

**EVALUATION OF ZINC IN LASER BEAM BRAZE WELDING OF
GALVANIZED STEEL SHEETS**

BRUNO RUIVO FUGA
HENRIQUE NARDON FERRARESI
NATALIA WENDT DREVECK
ELTON EDUARDO FISSMER
OSMAR CUSTÓDIO FILHO
THIAGO SOARES PERREIRA

**EVALUATION OF ZINC IN LASER BEAM BRAZE WELDING OF GALVANIZED STEEL
SHEETS****AVALIAÇÃO DO ZINCO NA SOLDADA-BRASAGEM A LASER DE CHAPAS GALVANIZADAS****BRUNO RUIVO FUGA**

<https://orcid.org/0009-0001-6598-8983/> bruno.fuga@sc.senai.br
Instituto SENAI de Inovação em Manufatura e Processamento a Laser, Joinville, Santa Catarina

HENRIQUE NARDON FERRARESI

<https://orcid.org/0000-0001-8057-3527/> henrique.ferraresi@sc.senai.br
Instituto SENAI de Inovação em Manufatura e Processamento a Laser, Joinville, Santa Catarina

NATALIA WENDT DREVECK

<https://orcid.org/0000-0003-3965-9884/> natalia.dreveck@sc.senai.br
Instituto SENAI de Inovação em Manufatura e Processamento a Laser, Joinville, Santa Catarina

ELTON EDUARDO FISSMER

<https://orcid.org/0000-0002-3950-9192/> elton.fissmer@sc.senai.br
Instituto SENAI de Inovação em Manufatura e Processamento a Laser, Joinville, Santa Catarina

OSMAR CUSTÓDIO FILHO

<https://orcid.org/0000-0001-7347-1813/> osmar.cmfilho@gmail.com
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, Santa Catarina

THIAGO SOARES PERREIRA

<https://orcid.org/0000-0001-7568-8426/> thiago.pereira@sc.senai.br
Instituto SENAI de Inovação em Manufatura e Processamento a Laser, Joinville, Santa Catarina



Recebido em: 09/09/2024

Aprovado em: 11/12/2024

Publicado em: 11/12/2024

RESUMO

Há mais de uma década a indústria automotiva emprega o processo de solda-brasagem a laser na fabricação das carrocerias de seus veículos, na qual a qualidade do cordão brasado é um requisito importante, especialmente quando estes ficam expostos para o cliente. Um dos aspectos que compromete a qualidade do cordão é a presença do zinco no revestimento das chapas de aço galvanizadas. Nesse âmbito, realizou-

se um estudo comparativo entre dois métodos de alimentação de arame na solda-brasagem a laser (puxando e empurrando), com o objetivo de mitigar a presença de zinco na região do cordão brasado e avaliar a espessura da camada intermetálica de ferro-silício que pode impactar na resistência mecânica da junta. Foi utilizado um único feixe de laser para a solda-brasagem, adição de arame de cobre silício e duas espessuras de chapas. Análises de microscopia eletrônica de varredura com EDS acoplado mostraram que apesar da baixa detecção, para a chapa fina existe diferença na quantidade de zinco na zona fundida entre as técnicas de alimentação. Adicionalmente, o mapeamento de EDS confirmou a presença de uma camada intermetálica composta por ferro e silício, cuja espessura é maior para o método de adição empurrando o arame, tendo em vista o aporte térmico maior em relação ao método puxando.

Palavras-chave: brasagem a laser; chapa galvanizada; camada intermetálica; indústria automotiva.

ABSTRACT

For more than a decade, the automotive industry has employed the laser welding-brazing process in the manufacturing of vehicle bodies, where the quality of the brazed seam is an important requirement, especially when exposed to the customer. One aspect that compromises the quality of the seam is the presence of zinc in the coating of galvanized steel sheets. In this context, a comparative study was conducted between two wire feeding methods in laser welding-brazing (pulling and pushing) to mitigate the presence of zinc in the brazed seam region and to evaluate the thickness of the iron-silicon intermetallic layer, which can impact the mechanical strength of the joint. A single laser beam was used for the welding-brazing, with silicon-copper wire addition and two sheet thicknesses. Scanning electron microscopy analyses with attached EDS showed that, despite the low detection, for the thinner sheet, there is a difference in the amount of zinc in the fused zone between the feeding techniques. Additionally, EDS mapping confirmed the presence of an intermetallic layer composed of iron and silicon, whose thickness is greater for the pushing wire addition method, considering the higher heat input compared to the pulling method.

Keywords: automotive industry; galvanized sheet; laser brazing, intermetallic layers.

1 INTRODUÇÃO

A *American Welding Society* (AWS) define brasagem (B) como um grupo de processos de união em que as peças de trabalho e o metal de adição são aquecidos à temperatura adequada para formar uma junta brasada. O metal de adição de brasagem deve ter uma temperatura liquidus acima de 450°C e abaixo do solidus do material de base, onde é distribuído e retido entre as superfícies de contato da junta por ação capilar. Dentro deste grupo, temos por exemplo, a Brasagem por Feixe de Laser (LBB), Brasagem a Forno (FB) e Brasagem por Resistência (RB). Existe ainda nesta mesma norma, um grupo de processos sem classificação específica e pouco conhecido chamado de Solda-Brasagem (BW – *Braze Welding*), que são processos de união em que o metal de adição de brasagem é distribuído na junta sem ação capilar, entre estes processos estão a Solda-Brasagem a Arco (ABW) conhecido como MIG-Brazing e Solda-Brasagem por Feixe de Laser (LBBW) (AWS A3.0M/A3.0, 2020).

A solda-brasagem a laser é um método que utiliza a energia térmica de um feixe de laser para aquecer e fundir um material de adição que é distribuído sobre a junta a ser unida. Dentre suas principais vantagens ante os processos convencionais é possível citar o aquecimento de alta precisão, localizado e de baixo aporte térmico, que favorece a união de chapas finas que são mais propensas a defeitos de perfuração e distorção térmica.

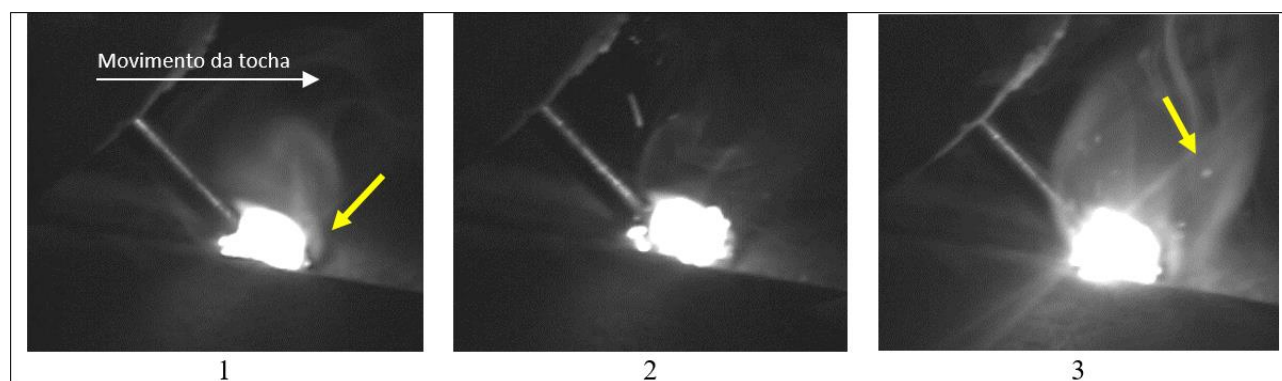
Krishnaja, Cheepu e Venkateswarlu (2018) ressaltaram também a maior eficiência do processo, devido à pequena área de atuação do laser, a alta qualidade superficial do cordão brasado e a possibilidade de automatização do processo. Estas características resultaram no interesse da indústria automotiva para a aplicação da solda-brasagem a laser na fabricação de carrocerias de veículos, com implementações nas fábricas iniciando em 1998 (HOFFMANN; KUGLER; SCHWAB, 2004). A aplicação principal do processo concentra-se na junta do teto das carrocerias automotivas, comumente compostas de aço galvanizado como metal de base.

Os aços galvanizados são largamente utilizados em diversos segmentos industriais devido à sua excelente resistência a corrosão, inclusive pelas automotivas. Entretanto, a temperatura de ebulição do zinco (907 °C) é mais baixa que o ponto de fusão do arame de adição (1100 °C para o CuSi), portanto durante o processo de solda-brasagem, o zinco evapora.

Mohammadpour et al. (2020) destaca que um defeito frequente é o aprisionamento do zinco na poça líquida do metal de adição causando sua explosão refletindo em poros no cordão brasado. Além disso, segundo Mattulat, Kügler, Vollersten (2020) o zinco afeta a molhabilidade do material de adição impactando diretamente na qualidade superficial da brasagem e na resistência mecânica.

Ferraresi et al., (2024) avaliaram os parâmetros da solda-brasagem a laser em chapas de 0,65 mm galvanizadas com feixe de laser único e descreveram os fenômenos da ebulição do zinco durante o processo através da filmagem em alta velocidade conforme mostra a sequência de 3 imagens da Figura 1. Pelas imagens é possível observar que os autores utilizaram o método empurrando e observaram que ao longo de toda a filmagem a explosão da poça de fusão devido ao aprisionamento do zinco, relacionando esse fenômeno a imperfeições na face superior da junta.

Figura 1 - Sequências de 3 imagens em alta velocidade sem iluminação especial. (1) Formação de uma gotícula de zinco fundida a frente da poça de fusão, indicado pela seta, neste momento o processo está estável. (2) A poça de fusão sobrepõe a gotícula de zinco e dá-se início à ebulição do zinco, percebe-se que a poça de fusão perde seu formato esférico e fica instável (3) A luz intensa e o respingo indicado pela seta evidenciam a explosão da poça.

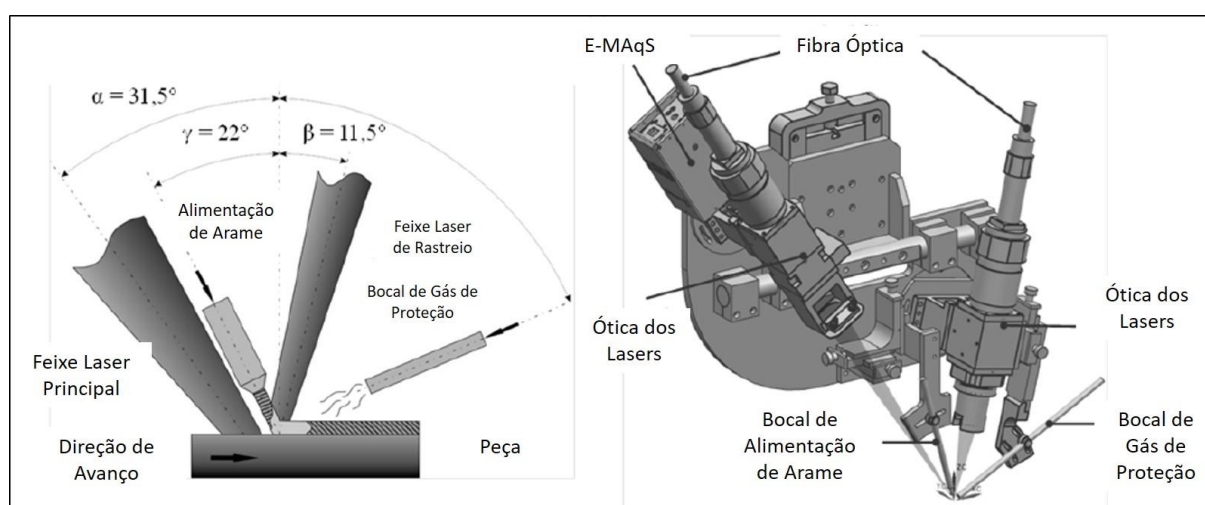


Fonte: Ferraresi et al., (2024)

Para mitigar e até eliminar a interferência do zinco durante o processo de solda-brasagem de chapas galvanizada Guimarães et al. (2007) utilizou o comparativo entre dois ângulos de alimentação de arame para o processo de MIG-Brazing (solda-brasagem com arco elétrico), a estratégia de empurrar a poça fundida (arco a frente), trouxe um efeito de ebulição do zinco antes de entrar em contato com a poça de fusão, reduzindo porosidades em comparação com a estratégia de puxar o arame (arco atrás).

Para evitar este inconveniente durante o processo, algumas tecnologias foram desenvolvidas, que consiste basicamente em aquecer e/ou evaporar o zinco imediatamente antes de ocorrer a solda-brasagem propriamente dita. A Figura 2 apresenta um setup de brasagem a laser com dois feixes no mesmo cabeçote, com o objetivo tornar a temperatura da poça de fusão mais uniforme, juntamente com a superfície da peça. Em seu estudo, os autores utilizaram uma junta sobreposta, e concluíram que a molhabilidade da chapa inferior é aprimorada ao empregar um primeiro feixe de laser para pré-aquecimento e o segundo feixe para o processo. (MITTELSTÄDT et al., 2014).

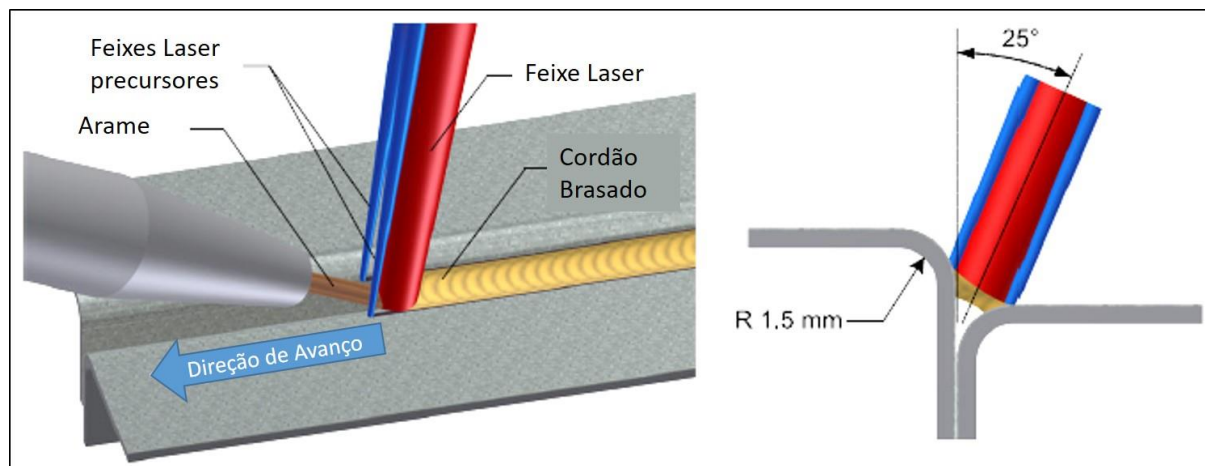
Figura 2 - Setup de Brasagem a laser com 2 feixes



Fonte: Adaptado de Mittelstädt et al. (2014)

A Figura 3 apresenta outra tecnologia para mitigar os efeitos do zinco durante a solda-brasagem, que é a utilização de 3 feixes de lasers motivado pelo fato de que respingos e outros defeitos geralmente surgem nas bordas das chapas de aço galvanizado. Assim, dois feixes de laser de menor potência são utilizados para limpar o zinco, com o objetivo de melhorar a molhabilidade na brasagem e aprimorar a qualidade superficial do cordão. Os autores obtiveram cordões com qualidade superficial superior em comparação à tecnologia de feixe único. (REIMANN et al., 2017).

Figura 3 - Setup de Brasagem a Laser utilizando Laser Trifocal



Fonte: Adaptado de Reimann et al. (2017)

Durante a ebulição do zinco o processo de solda-brasagem o aço do metal de base entra em contato com o metal de adição ainda fase líquida e ocorre uma interação metalúrgica entre eles. Caso o metal de adição seja uma liga de cobre-silício, haverá a formação de uma camada intermetálica de ferro-silício, que impacta na resistência mecânica da junta dependendo da sua espessura que está intimamente correlacionada com o aporte térmico do processo.

Yu et al. (2004) relataram o desenvolvimento de compostos intermetálicos de ferro-silício ao longo da interface da junta na brasagem de aços galvanizados de 2,0 mm de espessura com um fio CuSi_3 como metal de adição. Com o aumento da entrada de calor, a camada de fase intermetálica ficou mais espessa e, conseqüentemente, prejudicou a resistência da junta.

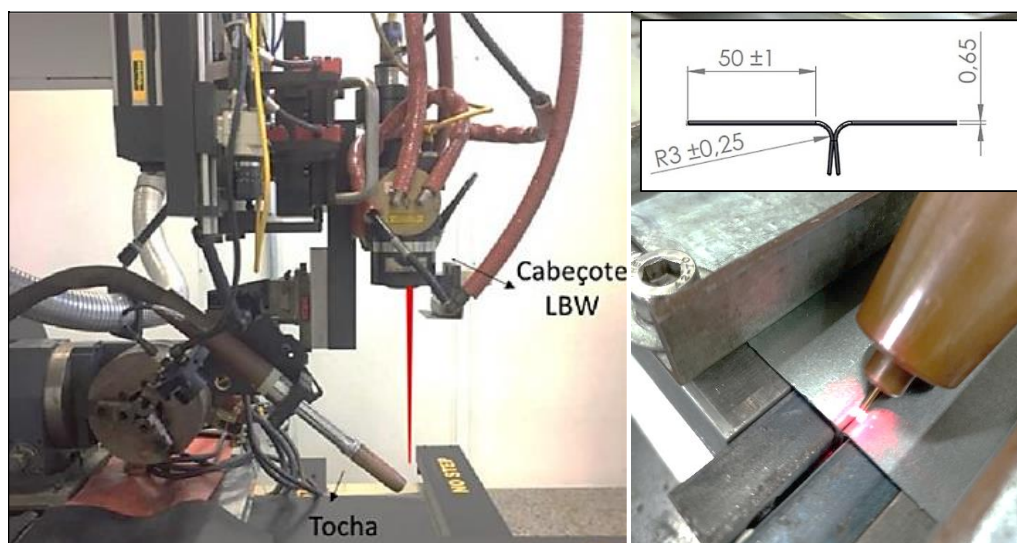
MAKWANA et al., (2018) afirmaram que a resistência mecânica pode aumentar devido à presença de camadas intermetálicas. Porém, as camadas intermetálicas têm elementos de elevada dureza, logo é necessária atenção pois seu excesso pode fragilizar a junta.

Com base no exposto, o objetivo deste trabalho é identificar se existe diferença na quantidade de zinco nos cordões de solda-brasagem a laser com feixe único entre dois métodos de alimentação de arame, puxando e empurrando. Adicionalmente, foi avaliada a presença da camada de ferro-silício bem como a sua espessura, correlacionando com o aporte térmico. Para alcançar esses objetivos, foi feita caracterização química via espectroscopia de raios-X por energia dispersiva (EDS) do cordão brasado para os diferentes métodos de alimentação. Todas essas análises foram feitas para duas espessuras de chapas 0,65 mm e 1 mm.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os equipamentos, o *setup* do processo da solda-brasagem a laser e o desenho da junta utilizada. Um cabeçote laser (LBW) e uma tocha de alimentação de arame estão acoplados à um sistema CNC com três eixos (XYZ) de movimentação. Foi utilizada uma fonte Trumf 10002 para a geração do feixe de laser, com características apresentadas na Tabela 1.

Figura 4 - Equipamentos e configuração de junta utilizados



Fonte: Os autores (2024)

Tabela 1 - Características da fonte Trumf 10002 Disk

Tipo de geração de Laser	Disco
Potência máxima	10 kW
Comprimento de onda	1030 nm
Distância focal - mínima	450 mm
Diâmetro focal - mínimo	600 μ m

Os materiais selecionados para o processo de brasagem a laser foram chapas de aço galvanizada por imersão a quente com cristais minimizados de 0,65 mm e 1,0 mm de espessura, o arame de brasagem utilizado é o cobre-silício, Liga 513 - *Harris Product Group*. A Tabela 2 e Tabela

3 mostram a composição química da chapa e do arame de adição, respectivamente.

Tabela 2 - Composição química (% peso) da chapa de aço galvanizada

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr
0,04	0	0,18	0,013	0,005	0,032	0,02	0,02

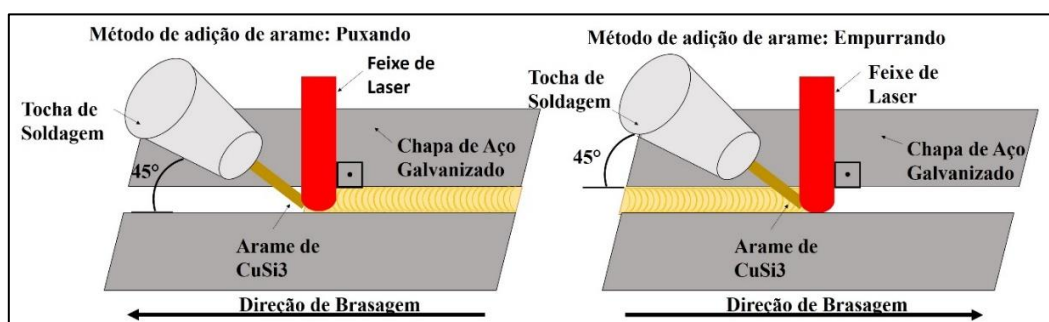
Tabela 3 - Composição química (% peso) do metal de adição

Cu	Si	Mn	Fe	Sn	Zn
Rest.	2,8 - 4	0 - 1,5	0 - 0,5	0 - 1,0	0 - 1,0

A configuração da junta brasada foi definida com base no trabalho de Filiard *et al.* (2017) conforme mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

A posição da tocha em relação a chapa para os dois métodos (puxando e empurrando o arame) é observada na Figura 4. A Tabela 4 mostra os parâmetros utilizados para os dois métodos, devido a diferença na configuração de alimentação e para obter a mesma qualidade superficial do cordão, não foi possível realizar com os mesmos parâmetros. Para o método empurrando o aporte térmico ficou mais alto (2,5 kJ/m) comparado com o puxando (1,25 kJ/m), o impacto dessa diferença será discutido ao longo dos resultados.

Figura 4 - Métodos puxando e empurrando o arame de adição



Fonte: Os autores (2024)

Tabela 4 - Parâmetros de solda-brasagem a laser para as chapas finas e grossas

Método de Adição de Arame:	Empurrando	Puxando
Diâmetro do Arame	Ø 1 mm	Ø 1 mm
Diâmetro do Feixe do Laser	Ø 2 mm	Ø 2 mm
Potência do Laser	2,5 kW	3,2 kW
Velocidade de Alimentação	3,4 m/min	6,4 m/min
Velocidade de Brasagem	1 m/min	2,56 m/min
Energia de Brasagem	2,5 kJ/m	1,25 kJ/m
Relação V_a/V_b ¹	3,4	2

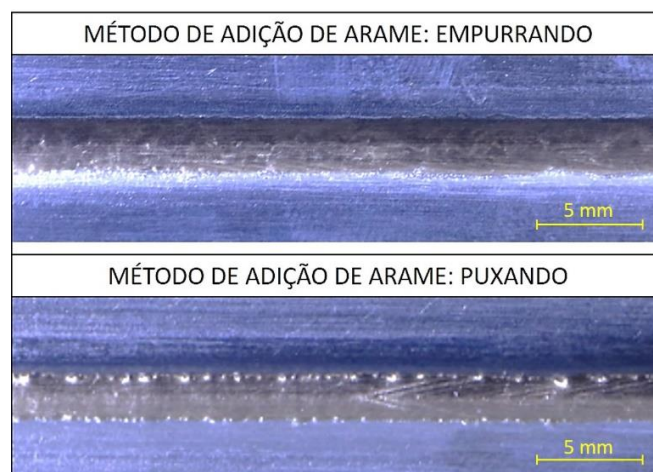
¹ - Relação entre velocidade de alimentação de arame pela velocidade de brasagem (velocidade de deslocamento da tocha).

Ao todo foram realizados 4 cordões brasados (1 - Empurrando com chapa fina; 2 – Empurrando com chapa grossa; 3 - Puxando com chapa fina; 4 – Puxando com chapa grossa). Para cada cordão analisou-se 1 secção transversal, totalizando 4 amostras. Por fim, para cada amostra foi executada a caracterização química via EDS para quantificar a presença de zinco nas diferentes regiões da amostra e avaliou-se a espessura da camada intermetálica de ferro-silício na interface entre os metais de base e de adição.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

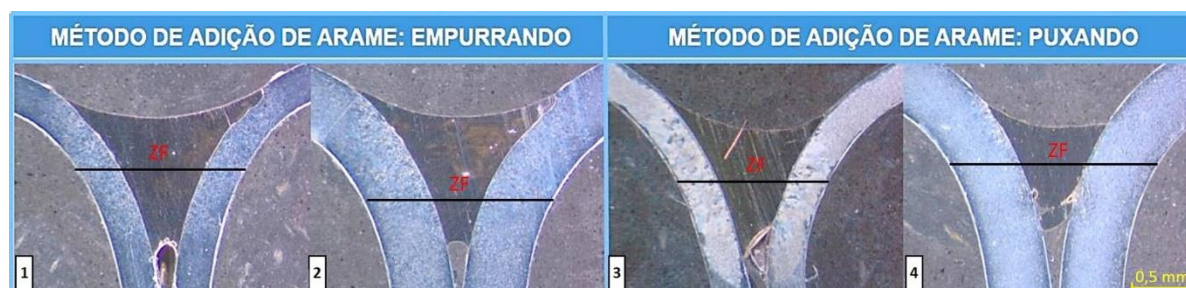
O aspecto da face superior de ambos os métodos pode ser observado na Figura 5. Mesmo com diferentes aportes térmicos a qualidade se mostrou igualmente satisfatória. Porém, através das análises de seções transversais dos cordões, notou-se uma melhor molhabilidade na raiz do cordão para o método empurrando, isto é, o ângulo de contato da zona fundida com a chapa zincada (indicado pelas setas amarelas) foi menor como observado na Figura 6. Como a raiz do cordão está longe da alimentação, essa diferença está relacionada com o aporte térmico mais alto que, favorece a molhabilidade. As linhas pretas da Figura 6 representam a região que foi realizada a análise de EDS.

Figura 5: Qualidade superficial de ambos os métodos.



Fonte: Os autores (2024)

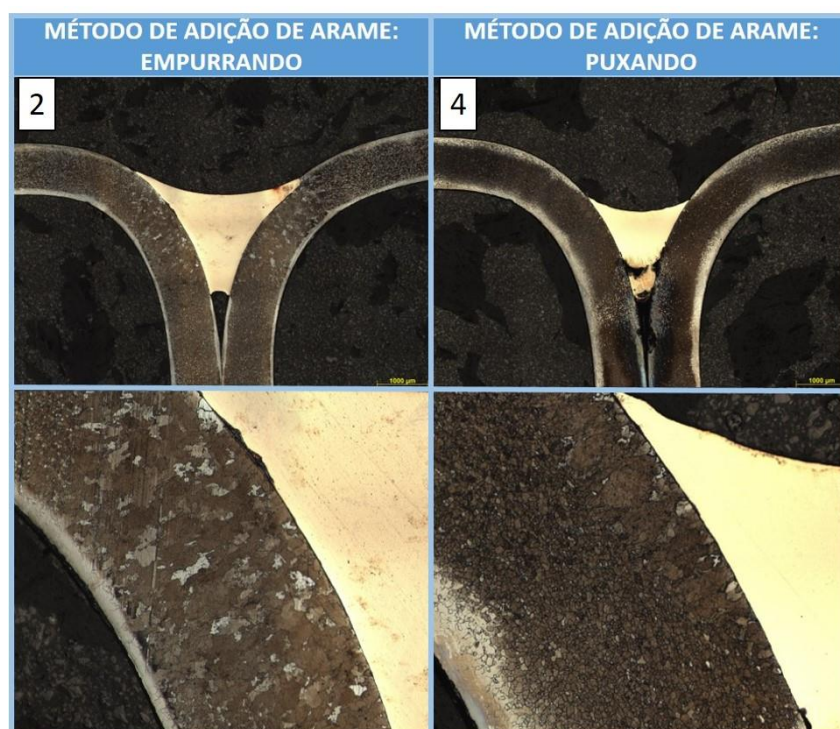
Figura 6 - Comparativo das seções transversais de ambos os métodos. 1 – Chapa fina empurrando, 2 – Chapa grossa empurrando, 3 – Chapa fina puxando, 4 – Chapa grossa puxando



Fonte: Os autores (2024)

Na Figura 7 é possível observar a diferença de tamanho de grão entre as amostras 2 e 4. Tendo em vista que o método de alimentação do arame por si só não é capaz de modificar a metalurgia do material de base, pode-se afirmar que tal variação é resultado da diferença de aporte térmico dos processos sendo, neste caso, maior no método empurrando do que no método puxando, resultando em um crescimento excessivo dos grãos. Nota-se que para o método puxando os grãos maiores concentram-se na interface entre o aço galvanizado e o metal de adição, diferentemente dos grãos do método empurrando que se distribuem de forma homogênea ao longo da seção transversal da chapa.

Figura 7 - Microscopia Ótica das amostras de ambos os métodos



Fonte: Os autores (2024)

A Figura 8 (A) mostra o resultado de EDS para a amostra 1. A posição de intersecção entre a linha azul, que representa o valor de ferro presente na chapa, e a linha laranja, que representa o valor de cobre presente no metal de adição, indica a interface da zona fundida com o metal de base. Sendo assim, a zona fundida corresponde à região entre 900 e 2000 µm e é detalhada na Figura 8 (B). Neste caso, é possível notar valores elevados de Zn na zona fundida, indicando que parte do revestimento ficou retido no cordão brasado. Adicionalmente, os picos nas extremidades do gráfico indicam que o revestimento de zinco da camada externa foi preservado.

A Figura 9 mostra os resultados de EDS para as 4 amostras, visualmente não fica tão claro se existe diferença significativa na quantidade média de zinco na zona fundida entre os métodos puxando e empurrando para as chapas finas e grossas, portanto foi feito uma análise de variância *one way*.

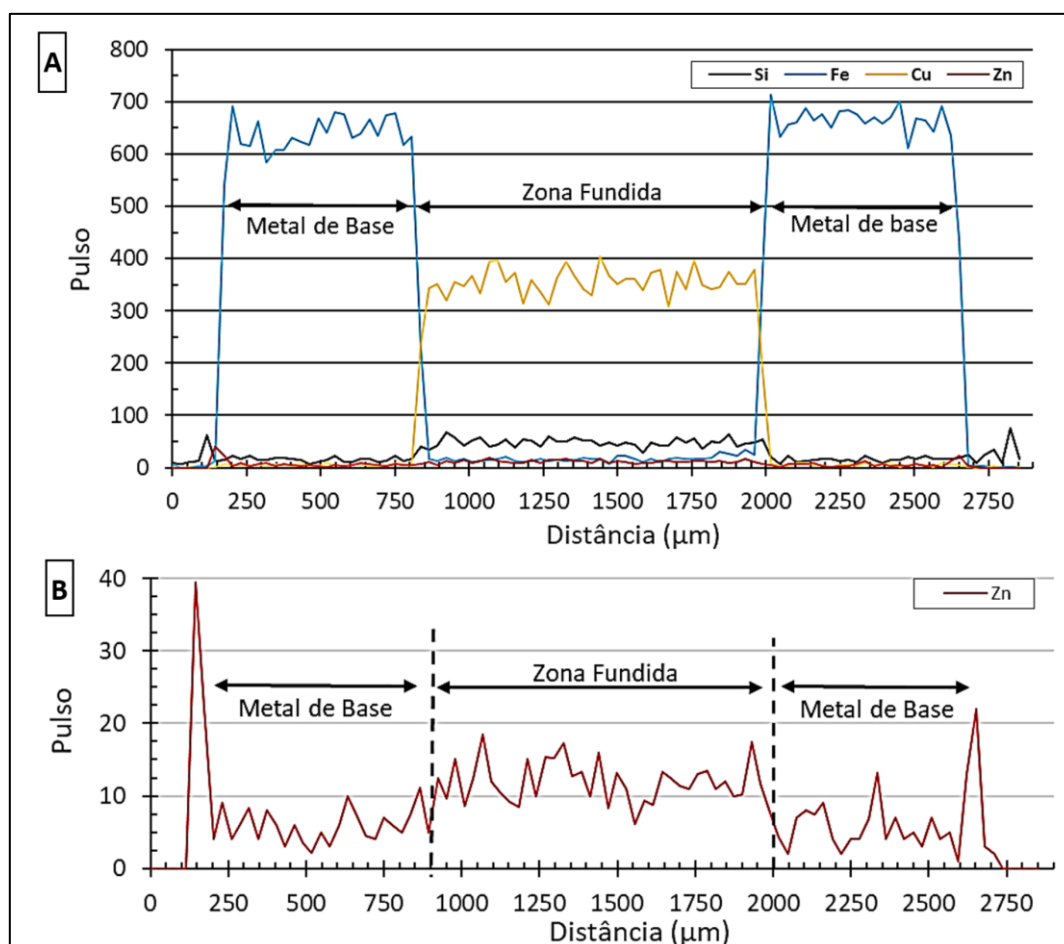
O quadro ANOVA da Figura 10 mostra que foi obtida uma distribuição do erro aleatório em torno do zero em forma de gaussiana, indicando que o modelo estatístico ANOVA *One Way* é apropriado. Para a chapa fina, estatisticamente existe uma diferença significativa entre as médias de zinco na zona fundida para os dois métodos de alimentação, neste caso foi detectado menos zinco para o método empurrando, resultado que corroboraria com a hipótese de que o laser a frente faz uma limpeza do revestimento durante o processo de solda-brasagem. Em contrapartida, para o método empurrando a energia de brasagem é mais alta, então podia-se esperar que houvesse uma limpeza mais significativa do zinco, porém isso não se repetiu para a chapa grossa.

Para a chapa grossa, como dito anteriormente, não foi constatado uma diferença significativa entre as médias, isso significa que elas são estatisticamente iguais mesmo com aporte de energias diferentes. Além disso as duas médias de zinco na zona fundida para as chapas grossas ficaram abaixo em relação às chapas finas, apontando que para os dois métodos de alimentação a limpeza do zinco foi mais preponderante durante a solda-brasagem das chapas grossas. Com esses resultados não está clara a correlação entre quantidade de zinco na zona fundida, espessura de chapa e aporte térmico.

Através da sequência de imagens de alta velocidade publicadas por Ferraresi et al. (2024) percebe-se que o laser não incide à frente da poça de fusão para a técnica empurrando, pois, as gotas líquidas de zinco se formam adjacente à poça de fusão e são engolidas antes da evaporação. Portanto sugere-se que as gotículas de zinco se formam por condução de calor da poça de fusão e não devido ao laser, seguindo essa lógica, para o método puxando o fenômeno da formação do zinco líquido adjacente a poça de fusão seria o mesmo ou até mesmo mais significativo e que o laser não é capaz de tocar a chapa para evaporar o zinco.

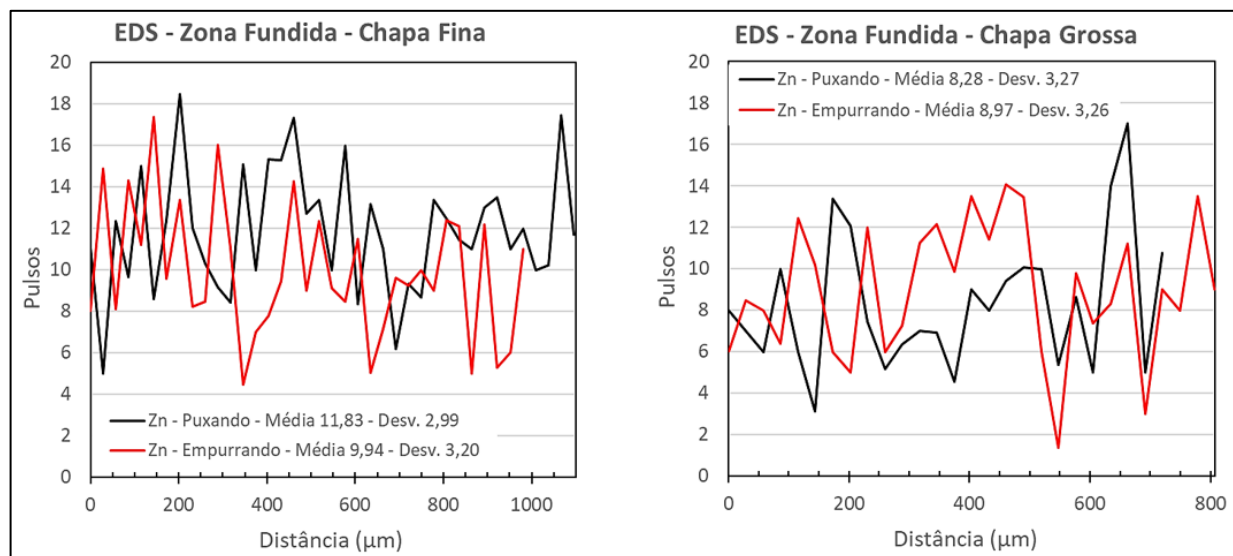
Portanto, conclui-se que a diferença significativa entre as médias de zinco observadas para as chapas finas foi ao acaso e que, nas condições deste trabalho as técnicas puxando ou empurrando não impactou na mitigação do zinco na poça de fusão. Mais adiante, o mapa de composição química em torno da interface da chapa galvanizada confirma que para ambos os métodos de alimentação a evaporação do zinco foi igualmente efetiva para as chapas finas e grossas.

Figura 8 - Resultado de EDS para a amostra 1. A – Com os elementos Silício, Ferro, Cobre e Zinco. B – Somente com o Zinco



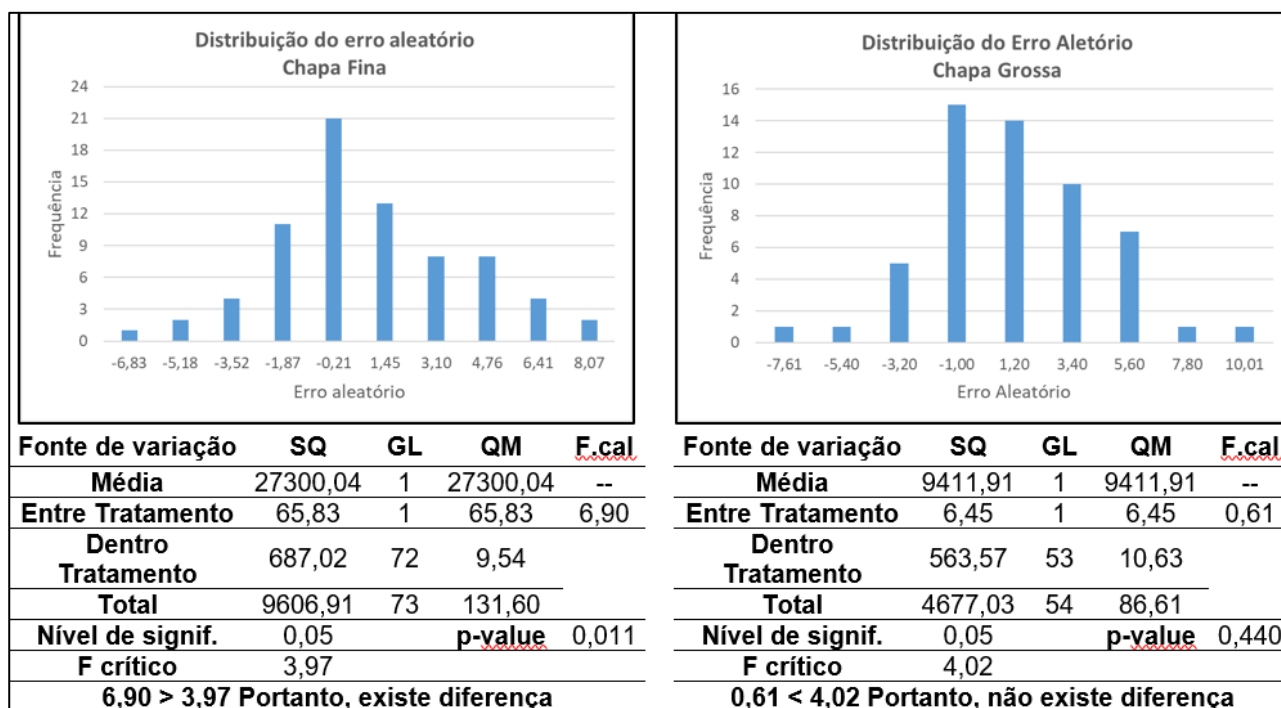
Fonte: Do autor (2024)

Figura 9 - Resultados de EDS (zinco) para a chapa fina e grossa para os métodos puxando e empurrando



Fonte: Os autores (2024)

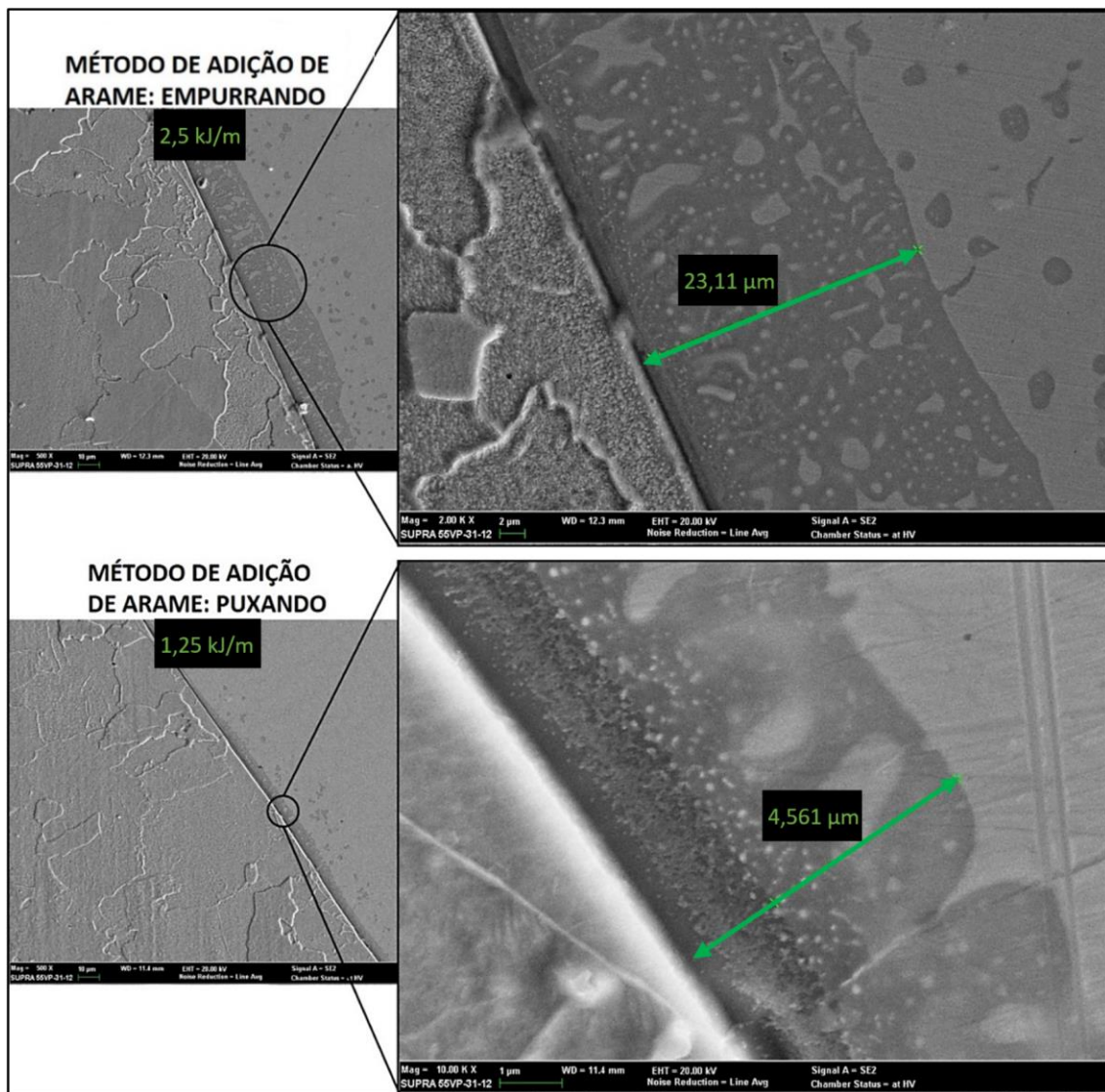
Figura 10 - Quadro ANOVA One Way para chapa fina e chapa grossa



Fonte: Os autores (2024)

Partindo para a análise da camada intermetálica de ferro-silício, conforme relatado na revisão, adicionar mais energia ao processo faz com que a camada intermetálica fique maior. De fato, notou-se uma maior espessura de camada para o método empurrando (23,11 μm com aporte de 2,5 kJ/m), que teve maior aporte térmico e corroborou com MAKWANA et al., (2018). Na Figura 11 é possível observar a medição das camadas intermetálicas.

Figura 11 – Medição da espessura da camada intermetálica

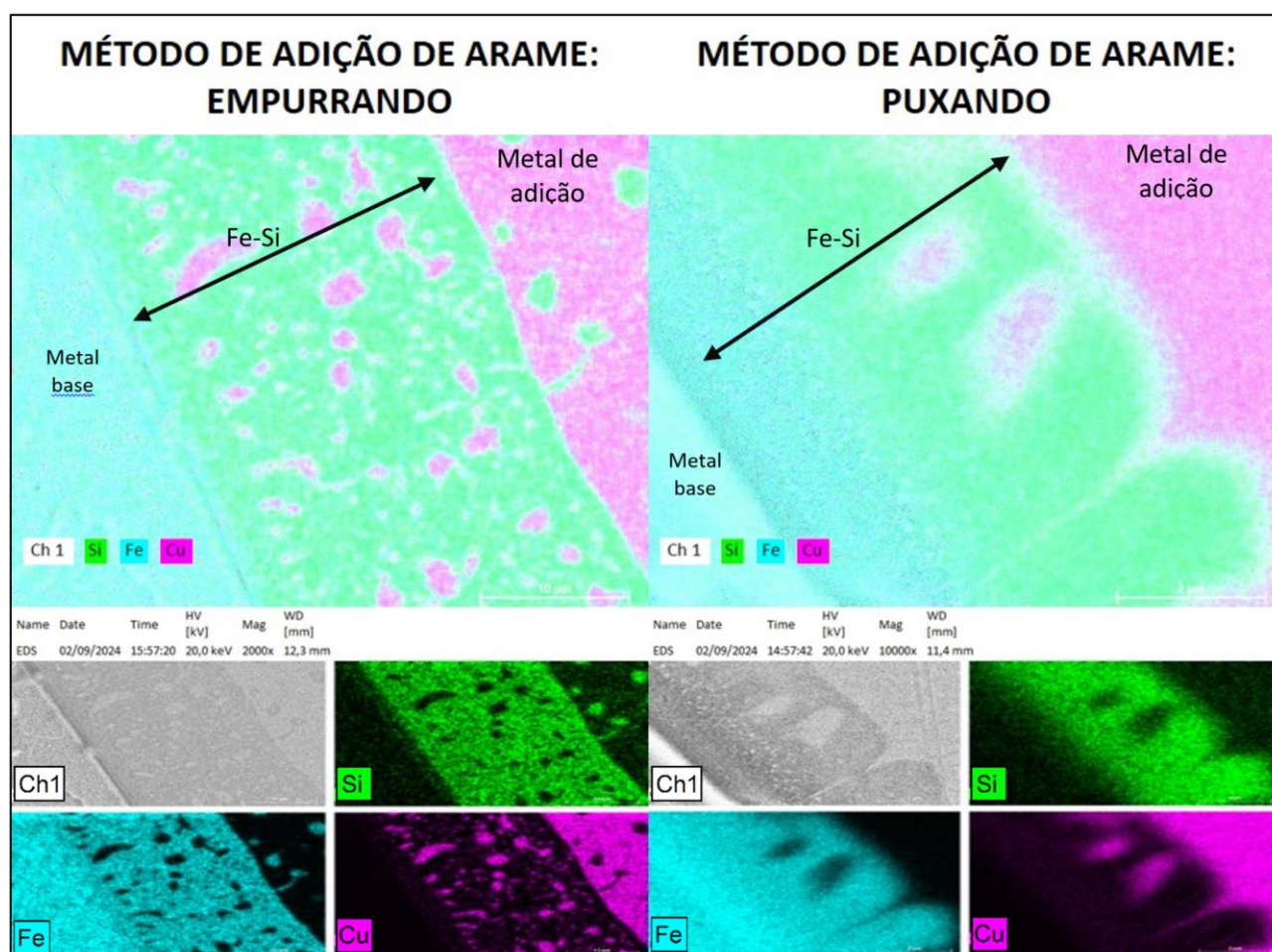


Fonte: Os autores (2024)

Visando confirmar os elementos presentes na camada intermetálica foi realizado um mapa de EDS na interface entre o metal de base e o metal de adição. A partir da análise foi confirmada a presença de Fe-Si nesta região, comprovando que se trata de uma camada intermetálica, que possui, segundo a literatura, elevada dureza e resistência mecânica, conforme exposto na Figura

12. Além disso, não foi detectada no mapa a presença de zinco, confirmando que a limpeza da camada foi igualmente efetiva para os diferentes métodos de adição de arame independente do aporte do térmico.

Figura 12 – Análise de EDS da camada intermetálica



Fonte: Os autores (2024)

O método de adição de arame empurrando obteve maior espessura de camada intermetálica sugerindo um possível aumento da resistência mecânica, em contrapartida foi constatado aumento no tamanho de grão que tende a diminuir a resistência mecânica. Para o método de adição puxando

obteve-se menor espessura de camada intermetálica, mas um menor tamanho de grão da microestrutura. Uma análise de resistência mecânica através de ensaios de tração confirmaria se a espessura de camada intermetálica tem maior ou menor influência sobre resistência mecânica que o tamanho de grão da microestrutura.

4 CONCLUSÃO

A respeito da qualidade superficial, para ambos os métodos foi satisfatório, mas o método empurrando mostrou melhor molhabilidade na raiz do cordão devido ao maior aporte térmico. O método empurrando resultou em maior crescimento dos grãos, o que pode reduzir a resistência mecânica da junta brasada, enquanto o método puxando teve grãos maiores concentrados na interface. Foi confirmada a diferença significativa da quantidade de zinco na zona fundida entre os métodos de alimentação para a chapa fina, mas não se confirmou para a chapa grossa. Entretanto, através das análises de literatura de imagens de alta velocidade e do mapa EDS de composição química analisados confirma que para diferentes métodos de alimentação de arame a limpeza do zinco foi igualmente efetivo, independente do aporte do térmico e da espessura de chapa. O método empurrando resultou em uma maior espessura de camada intermetálica correlacionado com o maior aporte térmico, indicando maior resistência mecânica, porém com maior tamanho de grão que pode reduzir a resistência mecânica.

REFERÊNCIAS

AWS A3.0M/A3.0 (2020). Standard welding terms and definitions; including terms for adhesive bonding, brazing, soldering, thermal cutting, and thermal spraying

HOFFMANN P., KUGLER P., SCHWAB J. **Prozess und systemtechnik für das laserstrahlhartlöten**, DVS-Berichte Band Düsseldorf. DVS-Verlag 231 207–210. 2004.

KRISHNAJA, D.; CHEEPU, M.; VENKATESWARLU, D. A Review of Research Progress on Dissimilar Laser Weld-Brazing of Automotive Applications. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 330, p. 012073, mar. 2018.

MOHAMMADPOUR, M. *et al.* Influence of laser beam inclination angle on galvanized steel laser braze quality. **Optics & Laser Technology**, v. 129, p. 106303, set. 2020.

MATTULAT, T.; KÜGLER, H.; VOLLERTSEN, F.; Investigations on the occurrence of different wetting regimes in laser brazing of zinc-coated steel sheets. **Welding in the World**, v. 64, n. 3, p. 449–456, 25 jan. 2020.

FERRARESI, H. N. *et al.* Aplicação da Brasagem a Laser no Setor Automotivo-Conceitos e Parametrização (*Application of Laser Brazing in the Automotive Sector-Concepts and Parameterization*). [s.l: s.n.].

GUIMARAES, A. S. *et al.* An evaluation of the behaviour of a zinc layer on a galvanised sheet, joined by MIG brazing. **Welding International**, v. 21, n. 4, p. 271–278, 1 abr. 2007.

MITTELSTÄDT, C. *et al.* Two-beam laser brazing of thin sheet steel for automotive industry using Cu-base filler material. **Physics Procedia**. Anais...Elsevier B.V., 2014j. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.077>.

REIMANN, W. *et al.* Three-beam laser brazing of zinc-coated steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 1–4, p. 317–328, 1 abr. 2017k. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9361-2>.

YU, Z. S. *et al.* Joint evolution and strengthening mechanisms in arc brazed galvanized steels with Cu₉₇Si₃ filler. **Materials Science and Technology**, v. 20, n. 11, p. 1479-1483, 2004. DOI: 10.1179/026708304225022133.

MAKWANA, P. *et al.* Fast responsive control of current and voltage waveforms for gas metal arc brazing of thin zinc-coated steel sheets. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 254, p. 171–178, 1 abr. 2018.

FILLIARD, G. *et al.* Industrial fluxless laser weld-brazing process of steel to aluminium at high brazing speed. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 25, p. 104–115, 1 jan. 2017.