA chegou a abranger toda a espessura do duto.

Tabela 3 – Macrografias das seções transversais da junta.

Em	Manual 1 passe	Mecanizado 1 passe	Manual 3 passes	Mecanizado 3 passes
30°	$g = 1,07$ $G = 2,72$ $P = 3,84$ $p = 1,75$	$g = 0,56$ $G = 3,81$ $P = 5,38$ $p = 2,15$	$G = 6,80$ $P = 9,61$ $p = 1,45$	$g = 0,51$ $G = 5,72$ $P = 7,80$ $p = 0,30$
90°	$g = 0,80$ $G = 3,55$ $P = 5,03$ $p = 1,68$	$g = 1,12$ $G = 3,39$ $P = 4,79$ $p = 0,91$	$G = 5,89$ $P = 8,34$ $p = 0,69$	$g = 0,25$ $G = 6,92$ $P = 9,78$ $p = 0,56$
150°	$g = 1,50$ $G = 3,57$ $P = 5,04$ $p = 2,65$	$g = 1,26$ $G = 3,00$ $P = 4,24$ $p = 2,29$	$g = 1,35$ $G = 6,43$ $P = 9,10$ $p = 1,80$	$g = 0,98$ $G = 6,74$ $P = 9,53$ $p = 2,16$

Fonte: o autor.

*Garganta teórica (G), a perna da solda (P), a penetração (p) e o gap (g).

Em termos de comparação, Nogueira (2021) realizou experimentos para demonstrar o aumento de penetração com a utilização de sistema de aquecimento por indução do tubo com o processo *pulse gas metal arc welding (GMAW-P)* para o primeiro passe. Foi obtida uma penetração máxima de 1,3 mm, tensão média de 26,3 V, corrente média de 191 A, velocidade de soldagem de 30 cm/min que resultaram em uma energia de soldagem¹ de 1,00 KJ/ mm, além de velocidade de alimentação arame de 6 m/min (1,2mm). Em contrapartida, o processo *DynaFlex-Arc* resultou em penetração de 2,65 mm, tensão média de 30,6 V, corrente média de 297 A, velocidade de soldagem de 60 cm/min que resultaram em uma energia de soldagem de 0,90 KJ/mm. No entanto, a velocidade de alimentação de arame no *DynaFlex-Arc* foi de 10 m/min (1,2 mm). Esta comparação com o processo pulsado, por si só, demonstra a eficiência desta nova variante desenvolvida e proposta para ser utilizada nos reparos, sob diferentes aspectos como tempos de operações com praticamente o mesmo *setup*, aporte térmico reduzido e robustez de geometria da solda, todos obtidos com menor energia de soldagem, por exemplo.

5. Considerações finais

Apesar de ser considerado um processo concebido para executar soldagens de alta penetração, características de um processo de arco enterrado (*buried arc*), foi possível constatar que ele pode ser parametrizado de forma a proporcionar uma solda com menor penetração e segura quanto ao risco da ocorrência de falhas provocadas por defeitos de *burn through*. O resultado foi um processo de alto desempenho, com melhor penetração e maior velocidade de soldagem quando comparado ao processo em corrente pulsado. Além disso, possui vantagens intrínsecas quanto o processo convencional *SMAW*, como a realização de soldas com menor teor de hidrogênio, reduzindo assim ocorrências de TIH.

A repetibilidade deste processo mecanizado para a execução da sequência de três passes sofreu alguma instabilidade devido às irregularidades geométricas da junta e do trilho que comprometem a referência para o posicionamento longitudinal para o preenchimento com os cordões 2 e 3. Contudo, serão realizados diferentes testes para verificar a possibilidade de alterar apenas a DBCP entre os passes, mantendo o alinhamento da ponta do arame com a projeção da linha da raiz da junta.

Para finalizar, cabe salientar que as normas referenciadas neste trabalho são omissas quanto ao número de passes que devem ser realizados neste tipo de junta, apenas exigem critérios geométricos conforme os avaliados no trabalho. Desta forma, cabe considerar a possibilidade de fazer mais experimentos com o objetivo de testar a máxima deposição de material dentro de uma condição aceitável de qualidade da solda.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à UFSC- Universidade Federal de Santa Catarina, ao POSMEC – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, ao LABSOLDA – Instituto de Soldagem e Mecatrônica e em especial à PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S/A por tornarem factível a realização deste trabalho.

¹ Sem considerar eficiências, apenas parâmetros de médias de corrente, tensão e velocidade de soldagem.

Referências

- API (Ed.). (1999). *Standard 1104 - Welding pipeline and related facilities*. American Petroleum Institute.
- API 1104. (1999). *Welding pipeline and related facilities* (9th ed.). American Petroleum Institute.
- ASME. (2018). *PCC-2- POST CONSTRUCTION CODE*. American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2014). *B31.3 - Process piping*. American Society of Mechanical Engineers.
- AWS. (2008). *D1.1/D1.1M, Structural welding code - Steel*. American Welding Society.
- Bourgeois, D., & Alexandrov, B. (2022). Hydrogen-assisted cracking fracture analysis using high-speed camera and delayed hydrogen cracking test. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 3, 15.
<https://doi.org/10.1007/s11668-021-01308-2>
- Dutra, J.C., Silva, R. H. G., Riffel, K. C., & Marques, C. (2020). High-performance GMAW process for deep penetration applications. *Welding in the World*, 64, 999–1009. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00889-0>
- G. Dalpiaz. (2016). *Manutenção de dutos/tubulações - Soldagem em operação*. CENPES/PDISO/TMC.
- ISO. (2003). *Standard 5817 - Welding - Fusion welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for imperfections*. International Organization for Standardization.
- LABSOLDA. (2020). *Processos de reparos alternativos: Soldagem em operação de abraçadeiras aparafusadas e bujão (capote)*. UFSC. <https://labsolda.ufsc.br/projetos/888-processos-de-reparos-alternativos-soldagem-em-operacao-de-abraceadeiras-afarafusadas-e-bujao-capote>
- Lippold, J. C. (2015). *Welding metallurgy and weldability*. John Wiley & Sons, Inc.
- Mainardi, M. (2013). *Estudo do efeito do pré-aquecimento na soldagem do aço API5L sobre a dureza e energia de impacto da junta soldada*. Universidade Mauá.

- Nogueira, R.R. (2021). *Avaliação técnica de aquecimento indutivo aplicada à soldagem de dutos em operação utilizando o processo MIG/MAG*. UFSC. <https://labsolda.ufsc.br/public/teses-e-dissertacoes/dissertacoes/938-avaliacao-da-tecnica-de-aquecimento-indutivo-aplicada-a-soldagem-de-dutos-em-operacao-utilizando-o-processo-mig-mag>
- PETROBRAS. (2016). *N-2163 - Soldagem e trepanação, tubulações industriais e dutos em operação. Revisão F*
- PRCI. (2006). *Final report, project number R 2269-01R*. Pipeline Research Council International.
- Silva, R.H.G, Jair, C.D., Schwedersky, M.B., Marques, C., Riffel, K. C., & Bernardi, R. A. (2019). *Dynamically -flexible arc - a novel interpretation for the high performance GMAW*. 3930–3936.
<https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE19/All-ISOPE19/ISOPE-I-19-363/21527>