

EFEITO DO CALOR IMPOSTO POR SOLDA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE UM AÇO INOXIDÁVEL UNS S41003 (APERAM 410D)

Vinícius Sayeg Reis Sousa¹ (IC), Dr. José Carlos de Lacerda¹ (PQ)

¹Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira.

Palavras-chave: Aço inoxidável. Corrosão. Microestrutura. Soldagem MIG. Propriedades mecânicas.

Introdução

O aço UNS S41003 é um aço inoxidável ferrítico relativamente novo e ainda em desenvolvimento no mercado brasileiro (CARVALHO *et al.*, 2019), no entanto, por possuir um dos menores custos na cadeia produtiva de aços especiais tem se destacado no cenário nacional e internacional como um possível substituto dos aços baixo carbono comuns, galvanizados, aluminizados e patináveis em aplicações estruturais, sendo que quando aplicado com essa finalidade pode reduzir em até 50% a espessura das chapas utilizadas. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi identificar o efeito do calor imposto pelo processo de soldagem MIG de baixa (BE) e alta (AE) energia nas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão do aço inoxidável UNS S41003, também conhecido como Aperam 410D, correlacionando os ensaios de polarização e as microestruturas obtidas nas regiões do metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA), e zona fundida (ZF), com as características iniciais do material, haja vista que o processo de soldagem MIG é um dos mais difundidos e utilizados na indústria por sua economia de consumíveis e ganho de produtividade.

Metodologia

Para a realização dos experimentos foram utilizadas chapas do aço UNS S41003 com dimensões de (200x150x4,75) mm laminadas a quente com tratamento térmico realizado em forno contínuo a 1020°C e resfriado ao ar. A composição química do aço utilizado é: 0,01%C, 0,55%Mn, 0,53%Si, 11,01%Cr, 0,31%Ni, 0,03%P, 0,00%S, 0,02%Mo, 0,06%Cu, 0,02%Co e 130(ppm)N, estando dentro dos limites máximos estipulados por norma conforme (APERAM, 2015).

A união entre as chapas pelo processo de soldagem MIG foi realizada utilizando um arame consumível sólido com 1,0 mm de espessura de aço inoxidável austenítico AISI 309LSi. O gás de proteção foi uma mistura de argônio (Ar) + 2% de oxigênio (O).

Durante o procedimento de solda cuidados extras foram adotados para que fosse possível assegurar que

parâmetros cruciais para a soldagem se mantivessem constantes ao longo da extensão do cordão, tais como a tensão (V) medida em [V], corrente (i) em [A], vazão de gás ($Q_{Gás}$) em [l/min], velocidade de deslocamento da tocha (v_{tocha}) em [mm/min], velocidade de alimentação do consumível (v_{arame}) em [mm/s] e por fim, a distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) em [mm]. Os parâmetros de soldagem aplicados estão dispostos na Tabela 1.

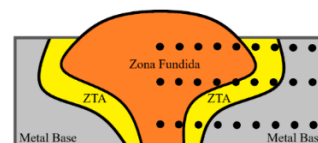
Tabela 1 - Parâmetros de soldagem aplicados

ES	V	i	v_{arame}	v_{tocha}	$Q_{Gás}$	DBCP
Alta	24,4	196,0	200,0	100,0	17,0	25,0
Baixa	24,4	196,0	200,0	200,0	17,0	25,0

É necessário frisar que anteriormente ao procedimento de soldagem foi realizada uma minuciosa limpeza das chapas com acetona, eliminando assim quaisquer resquícios de óleos ou impurezas deixadas pelos processos de laminação das chapas ou da usinagem das juntas de topo plana.

A fim de avaliar o perfil de microdureza ocorrido nas regiões da solda foram realizados ensaios de microdureza Vickers ao longo da seção transversal do cordão de solda. Para que fosse possível avaliar o comportamento de dureza nas três regiões, metal base, zona termicamente afetada e zona fundida, foram realizadas medições a cada 0,25 mm partindo-se do centro da solda em direção à extremidade. Além disso, o ensaio foi repetido em três alinhamentos distintos para que fosse possível visualizar a interferência causada pela exposição ao calor, sendo avaliadas as durezas próximas à superfície superior, mais exposta ao calor, região central e região próxima à superfície inferior, menos atingida pelo calor da solda. A Figura 1 ilustra a metodologia utilizada no ensaio.

Figura 1- Esquemática do posicionamento dos ensaios de dureza



Os ensaios foram realizados com aplicação de carga de 100gf por 15 segundos seguindo recomendações

de (CALLISTER, 2016) e (COZACIUC *et al.*, 2009), e para tanto foi utilizado o microdurômetro modelo 402MVD da marca Wolpert Wilson.

Para a realização dos ensaios de ferritoscopia foi utilizado um ferritoscópio modelo FMP30 da marca Helmut-Fischer que faz uso da indução eletromagnética para determinar a quantidade de ferrita que está presente na amostra, uma vez que a ferrita é fase magnética. Para cada amostra de alta e baixa energia foram realizadas dez medições com o ferritoscópio em cada região da seção transversal da solda: ZF, ZTA e MB.

A obtenção das imagens micrográficas foi realizada através da observação das amostras das três regiões de solda de ambas as energias de soldagem (ES) no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) da marca Bruker, modelo 410M. Para que fosse possível e facilitado o processo de identificação das fases contidas na microestrutura, as amostras da seção transversal do cordão de solda foram embutidas a quente em baquelite e lixadas em lixas d'água com granulometria que variou de 100 mesh até 2000 mesh, seguido de polimento e posteriormente atacadas quimicamente por uma solução de Água Régia. Na sequência, as amostras foram limpas em água corrente e submetidas a um processo de limpeza por ultrassom submersas em água destilada a fim de eliminar qualquer impureza ou resquício deixado pelos processos anteriores, em particular, resquícios de silício (Si) que poderiam ser depositados na amostra durante os processos de lixamento e polimento.

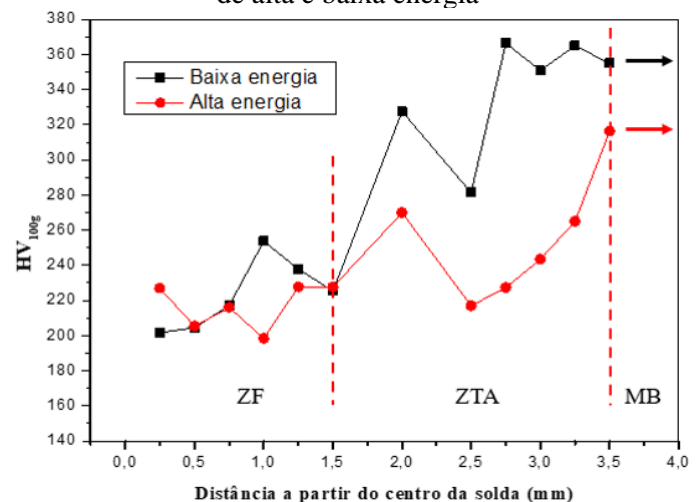
Para os ensaios de polarização potenciodinâmica foi utilizado o potenciostato da marca EMSTAT modelo Blue 3+ em conjunto com uma célula eletroquímica composta pelo recipiente e três eletrodos, sendo eles o eletrodo de referência, de trabalho e o contra eletrodo. Para os eletrodos de referência e o contra eletrodo foram utilizados respectivamente o calomelano saturado e um eletrodo de platina (Pt). As amostras do metal base, ZTA e zona fundida das soldas de alta e baixa energia foram embutidas a quente em baquelite e tiveram sua área exposta parcialmente coberta por esmalte para que fosse possível mensurar a área em que o potencial estaria agindo. Na sequência as amostras foram introduzidas na célula eletroquímica submersas em solução de cloreto de sódio (NaCl) 3,5% em água destilada simulando a concentração salina da água do mar. Por fim, com todos os eletrodos conectados o potencial foi variado de -0,6V a 0,8V.

Resultados e discussão

Na Figura 2 são apresentados os perfis de microdureza médios obtidos para os ensaios realizados nas amostras de alta e baixa energia de soldagem através

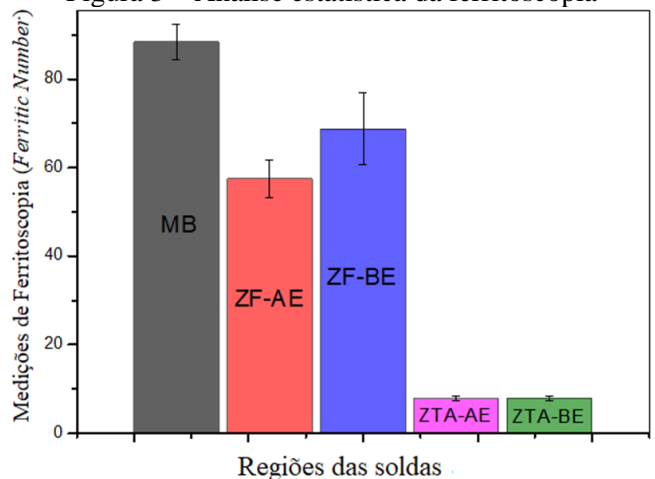
da metodologia esquematizada pela Figura 1. Pela Figura 2, fica claro que em ambos os casos (solda de alta energia e baixa energia) a ZTA apresentou maiores valores que a ZF.

Figura 2 - Perfil de microdureza médio entre as soldas de alta e baixa energia



Os valores encontrados pelo ensaio de ferritoscopia realizado na seção transversal do cordão foram dispostos em uma análise estatística para que fosse mais fácil a visualização e são apresentados na Figura 3.

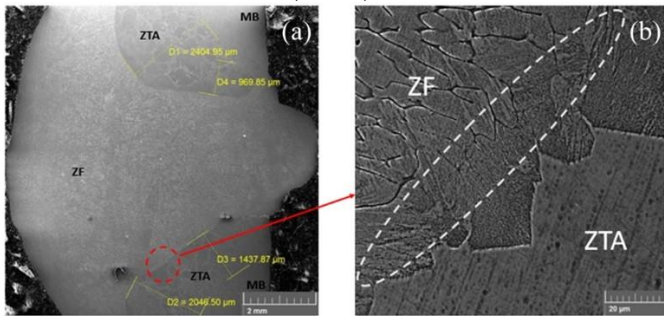
Figura 3 – Análise estatística da ferritoscopia



Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as micrografias da seção de corte da solda de baixa energia vista no MEV. Pela Figura 4 (a) é possível observar que as três regiões da solda, ZF, ZTA e MB estão claramente bem definidas, sendo possível distingui-los com facilidade e em conformidade ao que é apresentado em (BHADESHIA, 2017) e em (GROOVER, 2010) no que diz respeito às características micrográficas da região de solda. A ZTA pode ser identificada devido ao pronunciado crescimento de grão em relação ao metal base e pela Figura 4 (a) ainda é possível identificar que a ZTA para esta amostra possui extensão (distância entre o MB e a

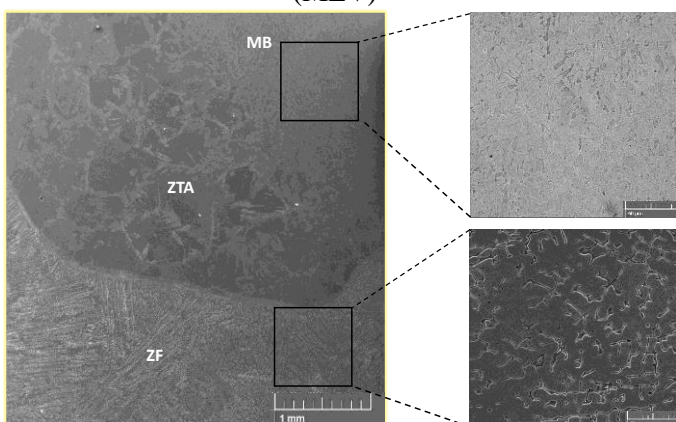
ZF) que varia entre 0,97mm e 2,40mm. Já na Figura 4 (b) é dado foco à região de interface de solda, onde há o encontro entre a ZTA e a zona fundida, em que se pode notar os indícios do crescimento de grão da ZF a partir do molhamento dos grãos.

Figura 4 - Regiões e interface da solda de baixa energia (MEV)



Na Figura 5 são apresentadas micrografias destacando as três regiões da solda de baixa energia e um aumento maior nas regiões da zona fundida e do metal base para que se possa comparar as diferenças entre cada uma delas. Na zona fundida foi constatado morfologia típica de austenita com ilhas de ferrita delta. A presença de austenita é atribuída ao arame utilizado (AISI 309LSI), já a ferrita delta (fase de alta temperatura) originou-se devido à diluição do metal base na poça de fusão no momento da solda. A ZTA teve um alto crescimento dos grãos de ferrita e também foi constatado a presença de agulhas de martensita em torno dos contornos de grão. Por fim, na região do metal base é possível identificar uma microestrutura predominantemente ferrítica com alto refinamento dos grãos em comparação à região vizinha, a ZTA.

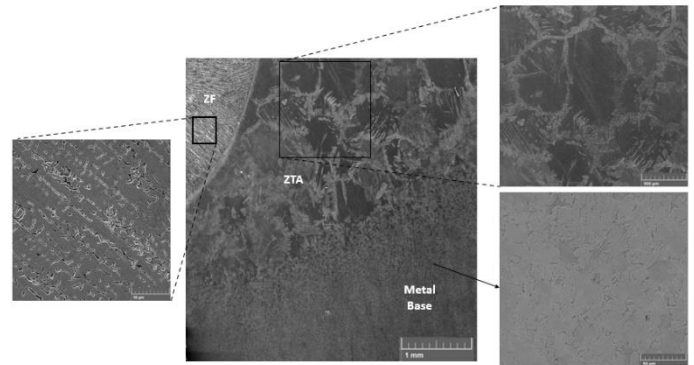
Figura 5 - Microestrutura da solda de baixa energia (MEV)



Na sequência é apresentado pela Figura 6 as imagens das três regiões da solda de alta energia. É possível verificar que o comportamento da microestrutura da solda de alta energia foi em grande

parte bastante similar ao da solda de baixa energia.

Figura 6 - Microestrutura da solda de alta energia (MEV)



Os principais resultados de polarização potenciodinâmica são apresentados pela Tabela 2 que reúne os parâmetros relativos à resistência à corrosão do material, sendo eles os potenciais de corrosão (E_{corr}), passivação (E_{pass}) e de pite (E_{pite}) medidos em [V] e as densidades de corrente de corrosão (i_{corr}), passivação (i_{pass}) e de pite (i_{pite}) medidas em [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Tabela 2 – Resultados de Polarização

ES	Região	E_{corr}	i_{corr}	E_{pass}	i_{pass}	E_{pite}	i_{pite}
-	MB	-0,27	-0,13	-0,22	0,31	0,36	3,51
	ZF	-0,10	-0,28	0,00	0,50	0,36	3,60
AE	ZTA	-0,18	-4,25	-0,18	-2,50	0,07	8,40
	ZF	-0,14	-2,35	-0,08	-1,93	-0,33	1,95
BE	ZTA	-0,37	-1,25	-0,33	0,67	-0,03	6,37

Conclusões

- Foi observado um acentuado crescimento de grão da ferrita na ZTA de ambas as soldas (alta energia e baixa energia).
- Na ZTA das soldas observa-se pela morfologia da microestrutura a presença de agulhas de martensita no contorno de grão da ferrita.
- De acordo com o perfil de microdureza das soldas em ambos os casos (solda de alta energia e baixa energia) a ZTA apresentou maiores valores que a ZF.
- Ocorreu nas ZTAs de ambas as soldas (alta energia e baixa energia) os menores números de ferrita observados por ferritoscopia.
- A ZTA foi a região mais afetada pelas soldas de alta e baixa energia no que diz respeito às suas propriedades de resistência à corrosão.

Agradecimento

Agradeço a Deus por dar-me força, sustento e disposição para completar este trabalho que contribuiu muito na minha formação.

Sou grato ao meu orientador Prof. Dr. José Carlos de Lacerda pelo excelente trabalho em me auxiliar no desenvolvimento do trabalho, e, também, pelos ensinamentos e conselhos que me deu quando necessário.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela confiança e oportunidade de me fazer bolsista, bolsa esta que auxiliou e alavancou o desenvolvimento da pesquisa.

Referências

- APERAM South America. **DIN WS 1.4003/UNS S41003: Aço inoxidável Ferrítico para aplicações estruturais e de desgaste**. 2015. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/11/DIN-WS-1.4003UNS-S41003-A%20-%20Inoxid%20-%20A%20-%20Ferr%20-%20ADtico-para-aplica%20-%20B5es-estruturais-e-de-desgaste.pdf>. Visto em: 19 de out. de 2021.
- APERAM South America. **410D para taliscas de esteiras transportadoras: Aço Inoxidável Ferrítico**. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/wpcontent/uploads/2015/11/A%20-%20A%20-%20Ferr%20-%20ADtico-410-Taliscas.pdf>. Visto em: 19 de out. de 2021.
- ARRUDA, Amanda Aparecida Fátima; CARVALHO, Ana Cecília de; MOREIRA, Paulo Sérgio; QUEIRÓZ, Rhelman Rossano Urzêdo; FARIA, Geraldo Lúcio de. **Características Da Camada De Óxidos Formada No Aço Inoxidável 410d Após Tratamentos Isotérmicos Em Atmosfera Oxidante**. p. 1470-1481. In: 73º Congresso Anual da ABM, São Paulo, 2018.
- ASTM A890/A890M – 13. **Standard specification for castings, iron-chromium-nickel-molybdenum corrosion-resistant, duplex (austenitic/ferritic) for general application**. West Conshohocken: ASTM International, 2013.
- ASTM E23 – 16b – **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**, 2005.
- ASTM E8/E8M. **ASTM E8/E8M-09. Annual book of ASTM standards. Metals Test Methods and Analytical Procedures**, 2010.
- BHADESHIA, Harry; HONEYCOMBE, Robert. **Steels: microstructure and properties**. Butterworth-Heinemann, 2017.
- CALLISTER, William D. **Ciência E Engenharia De Materiais: Uma Introdução** / William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch; tradução Sergio Murilo Stamile Soares. - 9. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CARBÓ, Héctor Mario. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. São Paulo: ArcelorMittal Brasil, v. 29, 2008.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. Abm, 1977.
- COSTA, André Luiz; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. Edgard Blücher, 3ª Ed. 2010.
- COZACIUC, Ivan. SILVA, Luís R.; TOGNI, Marcos A. **Telecurso profissionalizante de mecânica -Ensaio de materiais**.1. ed. São Paulo: Fundação Roberto Marinho, 2009.
- CARVALHO, Ana Cecília de; ARRUDA, Amanda Aparecida Fátima; QUEIRÓZ, Rhelman Rossano Urzêdo; FARIA, Geraldo Lúcio de; MOREIRA, Paulo Sérgio. **Avaliação Do Aço Inoxidável Ferrítico 410d Submetido Ao Ensaio De Tração A Quente**, p. 841-852. In: 74º Congresso Anual da ABM, São Paulo, 2019.
- DE SOUZA, Sergio Augusto. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. Editora Blucher, 1982.
- DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. EdIPUCRS, 2007.
- FORTE, Ana Caroline Ferreira. **Influência da energia de soldagem na resistência à corrosão por pite do aço inoxidável superduplex SAF 2507**. TFC Engenharia Química – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 46. 2011.
- GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems**, 4th ed.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2010.
- HIBINO, Alberto Hisashi. **Estudo de tenacidade da zona termicamente afetada dos aços inoxidáveis ferríticos UNS S41001 e UNS S41003**. 2011.
- LACERDA, José Carlos de. **Comportamento em fadiga e corrosão de um aço UNS S31803 com diferentes frações de ferrita-austenita**. 2015. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- LEAL, Luiz Henrique Monteiro. **Fundamentos de microscopia**. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2000. 128p.
- MANNHEIMER, Walter A. **Microscopia dos Materiais** – Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2002.
- MARQUES, Davi Alves. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades eletroquímicas e comportamento de corrosão do aço inoxidável classe 410 em solução de cloreto**. 2021.
- MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.
- MOURA, V.S.; LIMA, J.M.; PARDAL, J.M.; KINA, A.Y.; CORTE, R.R.A.; TAVARES, S.S.M. **Influence of microstructure on the corrosion resistance of the duplex stainless steel UNS S31803**. *Materials Characterization*, v. 59, p. 1127-1132. 2008.
- NUNES, Isadora Pereira et al. **Influência de Tratamentos Térmicos de Têmpera com Austenitização Intercrítica no Comportamento Mecânico de um Aço Inoxidável Ferrítico do Tipo UNS S41003**. ABM Proceedings. Editora Blucher, 2019.
- PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia, microestrutura e propriedades** Hemus. 2000.
- WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; DE MELLO, Fabio Decourt Homem. **Soldagem: processos e metalurgia**. Editora Blucher, 1992.
- WOLYNEC, Stephan. **Técnicas eletroquímicas em corrosão** Vol. 49. Edusp, 2003.