

Caracterização da junta soldada por atrito com pino não consumível de aço inoxidável lean duplex UNS S32101. Josué da Silva Santos¹

RESUMO

Os parâmetros de soldagem para os aços inoxidáveis duplex quando não controlados de forma adequada, podem provocar uma redução das propriedades mecânicas e da resistência a corrosão. Dentre os processos, a soldagem por atrito com pino não consumível (FSW) produz um cordão de solda no estado sólido sem a tendência de contaminações por inclusões e outros defeitos comuns na soldagem por arco elétrico. O estudo tem como objetivo a caracterização microestrutural e o mapeamento de microdureza de uma junta soldada de aço inoxidável lean duplex UNS S32101 por FSW submetida ao tratamento térmico de envelhecimento. Os resultados evidenciam zonas assimétricas em relação à evolução microestrutural, formando complexos gradientes de deformação e refinamento da microestrutura com balanceamento de fases concordantes para procedimento de soldagem. Os valores de microdureza juntamente com a análise microestrutural mostraram que a variação do direcionamento do escoamento formou regiões com fluxos turbulentos, favorecendo pontualmente o acréscimo do efeito Hall-Petch. O aumento de dureza das zonas do cordão de solda levanta a hipótese de que o FSW pode ter levado à precipitação de fases deletérias, como a fase α' , quando o material foi exposto ao tratamento térmico.

Palavras-chave: Aço Inoxidável Lean Duplex; Soldagem por Atrito com Pino Não Consumível; Mapeamento de Dureza; Caracterização Microestrutural.

INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis *duplex* são caracterizados por possuir uma microestrutura bifásica, com fração de fases aproximadamente iguais de ferrita e austenita, fator que promove certa conformabilidade e soldabilidade ao material, mantendo resistência mecânica e resistência a corrosão frente a diversos meios corrosivos. A subclasse *lean duplex* é dita como de baixa liga por possui teor menor de Ni e em decorrência de outros elementos gamagênicos, como substituinte N e Mn. Essa adição torna essa liga principal concorrente dos aços inoxidáveis austeníticos de baixo C, como 304L e 316L. Além de não depender de altos teores de elementos (Ni e Mo) que encarece a sua produção, baixos teores de Mo favorece a redução da cinética de precipitação de fases deletérias no AILD (BHATTACHARYA *et al.*, 2008; WESTIN *et al.*, 2010).

No processo de soldagem por fusão é necessária uma quantidade de energia suficiente para promover a coalescência entre as partes. Um método promissor quanto as suas aplicações industriais voltada aos metais de alto ponto de fusão é o de soldagem no estado sólido denominado soldagem por atrito por pino não consumível, do inglês *Friction Stir Welding* (FSW), visto na figura 1.

Metal de Base (MB); Zona Termomecanicamente Afetada do Lado de Retrocesso (ZTMA-LR) e do Lado de Avanço (ZTMA-LA); Zona Misturada da Raiz da solda (ZM-RAIZ); Zona Misturada do Topo da solda (ZM-TOPO); Zona Misturada Central (ZM); e Zona Misturada do Lado de Retrocesso (ZM-LR) e do Lado de Avanço (ZM-LA)

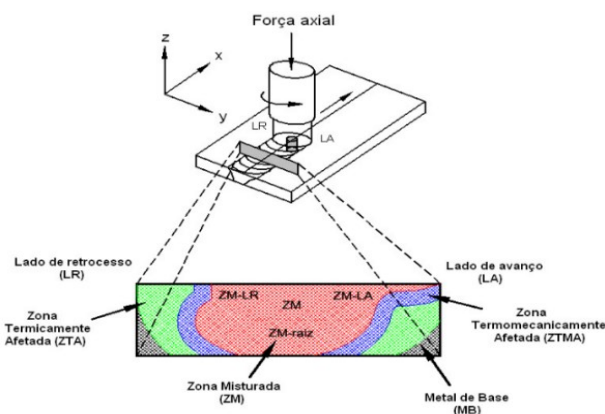
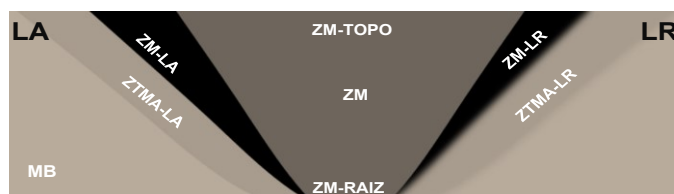


Figura 1 – Esquema representativo das zonas da junta soldada por FSW. Fonte: Adaptada de SANTOS (2016)

Seu mecanismo de deformação localizada promove a mistura e coalescência dos materiais no estado sólido, reduzindo a cinética de precipitação de fases deletérias e as modificações na microestrutura, além de dificultar prováveis formação de defeitos no cordão de solda que são acentuados nos métodos de soldagem por fusão. Em aços inoxidáveis duplex, o uso desse processo é

¹ Engenheiro de Materiais – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

visto como uma importante ferramenta para a união de partes com o desafio de manter as relevantes propriedades desses materiais. Este trabalho propõe a caracterização microestrutural e análise da dureza da junta soldada por FSW, antes e após tratamento térmico de envelhecimento, com o propósito de estudar a viabilidade do processo de soldagem vislumbrando a aplicação do material em temperaturas na faixa de 280 °C, na qual está sujeito à precipitação de fases deletérias. Neste trabalho, o tratamento térmico de envelhecimento será realizado com o objetivo de formar precipitados que normalmente se formariam em tempos longos durante a aplicação do material.

METODOLOGIA

O estudo foi realizado em uma junta soldada de AILD UNS S32101 por FSW com dimensão de 125 mm x 54,0 mm x 6,0 mm, do tipo topo a topo, com penetração total e isenta de defeito. Foi obtida no Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano/CNPEM). Na Figura 2 é mostrado o fluxograma das atividades realizadas.

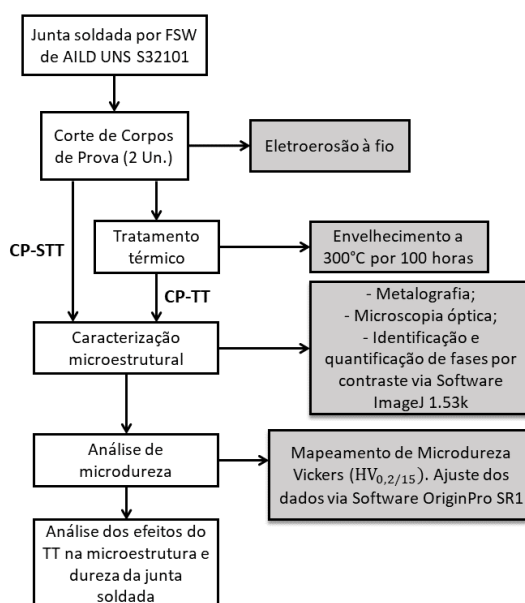


Figura 2 - Fluxograma das atividades

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A junta soldada por FSW de AILD UNS S32101 foi utilizada como material de estudo na condição como recebido (CP-STT) e após o tratamento térmico de envelhecimento (CP-TT). Na Figura 3-a é apresentada a micrografia do MB, destacado na cor clara a fase austenita (γ) e em escuro a matriz ferrítica (α), com tratamento térmico. Nas Figuras 4-b à h são apresentadas as micrografias das diferentes zonas de solda. Apesar da particular assimetria do processo na junta soldada, as ZTMA's podem ser descritas como regiões cuja morfologia e tamanho de lamelas se assimilam ao MB, porém com acréscimo de deformações que as fazem singulares às outras regiões. A ZM-RAIZ, TOPO e LR constituem microestruturas semelhantes entre si, com distribuição de γ alinhada na matriz ferrítica, apresentadas nas Figuras 3-d, e, f, respectivamente.

Na Figura 4 é apresentada a interface ZTMA/ZM-LA, formando uma transição brusca em relação ao refinamento de grão, conforme observado por SANTOS (2012), situação oposta ocorre entre MB à ZM-LR. A deformação severa na região promove a ativação dos mecanismos de recristalização e recuperação dinâmica descontínua da γ e α , respectivamente, e recristalização dinâmica contínua da α (MOMENI *et al*, 2011). Pode ser notado na Figura 5-a a variação no ângulo de escoamento do material na ZTMA-LA, originado a partir do topo do cordão de solda de forma tangente a ZM-LA com aspecto de ondas de escoamento em matriz α para uma orientação frontal à interface, causando um acréscimo de deformação localizada e turbulentos fluxos na ZM-LA. Na Figura 4-b observa-se o resultado do escoamento assimétrico do material, visto através das linhas de fluxos na ZM-LA.

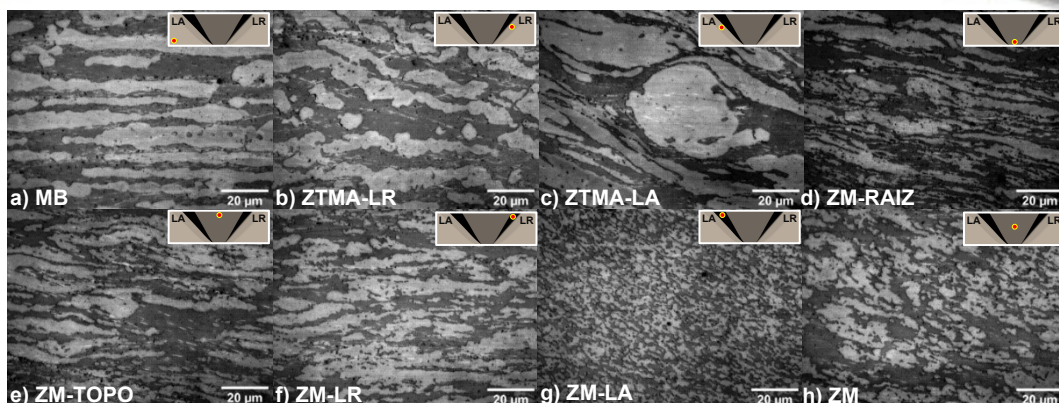


Figura 3 – Junta soldada de AILD S32101 por FSW com tratamento térmico (CP-TT)

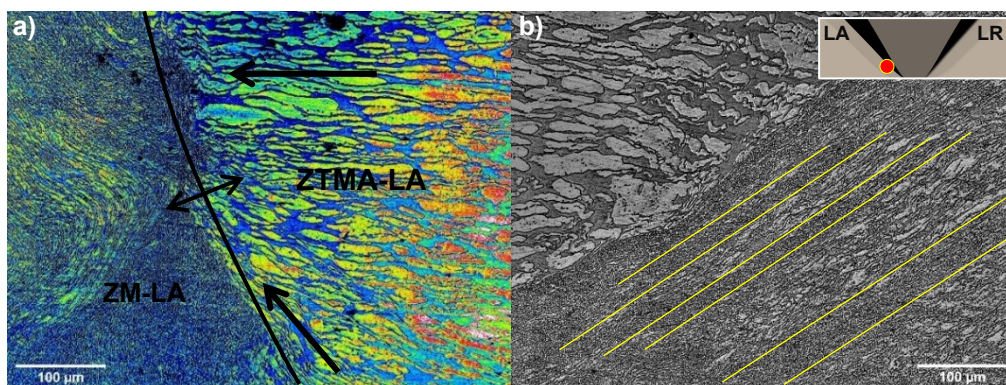


Figura 4 – Microestrutura da interface ZTMA-LA/ZM-LA da junta soldada de AILD S32101

A distribuição da fração de α são apresentados na Figura 5, considerando os valores de referência estudados por SANTOS (2016) nas mesmas condições do CP-STT por EBSD. As frações de α mantiveram-se de 40,8% a 64,6%, sendo a referência de 44,3% a 64,3%, gerando resultados concordantes e que evidenciam a integridade do balanço de fases para procedimentos de soldagem (KARLSSON, 2011). Em relação a fração de fases, ZM-RAIZ e ZM-TOPO são regiões de importância para algumas aplicações, tal como tubos e trocadores de calor, pois formam discontinuidades expostas à condições adversas, desenvolvendo *performances* discrepantes em relação à resistência a corrosão generalizada, por pite, intergranular, circunstância verificada nas zonas mencionadas por meio da variação nas frações volumétricas de cada fase em ambos os CPs.

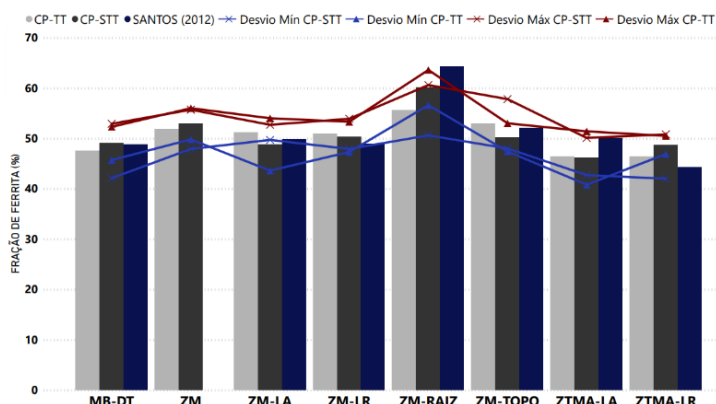


Figura 5 – Fração de Ferrita das regiões dos CP-TT, CP-STT utilizando MO e CP-STT por EBSD

Fonte: Adaptada de SANTOS (2012)

Os resultados do mapeamento de microdureza Vickers ($HV_{0,2/15}$) corroboram com a evolução microestrutural e o gradiente de deformação entre as regiões da junta soldada. O efeito Hall-Petch é uma das causas para a distribuição de dureza em toda a junta e o aumento de dureza em relação ao

MB, sendo que refinamentos de tamanho de grão mais expressivos favorecem o aumento da dureza na região analisada. Na Figura 6 é apresentado o ajuste parcial dos dados com a distribuição normal servindo como um parâmetro não vinculado às particularidades de cada região da junta soldada, mas como uma ferramenta comparativa da somatória dos dados de dureza dos CPs, com média de dureza de 254,4 e 260,8 e desvio padrão de 14,0 e 15,6 para o CP-STT e CP-TT, respectivamente.

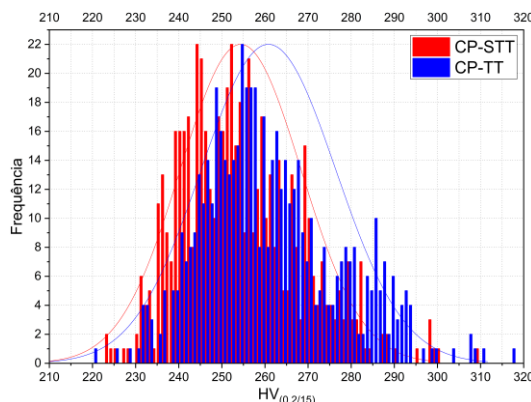


Figura 6 – Distribuição Normal da microdureza para os CP-STT e CP-TT

Nas Figuras 7 (a) e (b) são apresentados os mapas de dureza para a junta soldada na condição CP-STT e CP-TT, respectivamente. Nota-se nos mapeamentos a delimitação da junta soldada, o MB e a assimetria promovida pelo processo em relação à variação de dureza. Através do mapeamento de dureza no CP-TT, mostrado na Figura 8-b, foi constatado a intensificação das medidas de microdureza em toda área da junta soldada, mas manteve-se uma correlação das regiões envolvidas no processo e o aumento de dureza com o tratamento térmico.

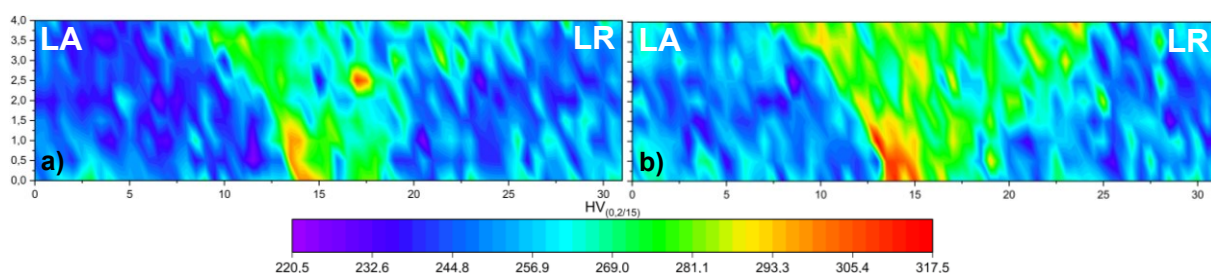


Figura 7 – Mapa de microdureza da junta soldada do AILD UNS S32101 por FSW, (a) CP-STT e (b) CP-TT (em milímetros)

Os Lados de Retrocesso (LR's) são caracterizados por um gradual aumento de microdureza, com regiões de transição não delimitadas (ZM/ZTMA-LR e MB), contrapondo-se aos Lados de Avanço (LA's), onde é possível observar a delimitação das regiões ZM-LA e ZTMA-LA/MB. A interface ZTMA/ZM-LA forma uma transição abrupta de refinamento de tamanho de grãos com severa deformação localizada, pelo qual também fornece um aumento expressivo da microdureza. Apesar da mesclagem de pontos com aumento de dureza dentro das ZMs, as ZMs-LA são caracterizadas por uma constante elevação da dureza, que variam entre 275,0 HV a 317,5 HV.

Os relevantes aspectos da amplitude e gradientes de dureza obtidos pelo processo FSW em juntas soldadas em aço inoxidáveis, em função da aplicação industrial, foram mais bem visualizados a partir dos mapeamentos de dureza do que por métodos quantitativos, como já apresentados no estudo. Sobretudo, as ZMs-LA próximas à ZM-RAÍZ, que são regiões que apresentam os maiores aumentos de dureza da junta soldada, fortalecendo os indícios de que o fluxo turbulento e a evolução microestrutural nesta região favorecem esse acréscimo de dureza.

O tratamento térmico de envelhecimento por 100 h a 300 °C foi aplicado ao material com a finalidade de acelerar os mecanismos muitas vezes ativos através das variáveis de uso, possibilitando a análise da viabilidade do processo de união e a seleção do material na construção de equipamentos industriais. Foi observado um efeito endurecedor no CP-TT, possivelmente atrelado à precipitação

de fases que influenciam nas propriedades mecânicas e de resistência a corrosão, entre elas a precipitação da fase α' . Segundo Grobner (1973), o endurecimento da α nos materiais com teor de Cr acima de 17% ocorre favoravelmente pelo processo de decomposição espinodal.

A variação de dureza foi associada ao refinamento da microestrutura do material promovido pelo processo FSW, porém, a ampliação do efeito endurecedor pela precipitação da fase α' vincula-se, entre outros fatores, ao balanceamento e controle da microestrutura bifásica. Como essa fragilização ocorre pelo endurecimento da α , os resultados de tamanho, distribuição, forma de grãos e fração de α são parâmetros que ditam as regiões mais afetadas pelo tratamento térmico. Em suma, todas as ZMs sofreram aumento da dureza, em especial a ZM-RAÍZ.

CONCLUSÃO

A partir da caracterização microestrutural foi possível realizar a análise qualitativa e quantitativa da junta soldada de AILD UNS S32101 por FSW. Nos CPs a microestrutura se desenvolveu assimétrica ao longo da junta soldada. As transições de zonas do LR em direção a ZM propaga-se de forma gradual, enquanto no LA forma-se uma interface de transição brusca em relação ao refinamento de grão, causado pela deformação severa e os mecanismos de recristalização e recuperação dinâmica descontínua/contínua da γ e α , e a formação de linhas de fluxos na ZM-LA.

A distribuição da fração de α e o balanço de fases apresentaram-se concordantes ao esperado para os procedimentos de soldagem, atrelados às medidas de desvios associados às limitações da análise por contraste. Porém, o aspecto de integridade da junta soldada frente a aplicações e a diferença no balanceamento de fases entre ZM-RAÍZ e ZM-TOPO, reforçaram as incertezas para a conservação das propriedades mecânicas e de resistência a corrosão.

Por meio do mapeamento de microdureza Vickers foi evidenciado o efeito Hall-Petch sobre a distribuição de dureza, demonstrando que o refinamento de tamanho de grão nas transições de zonas, influenciou na variação de dureza, especialmente nas ZM's-LA. As medidas de microdureza foram intensificadas e delimitadas nas regiões envolvidas no processo de soldagem para o CP-TT, fatores que fortalecem o indício de que o processo favoreceu a precipitação de fases deletérias na junta soldada, principalmente α' , pela decomposição espinodal da α . A variação no escoamento do material na ZTMA-LA, direcionado inicialmente tangente para frontal à ZM-LA, promoveu o acréscimo de deformação e turbulentos fluxos na região da ZM-RAÍZ, uma vez que produziu as maiores medidas de dureza para ambos os CPs, além disso essas regiões tornaram mais suscetíveis a fragilização pela precipitação da fase α' devido as altas frações de α .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BHATTACHARYA, A; SINGH, P. M. Role of microstructure on the corrosion susceptibility of UNS S32101 duplex stainless steel. **Corrosion**, v. 64, n. 6, p. 532-540, 2008.

GROBNER, P. J. The 885 °f (475 °C) embrittlement of ferritic stainless steels. **Metallurgical Transactions**, v. 4, p. 251-260, 1973.

KARLSSON, L. Welding duplex stainless steels: a review of current recommendations, p. 1-17, 2011.

SANTOS, JOSUÉ SILVA. **Caracterização da junta soldada com pino não consumível de aço inoxidável lean duplex UNS S32101**. Orientadora: Silvia Midori Higa. 2022. 61 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina. 2022.

SANTOS, T. F. A; TORRES, E. A; RAMIREZ, A. J. Soldagem por Atrito com Pino Não Consumível de Aços Inoxidáveis Duplex. **Soldag. insp.**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 59-69, Mar. 2016.

MOMENI, A; DEHGHANI, K. Hot Working Behavior of 2205 Austenite-Ferrite Duplex Stainless Steel Characterized by Constitutive Equations and Processing Maps. **Materials Science and Engineering**, A258 (2011) 1448-1454.