

Análise da Formação de Macrossegregações em Reparos por Soldagem Utilizando Diferentes Variantes do Processo MIG/MAG em Aços Inoxidáveis Dissimilares

Noraney do Rosario Freiria Rosa¹ , Sérgio Luiz Henke¹ 

¹ Universidade Federal do Paraná – UFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura – PPGEM, Curitiba, PR, Brasil.

Como citar: Rosa NRF, Henke SL. Análise da formação de macrossegregações em reparos por soldagem utilizando diferentes variantes do processo MIG/MAG em aços inoxidáveis dissimilares. Rev. Soldag. Insp. 2025;30:e3017. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI30.17>

Resumo: Macrossegregações em soldas são imperfeições de natureza metalúrgica que, na maioria das vezes, se formam durante a união de materiais dissimilares, podendo comprometer a qualidade da região soldada. O presente estudo teve como objetivo analisar a formação de macrossegregações durante a simulação de reparos por soldagem em regiões degradadas por cavitação, utilizando diferentes variantes do processo MIG/MAG e envolvendo a união de um aço inoxidável austenítico e um aço inoxidável martensítico. Foram realizados depósitos do tipo *bead on plate* empregando distintos modos de transferência metálica: curto-circuito convencional com e sem tecimento, curto-circuito controlado por CMT (*Cold Metal Transfer*), globular, spray e pulsado. Foi utilizado o aço inoxidável austenítico AISI 309 como metal de adição e o aço inoxidável martensítico grau CA-6NM como material-base. A caracterização microestrutural revelou a presença de macrossegregações na forma de ilhas e penínsulas na interface soldada entre os materiais. Essas imperfeições foram menos expressivas nos processos com transferência CMT e curto-circuito convencional sem tecimento quando comparadas às demais variantes. Dentre os diversos modos de transferência analisados, o modo por curto-circuito, tanto o convencional quanto o controlado por CMT, destacou-se por apresentar menor formação de macrossegregações, sendo o CMT o mais eficaz na obtenção de baixos índices de diluição.

Palavras-chave: Soldagem dissimilar; CMT; Macrossegregação.

Analysis of Macrosegregation Formation in Welding Repairs Using Different Variants of the MIG/MAG Process in Dissimilar Stainless Steels

Abstract: Macrosegregations in welds are metallurgical imperfections that often form during the joining of dissimilar materials, potentially compromising the quality of the welded region. This study aimed to analyze the formation of macrosegregations during simulated welding repairs in areas degraded by cavitation, using different variants of the MIG/MAG process and involving the joining of an austenitic stainless steel to a martensitic stainless steel. Bead-on-plate deposits were carried out employing various metal transfer modes: conventional short-circuit with and without weaving, Cold Metal Transfer (CMT), globular, spray, and pulsed. Austenitic stainless steel AISI 309 was used as filler metal, and martensitic stainless steel CA-6NM was used as the base material. Microstructural characterization revealed the presence of macrosegregations in the form of islands and peninsulas at the welded interface between the materials. These imperfections were less pronounced in the CMT and conventional short-circuit without weaving processes compared to the other variants. Among the various transfer modes analyzed, the short-circuit mode, both conventional and CMT-controlled, stood out for presenting lower macrosegregation formation, with CMT being the most effective in achieving low dilution levels.

Key-words: Dissimilar welding; CMT; Macrosegregation.

1. Introdução

Nas usinas hidroelétricas, a erosão por cavitação ocorrida na superfície dos componentes de turbinas hidráulicas, em particular os rotores, além de influenciar no desempenho deste tipo de equipamento, induz a necessidade periódica de serem efetuados reparos por soldagem das áreas cavitadas [1]. Tais reparos resultam não só na indisponibilidade temporária do fornecimento de energia da unidade geradora, mas também na possibilidade de introdução de defeitos, alterações microestruturais e tensões residuais sobre o material dos rotores culminando muitas vezes no surgimento de trincas por fadiga ou até mesmo na fratura catastrófica de suas pás.

Recebido: 01 Ago., 2025. Aceito: 13 Out., 2025.

E-mails: noraneyrosa@ufpr.br (NRF), henke@ufpr.br (SLH)

Editor: Hélio Cordeiro de Miranda



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença [Creative Commons Attribution](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Os rotores das turbinas hidráulicas utilizados na geração de energia são fabricados em sua maioria por fundição utilizando aços inoxidáveis martensíticos e, devido à alta temperabilidade de tais aços, existe razoável risco da formação de trincas por hidrogênio na zona termicamente afetada (ZTA) [2]. De forma a minimizar tal risco, opta-se por efetuar a soldagem utilizando como metal de adição aços inoxidáveis austeníticos, pois os mesmos apresentam maior solubilidade ao hidrogênio diminuindo o risco de trincas a frio [2]. Além desta característica, devido às suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão, os aços inoxidáveis austeníticos são reconhecidos por apresentarem boa resistência à cavitação e têm sido empregados há muitos anos como revestimentos soldados para proteger turbinas hidráulicas [3].

Um dos fatores que influenciam a resistência à cavitação em soldas de reparo está relacionado ao grau de diluição entre materiais dissimilares, considerando que, na maioria dos casos, o metal de adição apresenta composição distinta da do material de base. Além da variação generalizada na composição química do metal de solda, uma diluição incompleta, ou seja, uma mistura não homogênea, pode resultar na formação de macrossegregações, nas quais a composição e a microestrutura do metal de solda nas proximidades da linha de fusão apresentam diferenças significativas em relação ao restante do metal de solda.

Tais imperfeições, na forma de zonas parcialmente diluídas (ZPDs), as quais apresentam morfologia semelhante à formações geográficas, como ilhas, penínsulas ou praias de material-base cercadas por metal de solda com composição significativamente distinta, têm sido observadas em diferentes soldas de aços inoxidáveis austeníticos sobre aços carbono [4]. Segundo Kou [4], a formação de macrossegregações na forma de “ilhas” e “penínsulas” está associada principalmente ao arraste de uma camada de metal base líquido para o interior da poça de fusão. Parte desse líquido fica “presa” em regiões que se solidificam ao redor, formando áreas isoladas (ilhas) de composição diferente. Por outro lado, penínsulas aparecem quando esse líquido não fica totalmente isolado, mas sim conectado à região do material base adjacente à linha de fusão, resultando em regiões alongadas que se projetam para o interior da poça. Ao soldar um aço carbono com um aço inoxidável austenítico, muitas vezes existe uma camada (praia) de martensita entre o aço carbono e o metal de solda. A presença dessa camada de martensita tem sido relatada como um fator que favorece a nucleação de trincas induzidas por hidrogênio, bem como a suscetibilidade à corrosão generalizada e à corrosão sob tensão [4]. Estudos do efeito de macrossegregações por soldagem dissimilar tendo como material-base os aços inoxidáveis martensíticos são escassos. Em um destes trabalhos, Santa et al. [5], identificaram a formação de camada intermediária ao depositar uma liga austenítica contendo cobalto sobre o aço inoxidável martensítico 13Cr4Ni. Estes autores ressaltam o risco da presença da martensita no desenvolvimento de trincas por fadiga sobre esta camada intermediária.

A ocorrência de macrossegregações na soldagem de metais dissimilares está intimamente relacionada aos movimentos convectivos no interior da poça de fusão. Segundo Kou e Yang [6], uma convecção intensa e difusão no estado líquido podem diminuir a probabilidade do material-base líquido permanecer heterogêneo antes de atingir a frente de solidificação e solidificar. Esses movimentos convectivos são regidos por diversas forças atuantes na poça de fusão. No processo de soldagem MIG/MAG, destacam-se como principais mecanismos de condução do fluxo convectivo: a força de fluabilidade, a pressão exercida pelo arco elétrico, a força eletromagnética, o arrasto gerado pelo jato de plasma, o efeito Marangoni e o impacto das gotas de metal fundido [7]. Considerando que a magnitude e a direção dessas forças são influenciadas pelo modo de transferência metálica, isto é, a forma pela qual o metal fundido é transferido da ponta do eletrodo consumível para a poça de fusão, este estudo teve como objetivo investigar a influência dos diferentes modos de transferência na formação de macrossegregações no processo MIG/MAG.

2. Metodologia, Materiais e Métodos

Com o objetivo de simular um reparo de dano superficial causado por cavitação, foram realizados depósitos do tipo *bead on plate* empregando distintos modos de transferência metálica: curto-circuito convencional com e sem tecimento, curto-circuito controlado por CMT (*Cold Metal Transfer*), globular, spray e pulsado. Os parâmetros utilizados para obtenção das amostras são apresentados na Tabela 1. Em todas as amostras foi utilizado como gás de proteção uma mistura de argônio com 3% de CO₂. A vazão do gás de proteção foi de 15 litros/min. A Velocidade de avanço da tocha foi 5 mm/s e o ângulo de ataque utilizado em todas as variantes foi de 90°. Utilizou-se o aço inoxidável austenítico AISI 309 como metal de adição e o aço inoxidável martensítico grau CA-6NM como material base cujas composições químicas são apresentadas na Tabela 2.

Após a realização dos depósitos de solda, os mesmos foram submetidos ao preparo metalográfico nas seções transversais e longitudinais envolvendo corte, embutimento em resina bakelite, lixamento, polimento em alumina e ataque com reativo de Marble. Na sequência foram efetuadas análises via microscopia óptica e eletrônica de varredura com o objetivo de avaliar, entre outras características, o grau de macrossegregações, profundidade de penetração e o nível de diluição associados aos diferentes modos de transferência metálica empregados. A quantificação das macrossegregações foi obtida por meio da densidade linear (DL) de macrossegregações. A mesma foi realizada na seção longitudinal das amostras metalográficas, mediante a contagem do número de interceptações das regiões segregadas ao longo de uma linha de medição de comprimento L conforme Figura 1 e Equação 1.

$$DL = \frac{n}{L} \quad (1)$$

DL - Densidade Linear de macrossegregações; n número de macrossegregações interceptadas ao longo do comprimento L.

Tabela 1. Parâmetros utilizados para obtenção das amostras.

AMOSTRA Nr. - MODO DE TRANSFERÊNCIA	PARÂMETROS
1 - CURTO CIRCUITO OPERAÇÃO BRAÇO ROBÔ	Tensão: 19,9 V Corrente: 187A Velocidade alimentação do arame: 4,6 m/min Energia de soldagem: 0,75 kJ/mm
2 - CURTO CIRCUITO COM TECIMENTO OPERAÇÃO BRAÇO ROBÔ	Tensão: 24 V Corrente: 186 A Velocidade alimentação do arame: 4,6 m/min Velocidade de Oscilação: 2,5 mm/s Amplitude de tecimento: 4 mm; Energia de soldagem: 0,89 kJ/mm
3 - CURTO CIRCUITO CONTROLADO POR CMT OPERAÇÃO BRAÇO ROBÔ	Tensão: 14 V Corrente : 163 A Frequência: 120 Hz Velocidade alimentação do arame: 4,6 m/min Energia de soldagem: 0,46 kJ/mm
4 - GLOBULAR OPERAÇÃO SISTEMA DE DESLOCAMENTO AUTOMÁTICO DE TOCHA	Tensão: 24 V Corrente: 84 A Velocidade alimentação do arame: 3 m/min Energia de soldagem: 0,40 kJ/mm
5 - SPRAY OPERAÇÃO SISTEMA DE DESLOCAMENTO AUTOMÁTICO DE TOCHA	Tensão: 30,8 V Corrente: 248 A Velocidade alimentação do arame: 8 m/min Energia de soldagem: 1,53 kJ/mm
6 - PULSADO OPERAÇÃO SISTEMA DE DESLOCAMENTO AUTOMÁTICO DE TOCHA	Tensão: 23,3 V Corrente : 148 A Frequência: 105 Hz Velocidade alimentação do arame: 4,6 m/min Energia de soldagem: 0,69 kJ/mm

Tabela 2. Composição química do metal de adição AISI309 e material-base CA-6NM (%p).

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Nb	V	Fe
AISI309	0,056	0,39	1,67	0,014	0,001	23,6	13,2	0,09	0,07	0,001	0,005	0,174	Rest.
CA6NM	0,042	0,52	0,76	0,015	0,003	13,1	4,0	0,42	0,15	0,001	0,010	0,125	Rest.

A porcentagem de diluição entre o metal base e o material de adição foi determinada por meio de análise da composição química obtida via energia dispersiva de raios-X (MEV/EDS) sobre as amostras utilizadas na análise metalográfica. Os resultados de diluição foram determinados a partir da análise dos elementos Fe, Cr e Ni, por meio da aplicação da Equação 2. A diluição foi calculada individualmente para cada um dos três elementos, sendo posteriormente obtida a média dos valores.

$$D = \frac{(\% \text{ em peso de E})_{\text{no metal de solda}} - (\% \text{ em peso de E})_{\text{no metal de adição}}}{(\% \text{ em peso de E})_{\text{no metal base}} - (\% \text{ em peso de E})_{\text{no metal de adição}}} \quad (2)$$

D é a Diluição em % e E corresponde ao elemento químico presente na amostra.



Figura 1. Determinação da densidade linear de macrosegregações.

3. Resultados e Discussão

Em todas as amostras analisadas, verificou-se que as macrosegregações apresentam morfologia característica na forma de ilhas e penínsulas com estrutura martensítica, sendo estas desenvolvidas preferencialmente no fundo da poça (Figura 2). A formação preferencial de macrosegregações no fundo da poça de acordo com Wang e Tsai [8] estaria associada às baixas velocidades do líquido nessa região, à mistura limitada e à rápida solidificação. A Figura 3, exibe o resultado da análise de MEV/EDS sobre uma região de península, revelando que sua composição é similar à do material-base confirmando assim uma baixa agitação e/ou mistura da poça nesta região. Medidas de microdureza obtidas sobre as macrosegregações revelaram diferenças significativas entre os valores destas e o metal de solda adjacente (Figura 4). Quanto à rápida solidificação, a mesma foi verificada em todas as amostras, evidenciada pelo refino microestrutural próximo à linha de fusão (Figura 5), decorrente da maior taxa de resfriamento no fundo da poça. Além do fundo da poça, nas amostras em que se observou a formação de penetração primária do tipo *fingerlike penetration*, também foi constatada a presença de macrosegregações na zona de transição entre essa região e a penetração secundária. A presença de macrosegregações em duas regiões distintas pode estar relacionada à formação de um duplo vórtice no interior da poça de fusão, fenômeno previamente identificado por Cho e Na [7]. Observou-se também que a presença acentuada de penetração primária, do tipo *fingerlike penetration*, está diretamente associada ao aumento na incidência das macrosegregações.

Kou e Yang [6], descrevem por meio de experimentos envolvendo soldagem a arco com metais dissimilares, a formação de macrosegregações na forma de penínsulas ou ilhas com base na diferença entre a temperatura *liquidus* do metal de solda - TLW e a temperatura *liquidus* do material a base - TLB. De acordo com esses autores, as diferentes morfologias das macrosegregações, bem como a possibilidade de sua eliminação, estão associadas à diferença na temperatura *liquidus* do filme líquido de metal-base estagnado na interface entre o metal de solda e o material-base. Quando a temperatura *liquidus* do metal de solda é inferior à do líquido estagnado ($TLW < TLB$), o metal-base líquido, ao ser transportado por convecção para a região mais fria do metal de solda, a partir da camada estagnada ou de fluxo laminar, tende a solidificar rapidamente, resultando em empobrecimento de metal de adição. Essas regiões são comumente observadas em micrografias transversais ou longitudinais, aparecendo aproximadamente paralelas à linha de fusão.

A Tabela 3 apresenta os resultados de densidade linear de macrosegregações revelando variações significativas entre as amostras. O grau de diluição e profundidade de penetração são apresentados na Figura 6. Os resultados revelam baixos valores destas características para a amostra 3 na qual foi utilizado o modo de transferência em curto circuito controlado por CMT. Ressalta-se ainda que, por se tratar de um processo de recuperação de uma área cavitada, o depósito obtido deve apresentar baixa diluição com o metal de base, sendo essa característica mais acentuada na amostra 3 em comparação às demais. Por outro lado, foi constatada maior formação de macrosegregações na amostra 6 (deposição com modo pulsado) sendo a maior diluição observada na amostra 2 (deposição por curto-circuito com tecimento).

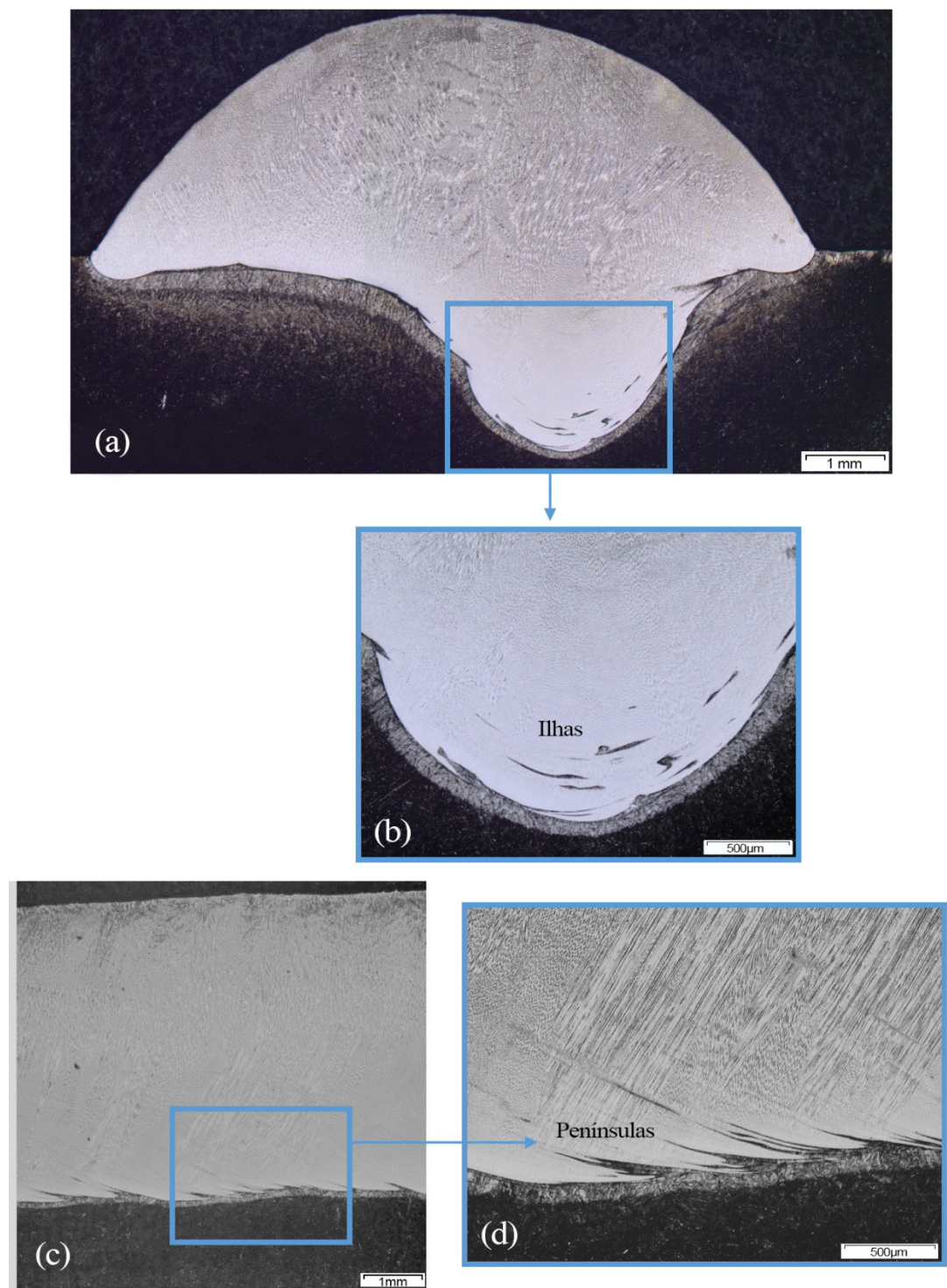


Figura 2. Imagens revelando a formação de macrosegregações na forma de ilhas e penínsulas junto à linha de fusão da amostra 6; seção transversal (a,b); seção longitudinal (c,d).

Tabela 3. Nível de macrosegregação ao longo do depósito em função do modo de transferência.

Amostra Nr - Modo de transferência	Macrosegregações/mm
1 - CURTO CIRCUITO	1,0 ± 0,4
2 - CURTO CIRCUITO TECIMENTO	1,4 ± 0,6
3 - CURTO CIRCUITO CMT	0,4 ± 0,2
4 - GLOBULAR	1,0 ± 0,5
5 - SPRAY	1,9 ± 0,8
6 - PULSADO	2,7 ± 1,0

Segundo Emami et al. [9], características de reduzidas penetração e diluição são típicas do processo CMT, uma vez que a entrada de calor é controlada e monitorada com maior precisão em comparação ao processo MIG/MAG convencional, alterando a duração do curto-circuito entre o material-base e o eletrodo. Estes autores afirmam ainda que valores elevados de corrente durante a soldagem MIG/MAG convencional tendem a produzir linhas de fusão mais irregulares, ou seja, resultante de *fingerlike penetration* e com isso alterações no fluxo convectivo favorecendo a formação de penínsulas. Por outro lado, Pickin e Young [10] destacam que a penetração no processo CMT nem sempre é constante podendo variar em função de parâmetros selecionados, em especial o tempo de permanência de curto circuito no qual um aumento neste parâmetro de 5 para 10 ms resulta em uma redução na penetração de aproximadamente 40%. Destaca-se que a menor incidência de macrosegregações observada na amostra 3, produzida pelo processo CMT (Figura 7), assim como na amostra 1, obtida por curto-circuito convencional (Figura 8), indica que o movimento convectivo característico do modo curto-circuito tem pouco efeito na remoção do metal líquido da zona estagnada em direção ao interior da poça de fusão minimizando assim a formação de penínsulas.

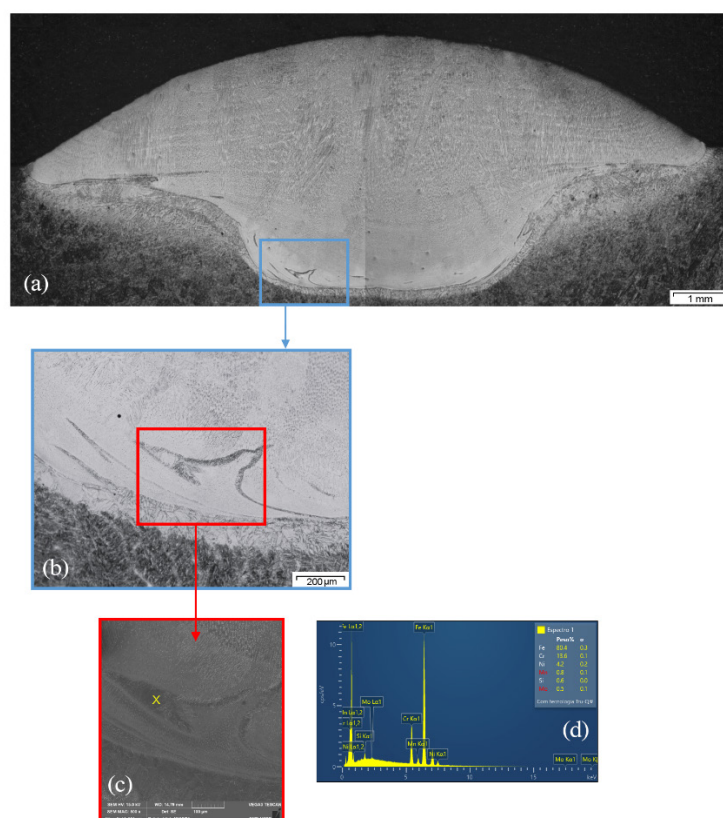


Figura 3. (a) Seção transversal da amostra 2 obtida por deposição em curto circuito com tecimento; (b) detalhe de (a) revelando localização de penínsulas; (c) imagem obtida via MEV de península em (b); (d) espectro de análise por EDS sobre península.

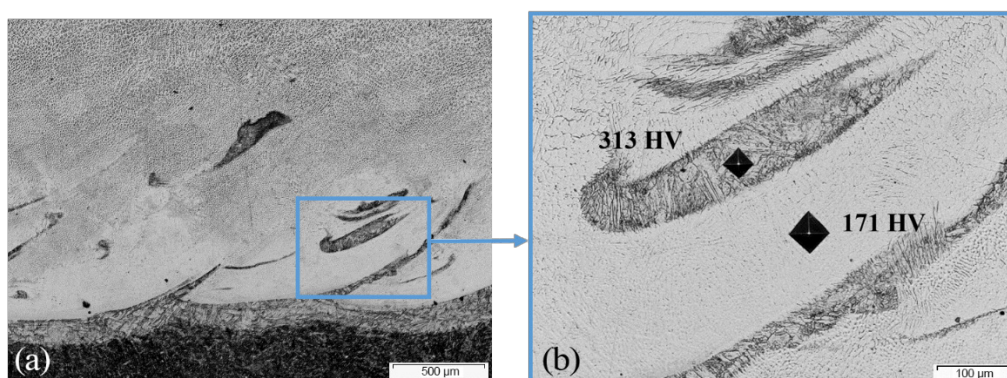


Figura 4. (a) Seção longitudinal revelando macrosegregações. (b) Região selecionada em (a) contendo valores de microdureza sobre macrosegregação e o metal de solda.

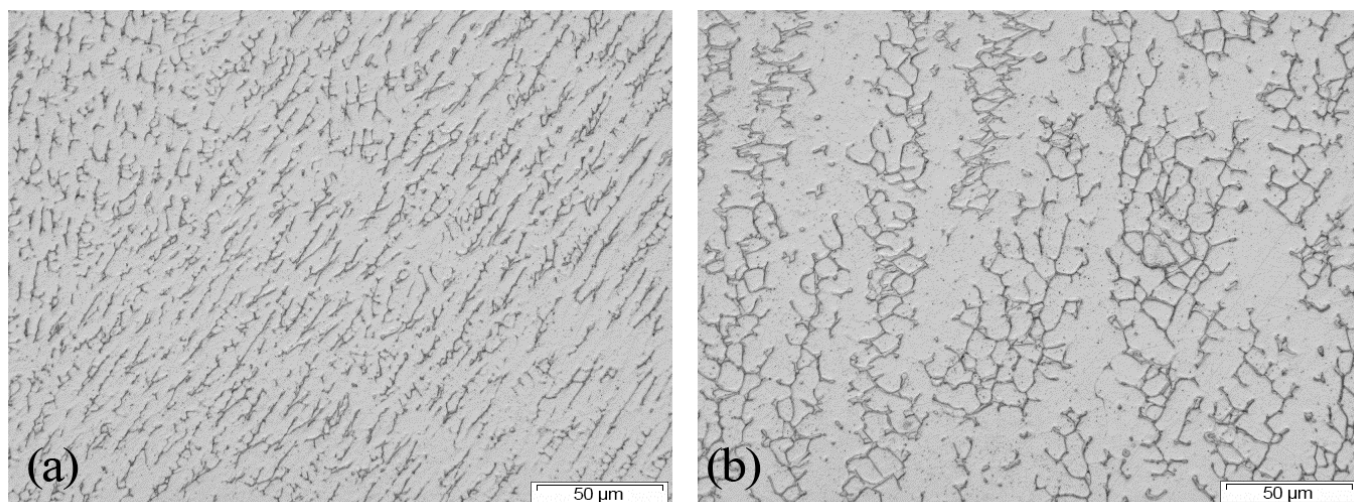


Figura 5. Imagens típicas do metal de solda das amostras (a) próximo à linha de fusão, (b) centro do cordão destacando a diferença no refino da estrutura.

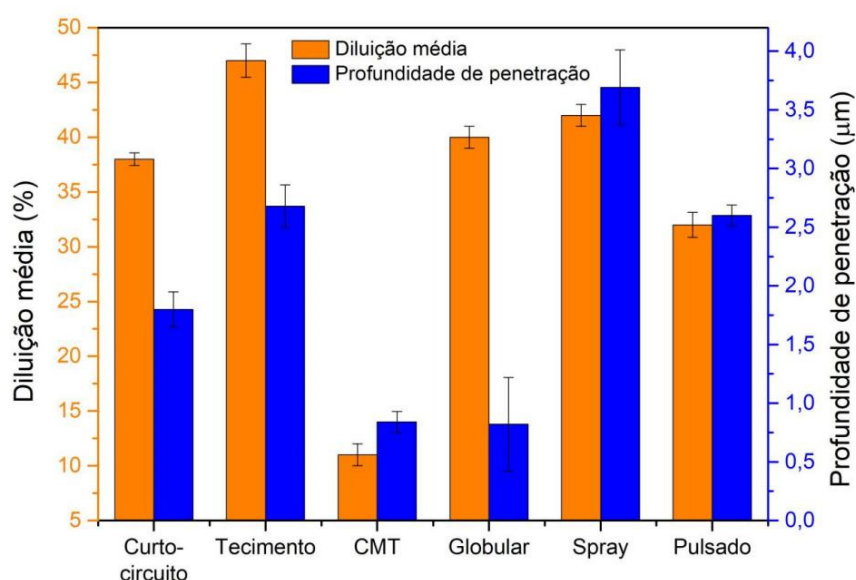


Figura 6. Porcentagem de diluição média e profundidade de penetração no metal de solda correspondente aos diferentes modos de transferências aplicados.

A aplicação de técnicas alternativas de deposição, como o tecimento e pulsação de corrente, as quais visam intensificar a agitação da poça de fusão, não se mostrou eficaz na mitigação da formação de macrosegregações. O movimento de tecimento, como o utilizado na amostra 2, apesar de ser empregado para otimizar determinados aspectos da soldagem, promoveu um aumento significativo na formação de macrosegregações bem como na diluição, ao que tudo indica em função da maior agitação da poça de fusão.

Na condição de deposição com pulsação de corrente (amostra 6), na qual, teoricamente assim como o tecimento também intensificaria a agitação da poça e, conseqüentemente, promoveria uma maior mistura entre os materiais dissimilares, observou-se, de forma paradoxal, a maior quantidade de macrosegregações (2,7/mm) entre as amostras avaliadas revelando que o aumento da agitação da poça por estes meios resulta, na realidade, em maior ocorrência de macrosegregações. Baeslack et al. [11] ao constatarem a formação de zonas não diluídas entre aços inoxidáveis usando MIG/MAG pulsado, também destacam que a formação de tais zonas é um fenômeno inesperado, pois, em geral, seria esperado que a mistura hidrodinâmica na região fundida impediria sua ocorrência. Desta forma, os autores concluem que as características do fluxo do fluido, mesmo com o uso da variante pulsada, permitem que grandes áreas do metal-base se liquefaçam, permaneçam relativamente estagnadas e se solidifiquem novamente.

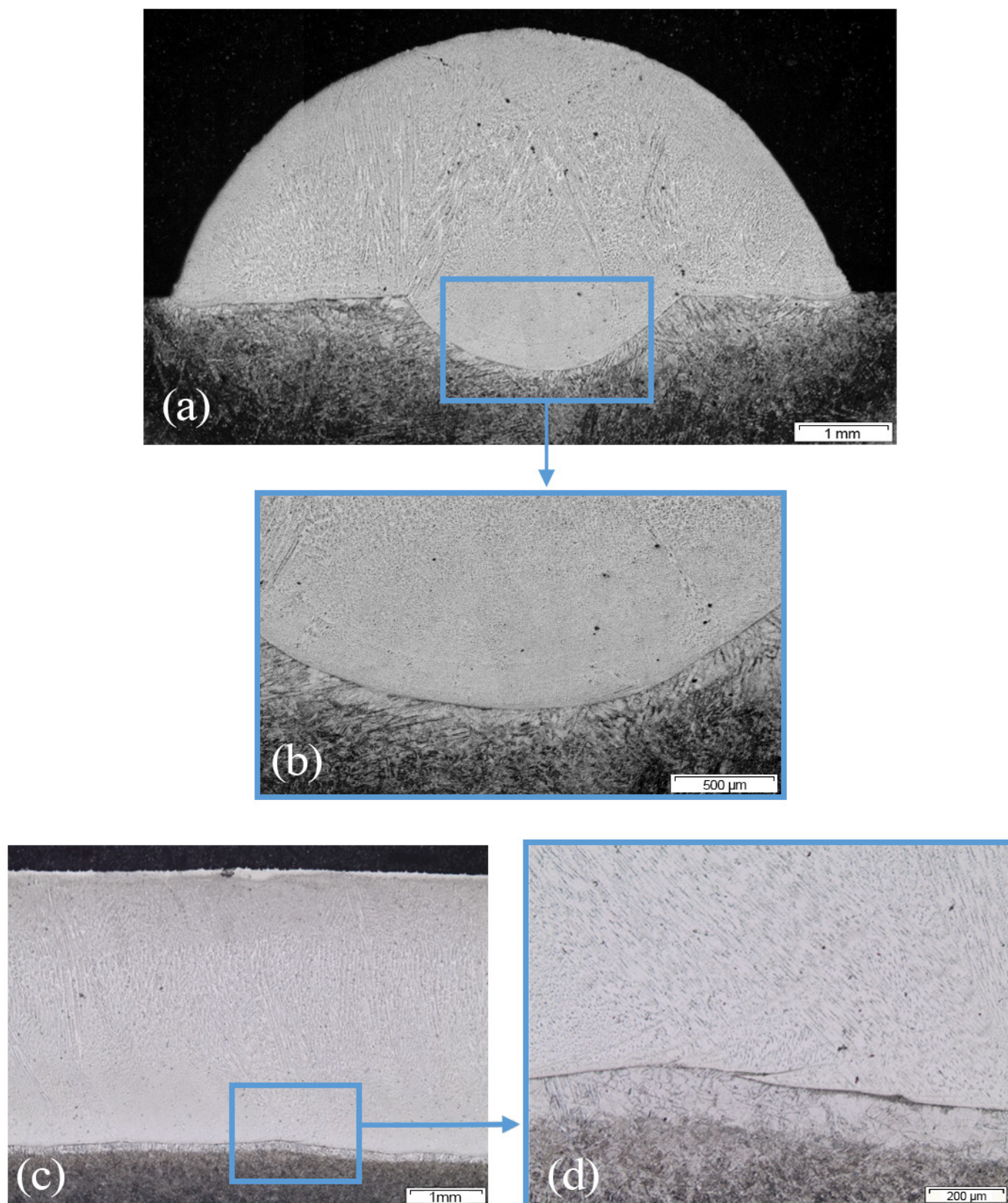


Figura 7. (a,b) Seção transversal da amostra 3 depositada pelo modo CMT. Reduzida formação de macrosegregações adjacentes à linha de fusão. (c,d) seção longitudinal.

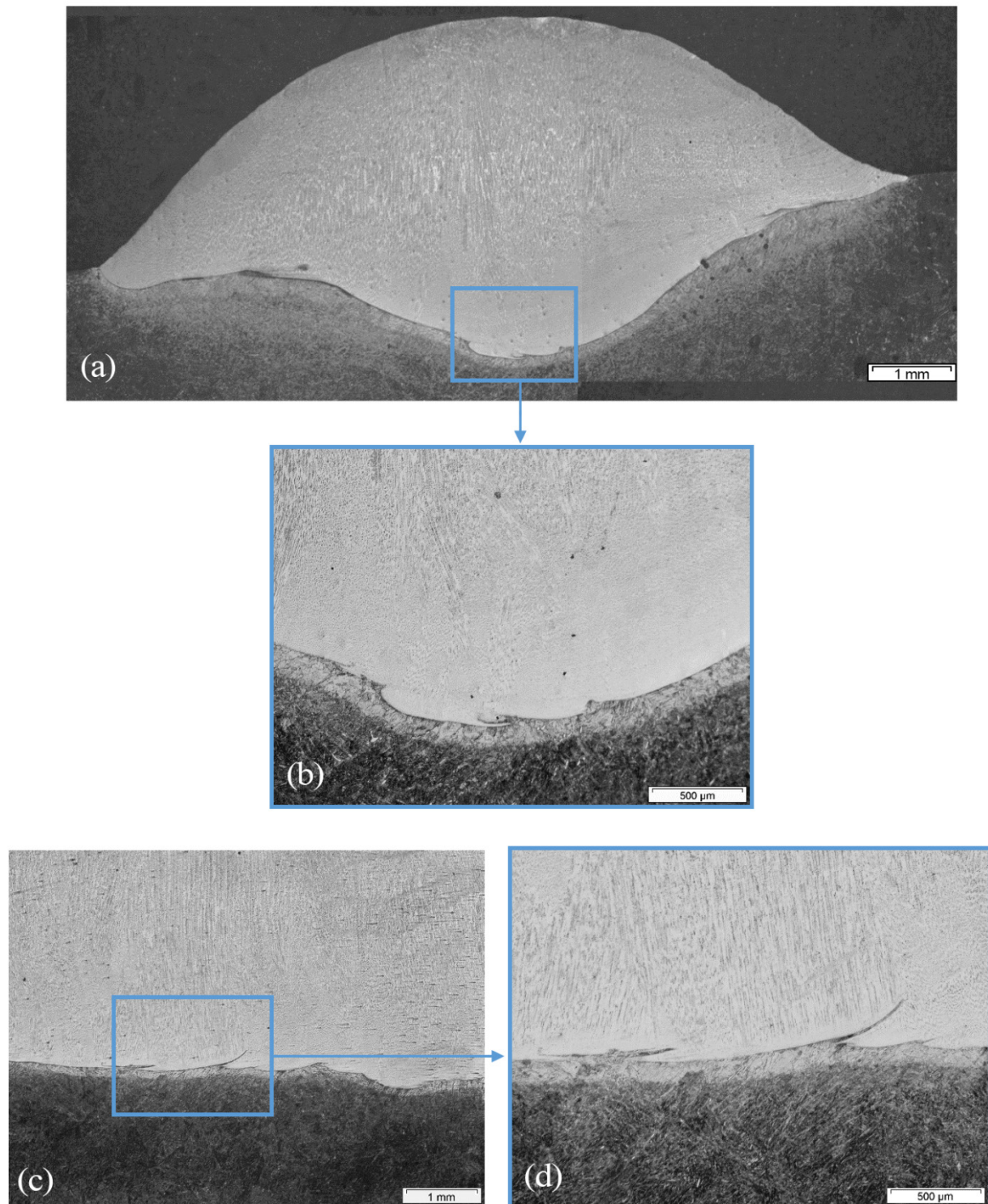


Figura 8. (a,b) Seção transversal da amostra 1 depositada pelo modo curto-circuito convencional. Reduzida formação de macrossegregações, adjacentes à linha de fusão.(c,d) seção longitudinal.

Com relação à formação de macrossegregações por deposição globular, amostra 4, é possível identificá-las, nas regiões inferior e superior da poça de fusão, adjacentes à linha de fusão em quantidades intermediárias em relação às demais amostras (Figura 9). Segundo Davies et al [12], a transferência das gotas metálicas influencia fortemente o padrão de fluxo dentro da poça de fusão. Estes autores, utilizando modelagem por elementos finitos, concluíram que em baixas taxas de transferência, típicas de baixa corrente de soldagem (100 A), as tensões superficiais relativas da poça e da gota, influenciam o fluxo de fluido dentro da poça de fusão, enquanto em taxas de transferência mais altas, típicas de corrente média (200 A), o fluxo é dominado pelo *momentum* das

gotícula impactantes. Wang e Tsai [13], por simulação, constataram que para o processo MIG/MAG com transferência globular, o *momentum* do impacto das gotas é convertido em energias cinética e potencial do fluido no banho de fusão e, por fim, é dissipado, enquanto a penetração da solda é causada principalmente pela força de tensão superficial (efeito Marangoni). Com base nisto, a tensão superficial se destaca como a principal força motriz que influenciou o fluxo do fluido na poça de fusão, promovendo uma penetração uniforme (ausência de *fingerlike penetration*) e baixa quantidade de macrosegregações nesta amostra.

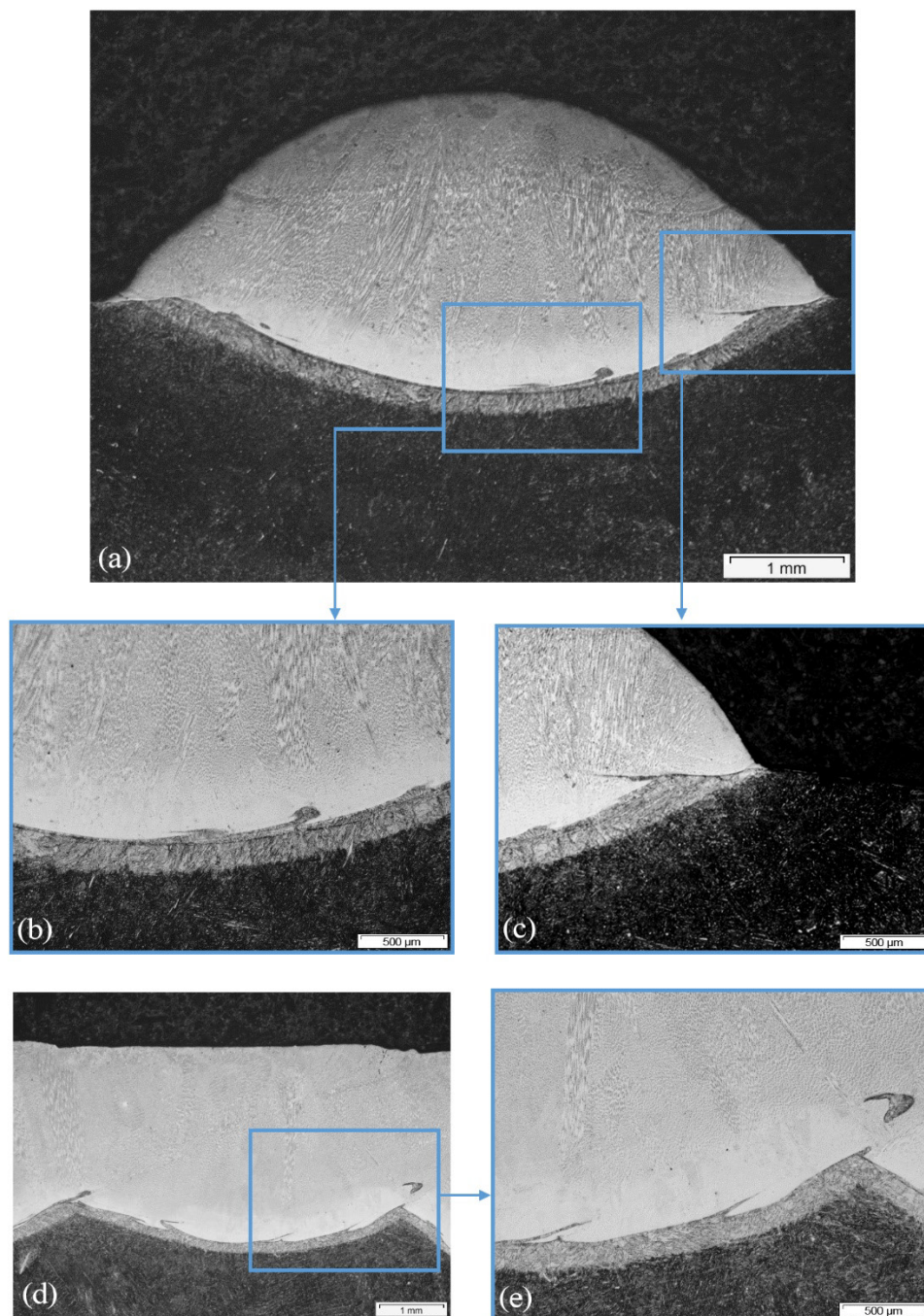


Figura 9. (a,b,c) Seção transversal da amostra 4 depositada pelo modo globular. Formação de macrosegregações nas regiões inferior e superior da poça de fusão, adjacentes à linha de fusão. (d,e) seção longitudinal.

Imagens obtidas pela deposição por *spray* realizada na amostra 5 podem ser visualizadas na Figura 10. Inicialmente, destaca-se que a secção transversal apresenta um volume maior de deposição em comparação com às demais amostras, resultado da maior energia de soldagem empregada nesta amostra. Tal afirmação é corroborada por Tsao e Wu [14], destacando

que à medida que a frequência de projeção de gotas aumenta, ocorre uma maior transferência de calor, resultando em uma poça de fusão maior e na formação mais acentuada da penetração primária em soldas MIG/MAG. Compartilhando da mesma opinião, Farzadi et al. [15], por meio de simulação computacional, concluíram que a força de impacto das gotículas desempenha o papel mais significativo no aumento de penetração e na maior velocidade do metal líquido ao longo da profundidade quando comparada às demais forças atuantes na poça. Jorge et al. [16] afirmam que gotas menores, por induzirem menor arrasto, tendem a alcançar regiões mais profundas da poça de fusão. Na amostra 5 é possível observar ainda uma alta diluição (42%) e, semelhante às amostras 2 e 4 se constata a formação de ZPDs tanto no fundo da poça como na transição entre as penetrações primária e secundária, resultado da formação de mais de um vórtice convectivo no interior da poça. Destaca-se, porém, uma maior quantidade de macrossegregações em relação às amostras anteriores, em particular no fundo da poça a qual se atribui a um maior movimento convectivo nesta região causado pela projeção das gotículas.

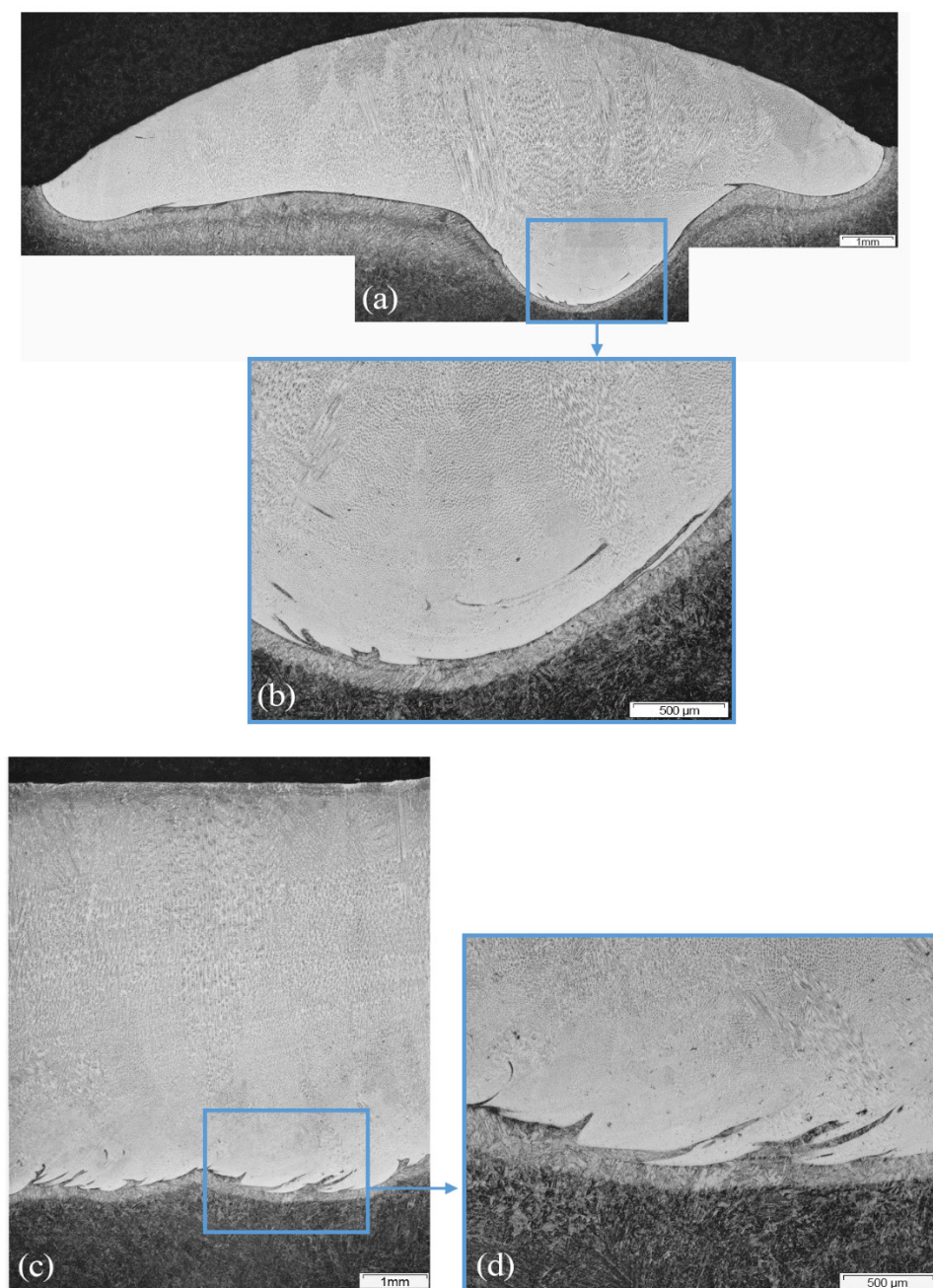


Figura 10. (a,b) Seção transversal da amostra 5 depositada pelo modo spray. Formação de macrossegregações nas regiões inferior e superior da poça de fusão, adjacentes à linha de fusão.(c,d) seção longitudinal.

4. Conclusões

A ocorrência de macrossegregações na união entre o aço inoxidável CA-6NM, empregado como material base, e o AISI 309, utilizado como metal de adição, manifesta-se predominantemente sob a forma de ilhas e penínsulas junto à linha de fusão.

Dentre os diversos modos de transferência analisados, o modo por curto-circuito, tanto o convencional quanto o controlado por CMT, destacou-se por apresentar menor formação de macrossegregações, sendo o CMT o mais eficaz na obtenção de baixos índices de diluição.

O uso de técnicas alternativas de deposição como tecimento e pulsação de corrente não foram efetivas em evitar a formação de macrossegregações.

Foi constatado que a acentuada formação de penetração primária (*fingerlike penetration*) contribui para a maior incidência de macrossegregações.

Contribuição dos autores

NRFR: investigação, visualização, escrita - esboço original. SLH: supervisão, conceitualização, validação, metodologia, escrita - revisão e edição.

Declarações e Afirmações

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo foi publicado no próprio artigo.

Referências

- [1] Arndt REA, Voigt RL Jr, Sinclair JP, Rodrique P, Ferreira A. Cavitation erosion in hydroturbines. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1989;115(10):1297-1315. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1989\)115:10\(1297\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:10(1297)).
- [2] Lippold JC, Kotecki DJ. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2005.
- [3] Karimi A. Cavitation erosion of austenitic stainless steel and effect of boron and nitrogen ion implantation. *Acta Metallurgica*. 1989;37(4):1079-1088. [http://doi.org/10.1016/0001-6160\(89\)90104-1](http://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90104-1).
- [4] Kou S. *Welding Metallurgy*. 3rd. ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2021.
- [5] Santa JF, Blanco JA, Giraldo JE, Toro A. Cavitation erosion of martensitic and austenitic stainless steel welded coatings. *Wear*. 2011;271(9-10):1445-1453. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.081>.
- [6] Kou S, Yang YK. Fusion-boundary macrosegregation in dissimilar-filler welds. *Welding Journal*. 2007;86(10):303-312.
- [7] Cho WI, Na SJ. Impact of driving forces on molten pool in gas metal arc welding. *Welding in the World*. 2021;65(9):1735-1747. <http://doi.org/10.1007/s40194-021-01138-8>.
- [8] Wang Y, Tsai HL. Effects of surface active elements on weld pool fluid flow and weld penetration in gas metal arc welding. *Metallurgical and Materials Transactions. B, Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2001;32(3):501-515. <http://doi.org/10.1007/s11663-001-0035-5>.
- [9] Emami M, Elahi SH, Mashhadgarme M. Effect of cold metal transfer (CMT) on the unmixed zone formation in Stellite 6 overlays on ferritic steels. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2024;63(4):1704-1711. <http://doi.org/10.1080/00084433.2023.2281200>.
- [10] Pickin CG, Young K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2006;11(5):583-585. <http://doi.org/10.1179/174329306X120886>.
- [11] Baeslack WA, Lippold JC, Savage WF. Unmixed zone formation in austenitic stainless steel weldments. *Welding Journal*. 1979;58:6299345.
- [12] Davies MH, Wahab M, Painter MJ. An investigation of the interaction of a molten droplet with a liquid weld pool surface: a computational and experimental approach. *Welding Journal, Miami*. 2000;79(1):18s-23s.
- [13] Wang Y, Tsai HL. Impingement of filler droplets and weld pool dynamics during gas metal arc welding process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2001;44(11):2067-2080. [http://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00252-0](http://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00252-0).
- [14] Tsao KC, Wu CS. Fluid flow and heat transfer in GMA weld pools. *Welding Journal, Miami*. 1988;67(7):70s-75s.
- [15] Farzadi A, Morakabiyan Esfahani M, Alavi Zaree SR. Theoretical and experimental investigation of gas metal arc weld pool in commercially pure aluminum: effect of welding current on geometry. *Journal of Central South University*. 2017;24(11):2556-2564. <http://doi.org/10.1007/s11771-017-3669-4>.
- [16] Jorge VL, Scotti FM, Reis RP, Scotti A. The potential of wire feed pulsation to influence factors that govern weld penetration in GMA welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;110(9-10):2685-2701. <http://doi.org/10.1007/s00170-020-06037-8>.