



Código do trabalho : 2821

Título: DynaFlex-Arc – Estudo de sua flexibilidade para aplicação em soldagem de revestimento com Inconel 625

Título (Inglês) : DynaFlex-Arc - Study of its flexibility for application in Inconel 625 cladding welding

Autores:

CLÁUDIO MARQUES SCHAEFFER (0000-0003-2639-4338); RÉGIS HENRIQUE GONÇALVES E SILVA (0000-0003-0660-6495); MATEUS BARANCELLI SCHWEDERSKY (0000-0002-4537-3228); CLEBER MARQUES; DANIEL GALEAZZI; ALBERTO BONAMIGO VIVIANI ([HTTPS://ORCID.ORG/0000-0002-0303-6792](https://orcid.org/0000-0002-0303-6792)). UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC), FLORIANÓPOLIS - SC - BRASIL.

Apresentador: Alberto Bonamigo Viviani

Tema: EIXO 1 – UPSTREAM **Sub Tema:** SISTEMAS DE PRODUÇÃO OFFSHORE

Resumo em Português

Operações de revestimento (*cladding*) com materiais mais caros que o material de base são comumente utilizados na indústria buscando um equilíbrio entre a economia do material aplicado e o aumento da vida útil do componente revestido, com destaque para o revestimento de tubos para o transporte de hidrocarbonetos. Neste contexto, surge a ideia de utilizar o processo *DynaFlex* por conta do fato dele aumentar a taxa de deposição, quando comparado a uma mesma aplicação com o GMAW convencional com transferência por *spray*. Graças a flexibilidade do arco, promovida pela dinâmica de resposta da indutância da fonte, aliada ao seu algoritmo, tornam possível aumentar a velocidade de arame e ainda manter uma condição estável de transferência metálica, mesmo em uma situação tão crítica de arco curto, e com a iminência de ocorrência de curtos-circuitos. Em outras palavras, este “*boost*” na taxa de alimentação de arame só é possível graças às características construtivas, e de software da fonte. Assim, este trabalho demonstrou que um processo concebido para executar uma transferência metálica por *buried arc* também pode, graças à flexibilidade do arco, realizar uma solda de revestimento, utilizando arame de Inconel 625. Podendo ainda, trabalhar com uma velocidade de alimentação de material 30% maior em relação ao GMAW convencional.

Resumo (Inglês)

Operations involving cladding with materials more expensive than the base material are commonly used in the industry to strike a balance between the economy of the applied material and the increased service life of the coated component, particularly in the context of tubing for hydrocarbon transportation. Within this framework, the idea of utilizing the DynaFlex process emerges due to its capability to increase the deposition rate compared to the same application using conventional GMAW (Gas Metal Arc Welding) with spray transfer. The flexibility of the arc, facilitated by the response dynamics of the source's inductance, coupled with its algorithm, makes it possible to elevate wire speed while maintaining a stable metallic transfer condition, even in a critical short-arc situation, with the imminent occurrence of short circuits.

In other words, this "boost" in wire feed rate is only achievable due to the constructive features and software capabilities of the power source. Thus, this study demonstrated that a process originally designed to perform a metallic transfer through buried arc can also, thanks to the arc's flexibility, conduct a cladding weld using Inconel 625 wire. Moreover, it can operate with a material feed rate 30% higher compared to conventional GMAW.

Palavra-chave 1: DynaFlex-Arc **Palavra-chave 2:** GMAW de alta performance **Palavra-chave 3:** Spray em streaming **Palavra-chave 4:** Soldagem de revestimento **Palavra-chave 5:** Inconel 625

1. Introdução

Ao longo das décadas de 1980, 1990 e 2000, algumas tecnologias aplicadas à soldagem a arco elétrico foram exitosas, e se consolidaram no mercado de forma reconhecida como “processos de alta performance”, Silva et al. (2019); Chen et al. (2011) e Dompablo (2013). A exemplo do GMAW que possui uma série de variantes, que podem ser classificadas em grupos de acordo com suas faixas de operação de tensão (U), corrente (I) e velocidade de alimentação de arame (Va), Deutscher Verband Für Schweissen (2017) e DVS (2000), onde cada uma delas tem suas peculiaridades e aplicações. Estas variantes produzem diferentes modos de transferência metálica dentre as quais se encontra a família dos chamados *modified spray arc*, em que o modo *spray* em *streaming* está classificado, CLOOS (2023); EWM (2023) e LORCH (2019). Conforme descrito por Egerland (2015), este modo ocorre em uma condição crítica de equilíbrio, considerando a atuação de um arco extremamente curto e uma distância bico de contato peça (DBCP) constante, em que a deposição de material ocorre em uma condição predominantemente fluída e afilada, sem a projeção de gotas iguais ou maiores que o diâmetro do eletrodo e sem o estabelecimento de transferência metálica por curto-circuito.

2. Referencial teórico

Neste contexto, o *DynaFlex* consiste em um processo com características que permitem o seu uso em uma condição de equilíbrio metaestável com transferência metálica em *spray* em modo *streaming*, no qual a alta corrente promove uma cratera na poça de fusão. Esta se mantém aberta ao longo do processo de soldagem, com a atuação de um arco extremamente curto, devido à alta taxa de alimentação de arame, quando comparada a um processo convencional, Dutra et al. (2020) e (2021). A situação em que o arco atua predominantemente abaixo da superfície do metal de base caracteriza-se na literatura com arco enterrado, Hayato et al. (2017); Dreveck et al. (2020) e Hayato et al. (2021). Nesta perspectiva, cabe destacar que o *DynaFlex* foi apresentado por Dutra et al. (2020) em seu artigo, quando concluiu que uma soldagem de alta performance não é dependente de formas de ondas complexas, a exemplo de processos que se utilizam de corrente pulsada para executar este tipo de operação, mas apenas de uma fonte com uma resposta de corrente elétrica adequada em eventos que tendem a desestabilizar a poça e o arco, e assim descaracterizar a transferência metálica em *streaming*, sendo que, em um processo com comando de tensão a dinâmica de variação da corrente pode ser controlada por meio de um ajuste eletrônico da indutância.

De fato, esta capacidade do arco em atuar em uma condição crítica, oferecendo o risco constante de ocorrências de curtos-circuitos, só é possível graças à dinâmica da fonte de potência, no caso do *DynaFlex*, IMC (2015), que age prontamente antes que ocorram eventos de instabilidade, ou, caso ocorram, possa reestabelecer a condição de trabalho antes que descaracterize a transferência metálica do regime. Além disso, a possibilidade de ajustar a intensidade da indutância, que irá controlar as taxas de variação tanto de subida quanto de descida da corrente (di/dt), com opção de ajustar valores diferentes uma da outra, viabiliza as variações de posição de soldagem e de aplicação do processo. Para realizar este ajuste, os valores da indutância de subida (L_s) e da indutância de descida (L_d) dependem da indutância de referência (L_r) de entrada do *insulated-gate bipolar transistor* (IGBT) e do valor do *setup* do divisor de subida (K_s) e do divisor de descida (K_d), de acordo com as Equações 01 e 02.

$$L_s = \frac{L_r}{K_s} \quad (H) \quad (01)$$

$$L_d = \frac{L_r}{K_d} \quad (H) \quad (02)$$

Assim, os valores de K_s e K_d podem ser programados em uma escala adimensional de 1 a 600, com resolução de 1, para alterar a frequência de chaveamento do IGBT e emular os valores de L_s e L_d . Ou seja, a indutância é controlada em malha fechada, em tempo real, Júnior (2002) e Silva (2017). O *DynaFlex* também permite a regulagem destes valores em tempo real.

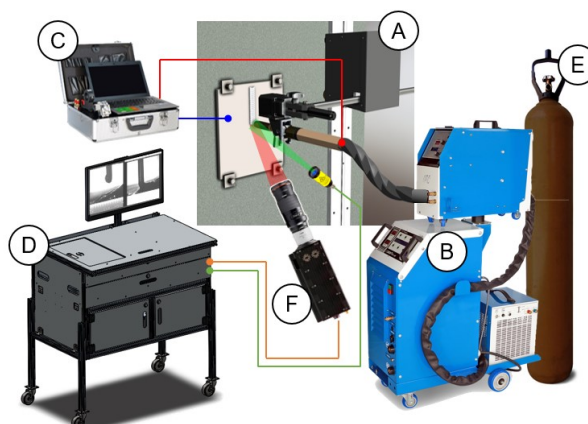
Portanto, verifica-se que o processo com arco enterrado e controle da indutância tem sido utilizado visando aplicações de alta performance em penetração, porém sua condição de alta corrente também o torna atrativo do ponto de vista de aumento da velocidade de soldagem (V_s), e, portanto, maior produtividade. O uso de processos de alta corrente em aplicações de revestimento é pouco explorado na literatura devido à sua associação com alta penetração, o que é contraproducente do ponto de vista de revestimento, no qual deseja-se baixa diluição.

Assim, este artigo visa demonstrar e avaliar uma inovação baseada na adaptação de um processo de alta performance, originalmente utilizado para aplicações de penetração, adaptado para o objetivo de aumento da velocidade/produtividade em aplicações de revestimento.

3. Materiais e equipamentos

Os experimentos foram realizados em uma bancada, conforme o esquemático da Figura 1, constituída por um Tartilope V2 (A), uma fonte IMC DigiPlus A7 (B), um sistema de aquisição de dados (SAP) IMC (C), mesa de processamento de imagem (D), gás de processo Ar+25%He (E), e uma câmera de alta velocidade com taxa de aquisição de 5.000 *frames* por segundo (F). Para a execução da soldagem foram utilizados o arame Inconel 625 com diâmetro de 1,2 mm, e corpos de prova constituídos de chapas de aço 1020 com 12,7 x 40 x 300 mm.

Figura 1 – Esquema do *Layout* da bancada.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4. Metodologia

Foram realizadas soldagens de revestimento na posição vertical descendente com a tocha perpendicular (90°), com deposição de três camadas de revestimento, e uma sobreposição lateral de 25% entre os cordões da mesma camada. Assim, foram conduzidos ensaios com o processo GMAW com transferência globular por curto-circuito, GMAW com transferência em *spray* e com o processo *DynaFlex-Arc* com transferência por *spray* em *streaming*, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem para as três variantes do processo GMAW

Parâmetros programados	Processos		
	GMAW Globular	GMAW <i>spray</i>	<i>DynaFlex</i>
U (V)	25,5	32,5	32,5
Va (m/min)	8,5	10,5	13,5
Vs (cm/min)	50	60	60
Ks (adimensional)	100	100	100
Kd (adimensional)	50	20	20
Freq. Oscil.* (Hz)	4	4	3
Larg. Oscil. (mm)	16	16	16
DBCP (mm)	16	16	16

Fonte: Elaborado pelos autores.

*Sem tempo de parada.

Inicialmente, foram executadas soldagens depositando um único cordão até que a transferência globular por curto-circuito fosse registrada pelos oscilogramas. Nesta condição, os parâmetros de tensão, corrente, velocidade de alimentação, Ks, Kd, velocidade de soldagem e de oscilação da tocha foram refinados até que o processo ficasse estável e então repetido para comprovar a sua robustez. O mesmo procedimento foi adotado para o modo em *spray*.

Na sequência, uma vez definidos os parâmetros da transferência por *spray*, foram então iniciados os experimentos para encontrar a faixa de operação de atuação do *DynaFlex*. Assim, a velocidade de arame foi gradualmente aumentada até que os oscilogramas registrassem iminências cadentes de curtos-circuitos. Neste momento o Ks e o Kd foram regulados, de forma que a subida da corrente fosse rápida o suficiente para evitar um curto-circuito e gradualmente lenta para que voltasse ao regime de trabalho com o mínimo de respingos, no sentido de evitar perturbações na poça de fusão e manter seu equilíbrio, sem a característica de cratera (desejável para operações de alta penetração). Logo que o Ks e o Kd foram definidos, os demais parâmetros foram refinados e, assim, a repetibilidade testada.

Deste modo, foram realizadas filmagens com câmera de alta velocidade para registrar a transferência metálica e o comportamento da poça de fusão.

Finalmente, a composição química das camadas foi realizada com um espectrógrafo SPECTROTEST TXC35. As medições foram realizadas sempre no centro da chapa usando como referência a face inferior igual à 0 mm. Assim, foram medidos os seguintes pontos: para a primeira camada o ponto com 13,7 mm de altura em relação à face inferior da chapa, a segunda camada o ponto com 14,7 mm e a terceira camada com 15,7 mm de altura.

5. Resultados e discussões

Por conseguinte, os três oscilogramas, referentes a cada um dos ensaios realizados, podem ser verificados na Figura 2. No GMAW com transferência globular, conforme Figura 2 (a), é possível observar as gotas maiores que o diâmetro do arame e os intervalos longos entre as ocorrências, fenômenos que são bem característicos desta transferência. Já no *DynaFlex*, conforme Figura 2 (c), há ocorrências de curto-circuito, mas sem transferência metálica, pois, quando ocorre uma queda abrupta de tensão para uma faixa em torno de 10 V, a fonte atua imediatamente sobre a corrente no sentido de manter a transferência em uma condição regular, sem que ocorram perturbações na poça de fusão a ponto de causarem discontinuidades neste ciclo de atuação, ou seja, sem descaracterizar a transferência metálica em *streaming*.

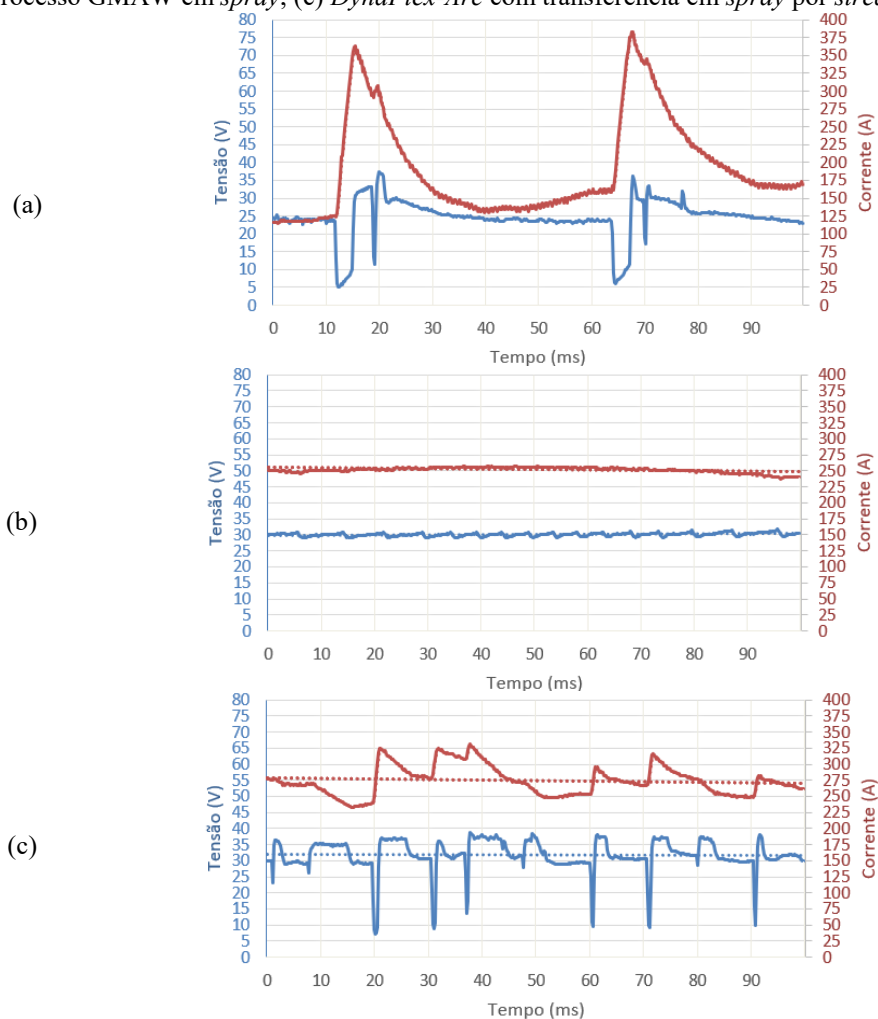
Os valores dos parâmetros médios, aquisitados, podem ser observados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Tensões e correntes médias aquisitadas.

Parâmetros medidos	Processos		
	GMAW globular	GMAW spray	<i>DynaFlex</i>
$U_{\text{méd.}}$ (V)	23	30	31
$I_{\text{méd.}}$ (A)	223	240	270
$P_{\text{méd.}}$ (W)	5.129	7.248	8.397

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 2 – Oscilogramas de Tensão x Corrente x Tempo. Em (a) Processo GMAW globular; (b) Processo GMAW em *spray*; (c) *DynaFlex-Arc* com transferência em *spray* por *streaming*.



Fonte: Elaborados pelos autores.

Conforme Figuras 3, 4 e 5, respectivamente às soldagens globular, *spray* e *streaming*, é possível observar as diferenças entre estes três modos de transferência metálica. No primeiro caso, Figura 3, ocorre o contato da gota na poça de fusão para que ocorra a sua transferência. No segundo, Figura 4, é possível observar a projeção das gotas em um regime em *spray*, bem característico deste modo. Já no terceiro, ocorre a formação de um filamento contínuo na ponta do arame, o qual tende a um estreitamento em forma de cone, até ocorrer a projeção de pequenas gotas, menores que o diâmetro do eletrodo, em uma condição com um arco extremamente curto.

Figura 3 – Transf. metálica, GMAW globular (Vídeo em: <https://youtu.be/pWmAzCHCJZg>)



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4 – Transf. metálica, GMAW *spray* (Vídeo em: <https://www.youtube.com/watch?v=93HxESz8HXw>)



Fonte: Elaborado pelos autores.

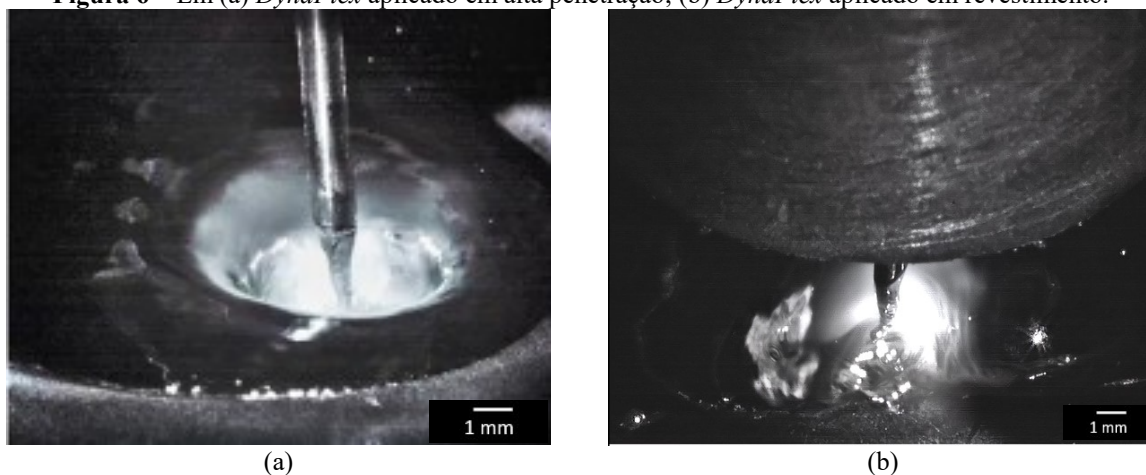
Figura 5 – Transf. metálica, *DynaFlex* (Vídeo em: <https://www.youtube.com/watch?v=zuQzESoAwGc>)



Fonte: Elaborado pelos autores.

Diferente de uma condição de alta penetração, como a mostrada por Dutra et al. (2020), em que ocorre a formação de uma cratera na poça de fusão promovendo a alta penetração, conforme Figura 6 (a), no revestimento é possível observar a formação do cordão com a atuação de um arco curto, conforme Figura 6 (b), porém atuando praticamente na superfície do material de base devido à frequência de oscilação da tocha e da alta velocidade de soldagem.

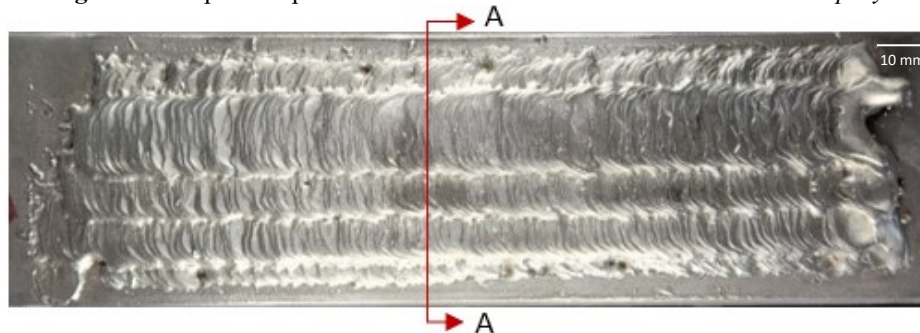
Figura 6 – Em (a) *DynaFlex* aplicado em alta penetração; (b) *DynaFlex* aplicado em revestimento.



Fonte: Em (a) Dutra et al (2020); (b) Elaborado pelos autores.

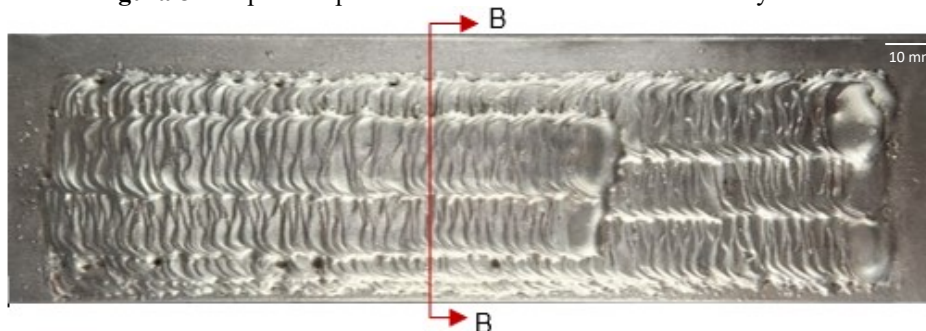
Ademais, o resultado das soldas realizadas com o GMAW em *spray* e o *DynaFlex* podem ser observados na Figura 7 e 8 respectivamente. A principal diferença ficou por conta do espaçamento maior entre as escamas dos cordões executados com o *DynaFlex*. Devido à redução da frequência de oscilação utilizada para a realização deste revestimento, pois precisou ser menor para eliminar a ocorrência de escorrimento de material, afinal, este processo trabalha com potências maiores, e consequentemente com mais pressão do arco que contribui para aumentar a fluidez do metal fundido.

Figura 7 – Aspecto superficial do revestimento feito com o GMAW em *spray*



Fonte: Elaborado pelos autores.

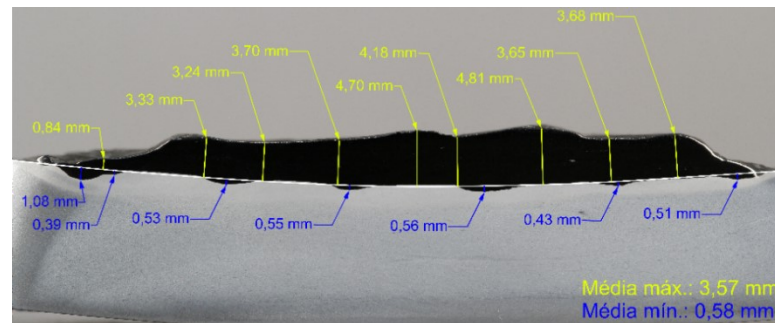
Figura 8 – Aspecto superficial do revestimento feito com o DynaFlex



Fonte: Elaborado pelos autores.

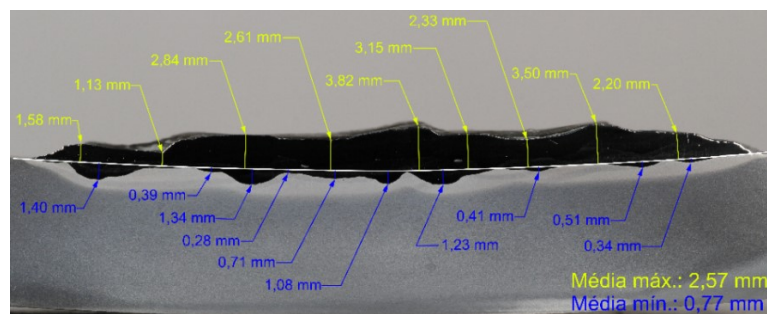
A diferença entre as macrografias pode ser observada, quanto ao reforço médio maior registrado pelo processo GMAW em *spray*, conforme Figura 9, e pela penetração média maior registrada pelo processo *DynaFlex*, conforme Figura 10. Este resultado referente à penetração também é influenciado pela potência mais alta que implicam em um aquecimento maior do material de base resultando em uma imposição de arame em uma profundidade maior na poça de fusão.

Figura 9 – Medições de reforço e penetração referentes à secção A-A (GMAW *spray*).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 10 – Medições de reforço e penetração referentes à secção B-B. (*DynaFlex*).



Fonte: Elaborado pelos autores.

O resultado das medições de composição química com o GMAW em *spray* e o *DynaFlex* podem ser conferidas nas Tabelas 3 e 4 respectivamente.

Tabela 3 – Composição química das camadas das soldas realizadas com o GMAW em *spray*.

Concentração	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Fe (%)	Nb (%)	Outros (%)
Camada 1	55,00	18,26	7,06	17,18	3,25	<1,00%
Camada 2	65,50	19,21	8,38	2,96	4,43	<1,00%
Camada 3	67,00	18,83	8,91	0,80	3,60	<1,00%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 4 – Composição química das camadas das soldas realizadas com o *DynaFlex*.

Concentração	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Fe (%)	Nb (%)	Outros (%)
Camada 1	47,15	14,25	6,04	30,78	2,56	<1,00%
Camada 2	64,20	18,42	8,47	4,93	3,74	<1,00%
Camada 3	66,00	19,00	8,71	2,04	3,32	<1,00%

Fonte: Elaborado pelos autores.

6. Considerações finais

A posição vertical de soldagem somada, principalmente, ao movimento oscilatório descendente da tocha, impediu a formação da cratera na poça de fusão, e conseqüentemente dos níveis de penetração registrados em experimentos com chapa plana feitos por Dutra (Dutra et al. 2020), permitindo características de processo adequadas a revestimentos.

Apesar de, não haver formação de cratera na poça de fusão, como ocorre na soldagem em alta penetração, a transferência em *streaming* foi registrada de forma predominante e cadenciada ao longo do processo de soldagem, caracterizando a flexibilidade e a robustez do processo, mesmo sob eventos de curto-circuito. Este fato demonstra, apesar de toda a perturbação causada pelos movimentos da tocha, eventos de curto-circuito e do volume de material depositado, que é possível o estabelecimento de uma transferência metálica com um arco curto com condições de realizar uma soldagem de revestimento.

Apesar do percentual de 2,04% de ferro encontrado na terceira camada da solda realizada pelo *DynaFlex*, causado, principalmente, pela penetração, este índice ainda é considerado baixo em uma aplicação de revestimento, American Petroleum Institute (2004). Além disso, apesar de a metodologia do trabalho não ter contemplado variação de velocidade de soldagem, a maior velocidade de arame do Dynaflex indica claro potencial para aumento de velocidade de soldagem e, portanto, maior produtividade e redução da diluição. Apresenta-se, assim, aplicação potencial para o revestimento de equipamentos destinados à indústria de petróleo e gás, em especial, para sistemas de produção *offshore* que são severamente expostos a condições de abrasão e corrosão.

7. 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.