

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM A LASER Yb:FIBRA DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ASTM 201LN SUBMETIDO A PROCESSAMENTO TERMOMECÂNICO PARA REVERSÃO*

Náhrima Chambela Moraes¹

Camila Oliveira de Souza²

Carolline Serafim da Silva³

Milton Sergio Fernandes de Lima⁴

Andersan dos Santos Paula⁷

Resumo

O material em estudo é um aço inoxidável austenítico ASTM 201LN na condição laminada a quente e recozida a 1050 °C (denominado como recebido – CR), o qual foi tratado termomecanicamente para refinamento dos grãos. O processamento termomecânico adotado neste trabalho consistiu de duas etapas de laminação em temperatura ambiente, 8 passes com 10% de redução em cada passe, intercaladas com duas etapas de recozimento para reversão da martensita em austenita, utilizando uma temperatura de encharque igual a 750 °C e tempo de 15 min. De posse de amostras de chapas totalmente austeníticas e extraídas ao longo das etapas do processamento (CR e recozidas após a primeira e segunda etapa de laminação a frio) foram feitas soldas com 7 combinações de potências e velocidades, fazendo uso de um laser de Yb:Fibra de 2 kW de potência média e comprimento de onda de 1,07 µm. Foram realizadas análises macroscópicas superficiais e microestruturais, onde foi possível estimar os melhores parâmetros de soldagem a laser para cada amostra, através de observações como penetração total e menores dimensões das zonas de fusão. Para a amostra CR, somente o teste de soldagem com maior potência e menor velocidade alcançou penetração total. Para as amostras tratadas o teste com maior potência e maior velocidade de soldagem proporcionou as menores dimensões de zona de fusão. Também foi possível analisar a morfologia e formato dos cordões de solda.

Palavras-chave: Aço Inoxidável Austenítico; Soldagem a Laser, Efeito TRIP, Refinamento de Grão.

Yb:FIBER LASER WELDING PARAMETERS OPTIMIZATION OF THE ASTM 201LN AUSTENIC STAINLESS STEEL SUBMITTED TO THERMOMECHANICAL PROCESSING FOR REVERSION

Abstract

The present material is an austenitic stainless steel ASTM 201LN in the hot rolled condition and annealed at 1050 °C (referred to as received - CR), which was thermo-mechanically treated for grain refinement. The thermo-mechanical processing adopted in this work consisted of two rolling stages at room temperature, 8 runs with 10% reduction each, with two annealing steps to reverse martensite in austenite, using a soaking temperature of 750 °C and time of 15 min. The samples of fully austenitic sheets and extracted during the processing stages (CR and annealed after the first and second cold rolling stages) were tested for welding with 7 combinations of powers and speeds, using an Yb: fiber laser of 2 kW power and 1.07 µm wavelength. Surface macroscopic and microstructural analyzes were performed, where it was possible to estimate the best laser welding parameters for each sample, through observations such as full penetration and dimensions of the fusion zones. For the CR sample, only the welding test with higher power and lower speed reached full penetration. For the treated samples, higher power and higher speed of welding provided the smaller dimensions of fusion zone. It was also possible to analyze the morphology and shape of the welds.

Keywords: Austenitic Stainless Steel; Laser Welding; TRIP Effect; Grain Refining.

- ¹ Eng. Química, M. Sc., Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais (PPGCM), Seção de Engenharia de Materiais (SE/8), Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ² Eng. Metalurgista, M.Sc., Doutora pelo PPGCM, SE/8, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ³ Eng. Metalurgista, M.Sc., Analista da Garantia da Qualidade Jr., Galvasud, Porto Real, RJ, Brasil.
- ⁴ Físico, M.Sc., D.Sc., Pesquisador/chefe da subdivisão de lasers, Divisão de Fotônica, Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, SP, Brasil..
- ⁵ Eng. Metalurgista, M.Sc., D.Sc., Professora Associada dos cursos de graduação em Eng. Materiais e PPGCM, SE/8, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis (SS- *Stainless Steel*) foram desenvolvidos com o objetivo de resistir a oxidação e corrosão. Dentre os diferentes tipos de SS, o aço inoxidável austenítico (ASS - *Austenitic stainless steel*) se destaca por sua grande resistência à corrosão quando submetido a altas ou baixas temperaturas, excelente ductilidade e soldabilidade. O ASS mais popular é o aço denominado 304. Contudo, ASS com baixo teor de níquel foram desenvolvidos visando à obtenção de um aço de menor custo. Dentre essas alternativas estão os ASS da série 200, que substitui todo ou parte do Ni por outros elementos estabilizantes da austenita, em especial o Mn, que possui menor valor de mercado. Contudo, a resistência a corrosão e as propriedades mecânicas dos aços da classe 200, inicialmente, se apresentavam inferiores à dos aços da série 300, como é caso do ao aço 304 [1, 2, 3]. Estudos foram realizados com o intuito de incrementar as propriedades mecânicas através do refinamento de grãos por meio da transformação da fase austenita para fase martensita, induzida por deformação plástica (efeito TRIP - *Transformation Induced Plasticity*), e posterior recozimento para a reversão da martensita em austenita, obtendo estruturas refinadas com ganho na resistência mecânica [1, 4, 5].

No entanto, desenvolver uma estrutura de grãos finos e com elevada resistência conduz a necessidade de se avaliar como garantir a manutenção das propriedades ao realizar processos de união de peças/partes destes materiais ou até mesmo de chapas na forma de bobinas para processamento em linhas contínuas. Sendo a soldagem uma opção de processo de união amplamente utilizado na fabricação de componentes em diversas áreas industriais. Soldagens de alta intensidade, como soldagem a laser e por feixe de elétrons, são processos que possibilitam soldas com melhores qualidades em termos de se obter zonas de fusão (ZF) e termicamente afetada (ZTA) mais estreitas, menores distorções e defeitos, pois provocam um baixo aporte térmico e alta velocidade de soldagem, acarretando em um resfriamento rápido [6, 7]. Com isso, o objetivo deste trabalho foi otimizar os parâmetros de velocidade e potência adotados na soldagem a laser Yb:fibra de chapas extraídas ao longo das etapas do processamento termomecânico para reversão da martensita em austenita de um aço inoxidável austenítico ASTM 201LN com efeito TRIP, em comparação com a condição de partida laminada a quente e recozida a 1050 °C. Foram realizadas análise macroestrutural (quanto ao aspecto superficial das juntas soldadas) e microestrutural (transversal a linha de solda), analisando as microestruturas e dimensões dos cordões de solda, através do registro macro com câmera digital e observação micro com auxílio de um microscópio óptico (MO).

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Material e métodos

O material em estudo consiste em um aço inoxidável austenítico ASTM 201LN, na forma de chapas fornecidas pela empresa APERAM South América com aproximadamente 5 mm de espessura na condição laminada a quente e posteriormente submetida ao recozimento contínuo com temperatura de encharque de 1050 °C. A composição química deste material está descrita na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% em massa) do AIA 201LN fornecido pela APERAM South America.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu
0,03	6,9078	0,3088	0,0381	0,0009	17,0043	4,0093	0,0188	0,0034	0,0239
Co	V	Nb	Pb	B	Ti	Sn	W	N	
0,0463	0,0428	0,0224	0,0073	0,0006	0,0058	0,0029	0,0017	0,2000	

A etapa de processamento termomecânico, em escala laboratorial, consiste de duas etapas de laminação a frio intercaladas por tratamento térmico de recozimento para reversão, onde foram extraídas amostras das duas etapas de recozimento, nas quais a reversão da martensita para austenita foi completa, denominadas 1TTTA e 2TTTA (amostras extraídas da primeira e segunda etapa de recozimento, respectivamente). Estas amostras foram selecionadas a fim serem comparadas quanto aos aspectos estruturais de suas juntas soldadas a laser com a condição como recebida (CR).

Particularmente nas etapas de laminação o aço inoxidável austenítico ASTM 201LN, com dimensão de 8,5 cm x 4 cm (Direção de laminação (DL) x Direção transversal a de laminação (DT)), foi laminado em temperatura ambiente (~25 °C), com oito passes de laminação e deformação com aproximadamente 10% de redução na espessura a cada passe, com intuito de induzir a transformação martensítica por deformação. Para isso, foi utilizado um laminador piloto FENN MFG, modelo D-51719:1973, operado em configuração duo com cilindros de diâmetro 133,70 mm, localizado no Laboratório de Tratamento Termomecânico do Instituto Militar de Engenharia (IME).

As amostras laminadas foram cortadas com dimensões de (2,5 cm) DL x (2,0 cm) DT, em uma máquina de corte na dependência do laboratório de Metalografia do IME, e conduzidas para a etapa de recozimento, para reversão da martensita em austenita, sob as condições de temperatura e tempo iguais a 750 °C e 15 minutos, utilizando forno mufla Quimis Q-138-M-24, localizado próximo ao laminador. O recozimento foi feito com um prévio aquecimento do forno na temperatura de encharque, para introdução das amostras no forno quando estabelecida a temperatura, tendo início do tempo de encharque definido pelo restabelecimento da temperatura após o fechamento da porta do forno e por fim resfriamento ao ar.

Antes dos testes de soldagem as amostras 1TTTA e 2TTTA foram submetidas a uma decapagem ácida (utilizando uma solução de ácido clorídrico, ácido nítrico 65% e água destilada, na proporção 1:1:1) para remover a camada de óxido formada na superfície das peças na etapa de recozimento para reversão.

O laser utilizado neste estudo de soldagem foi o de Yb:Fibra de 2 kW de potência média (IPG, Modelo YLR-2000) e comprimento de onda de 1,07 µm, dotado de uma fibra de saída com 50 µm de diâmetro e 5 m de extensão, instalado no Laboratório Multiusuário de Desenvolvimento de Aplicações de Laser e Ótica (DEDALO) da Divisão de Fotônica (EFO) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv). Uma unidade de acoplamento de fibras faz a conexão de uma segunda fibra com 100 µm de diâmetro e 10 m de comprimento que é utilizada nos processos de soldagem. A fibra secundária é conectada a um colimador óptico formando o sistema de acoplamento do feixe. A cabeça de processo foi acoplada a uma mesa XYZ, com comando numérico computadorizado (CNC), por meio do software EMC2. Utilizou-se como parâmetros fixos de diâmetro do feixe de laser de 0,1 mm (utilizando lentes de colimação e de focalização iguais a 160 mm de distância focal) com foco em cima da amostra e argônio (Ar) como gás de proteção com vazão de 10 L/min. Os parâmetros variados foram velocidade de soldagem e potência do laser (Tabela 2).

A potência inicial foi definida de acordo com as espessuras das amostras (também descritas na Tabela 2) utilizando três velocidades de soldagem diferentes. Em seguida, testou-se uma potência menor, diminuindo também a velocidade (em dois valores distintos) com o intuito de assegurar a penetração total. E por último, fizeram-se dois testes com uma velocidade de soldagem ainda menor, mudando a potência.

Tabela 2. Parâmetros variáveis dos testes de soldagem a laser.

Testes	Velocidades (mm/min)	CR	1TTTA	2TTTA
		(5 mm de espessura)	(2 mm de espessura)	(1 mm de espessura)
Potência (W)				
1	1000	2000	1000	500
2	1500	2000	1000	500
3	1250	2000	1000	500
4	500	1500	750	375
5	750	1500	750	375
6	250	1000	500	250
7	250	1250	625	313

A fim de analisar as microestruturas e dimensões dos cordões de solda via microscopia óptica (MO), as amostras tiveram que ser submetidas a algumas etapas de preparação, as quais estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Etapas de preparação das amostras para análise via MO.

Etapas de preparação	Procedimento
Corte por jato d'água Transversal a linha de solda	Foram realizados cortes ao longo da chapa para extrair amostras do meio do comprimento da linha da solda, utilizando uma máquina de corte por jato d'água Mash 2 da Flow, com grãos de areia com granulometria de 80 micrômetros, localizado na Fábrica de Material de Comunicações e Eletrônica (FMCE), localizada na cidade do Rio de Janeiro / RJ.
Corte Longitudinal a linha de solda, no metal base	Corte longitudinal a linha de solda, na região do metal base, a fim de ajustar a dimensão da amostra para o embutimento da seção transversal das amostras de cada teste de soldagem, utilizando uma máquina de corte de precisão com disco diamantado e velocidade de 150 rpm.
Embutimento	Embutimento da seção transversal das amostras de cada teste de soldagem, utilizando resina acrílica de cura a frio com seu respectivo catalisador.
Lixamento	Preparação metalográfica com lixas d'água de granulometrias de 220, 400, 600, 1500, 2000 e 2500 mesh e lubrificação/refrigeração com água corrente.
Polimento eletrolítico	Para o polimento eletrolítico utilizou-se uma solução 20% de ácido perclórico (concentração 70% P.A) em álcool etílico absoluto à temperatura ambiente, com tensão e tempo descrito na Tabela 4.
Ataque eletrolítico	Ataque eletrolítico para revelar os contornos de grãos e a morfologia das fases. Onde foram testadas duas soluções, sendo uma composta por 10 g de ácido oxálico e 100 mL de água destilada e outra composta por ácido nítrico 65% e água destilada, na proporção 1:1, com tensão e tempo descrito na Tabela 4.

O tempo e a tensão utilizados para a realização do polimento e ataque eletrolítico em cada uma das amostras em estudo são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Tempo e tensão utilizados nas etapas de polimento e ataque eletrolítico para cada amostra.

Amostras	Testes de soldagem	Polimento eletrolítico	Ataque eletrolítico com ácido oxálico	Ataque eletrolítico com ácido nítrico
CR	1 e 2	25 V por 11 s	12 V por 13 s	-
	3 e 4	25 V por 10 s	12 V por 15 s	-
1TTTA	1 e 2	20 V por 11 s	-	1 V por 05 s
	3 e 4	20 V por 10 s	12 V por 06 s	-
2TTTA	1 e 2	20 V por 05 s	20 V por 02 s	-
	3 e 4	20 V por 05 s	20 V por 02 s	-

Foi utilizado um microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX53M, com uma câmera digital acoplada ao mesmo e controlada pelo software LC Micro, localizado no laboratório de metalografia do IME.

2.2 Resultados e discussão

Com o uso de uma câmera digital, foram registradas imagens das superfícies superior e inferior (face e raiz da solda) das chapas soldadas com o intuito de observar o aspecto macroestrutural superficial resultante dos testes de soldagem (Figura 1).

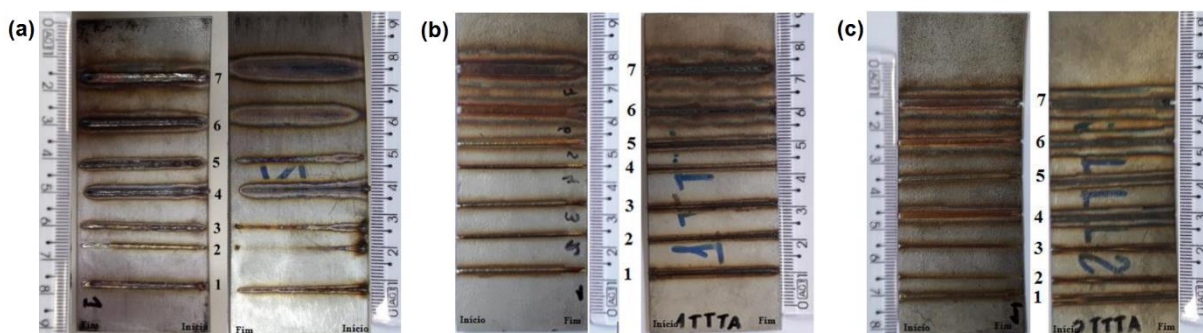


Figura 1. Macrografias da face e raiz das amostras: (a) CR, (b) 1TTTA e (c) 2TTTA, conforme parâmetros dos testes descritos na Tabela 2.

Para a amostra CR, observou-se que somente nos testes 1 e 4 obtiveram uma penetração total em toda a extensão da solda. Sendo que o teste 1 exibiu um cordão de solda mais estreito (aproximadamente 2 mm) do que o teste 4 (aproximadamente 3 mm). O aumento da velocidade nos testes 2 e 3, a partir do teste 1, e no teste 5, a partir do 4, impediu a penetração total da peça, assim como a diminuição da potência dos testes 6 e 7, mesmo que tenha diminuído a velocidade também. Nas amostras 1TTTA e 2TTTA todos os testes alcançaram penetração total, contudo, ao observar a imagem da raiz da solda, os testes 6 e 7 apresentaram cordões de solda extremamente largos e maior efeito térmico, quando comparadas às outras. Os testes 1, 2, 3 e 4 foram os que exibiram as soldas mais estreitas e menor efeito térmico para a amostra 1TTTA e para a amostra 2TTTA foram os testes 1, 2 e 3. Nos testes 6 e 7 da amostra 2TTTA o laser provocou um corte nas extremidades, isso pode ser devido à baixa velocidade de soldagem empregada, provocando um calor excessivo na peça de trabalho, possibilitando a ablação do material.

As imagens macrográficas possibilitaram avaliar os testes de soldagem que alcançaram aparente penetração total e soldas que apresentaram cordões de solda mais estreitos. Com isso, foram selecionados os testes de cada amostra a serem analisados via MO, que foram: testes 1 e 4 para a amostra CR e 1, 2, 3 e 4 para as demais amostras.

As análises microestruturais via MO foram realizadas com aumento de 50x, na espessura das chapas selecionando amostras do meio do comprimento das soldas, em medida única por condição, que possibilitou realizar as medidas da face, meio e raiz, assim como, analisar a morfologia e formato dos cordões de solda.

Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentadas as imagens via MO dos cordões de solda das amostras CR, 1TTTA e 2TTTA, respectivamente.

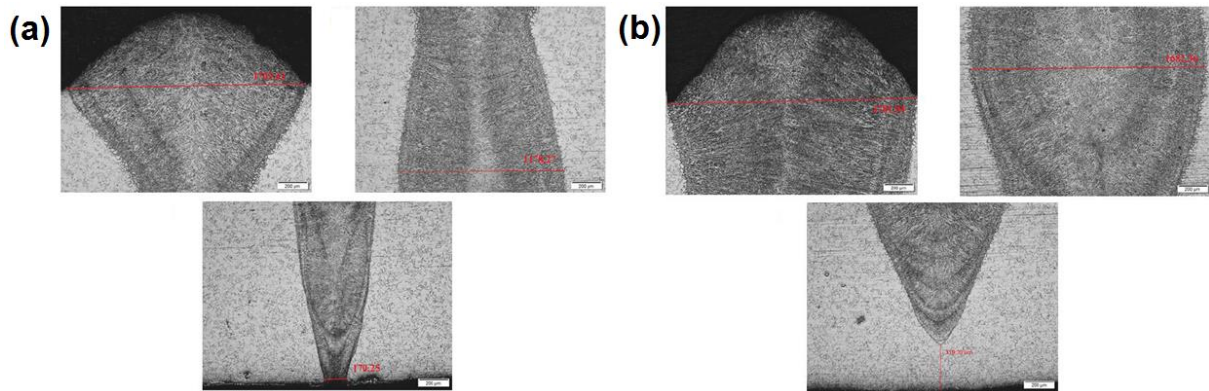


Figura 2. Imagens via MO dos testes de soldagem (a) 1 e (b) 4 da amostra CR com aumento de 50x, conforme parâmetros dos testes descritos na Tabela 2.

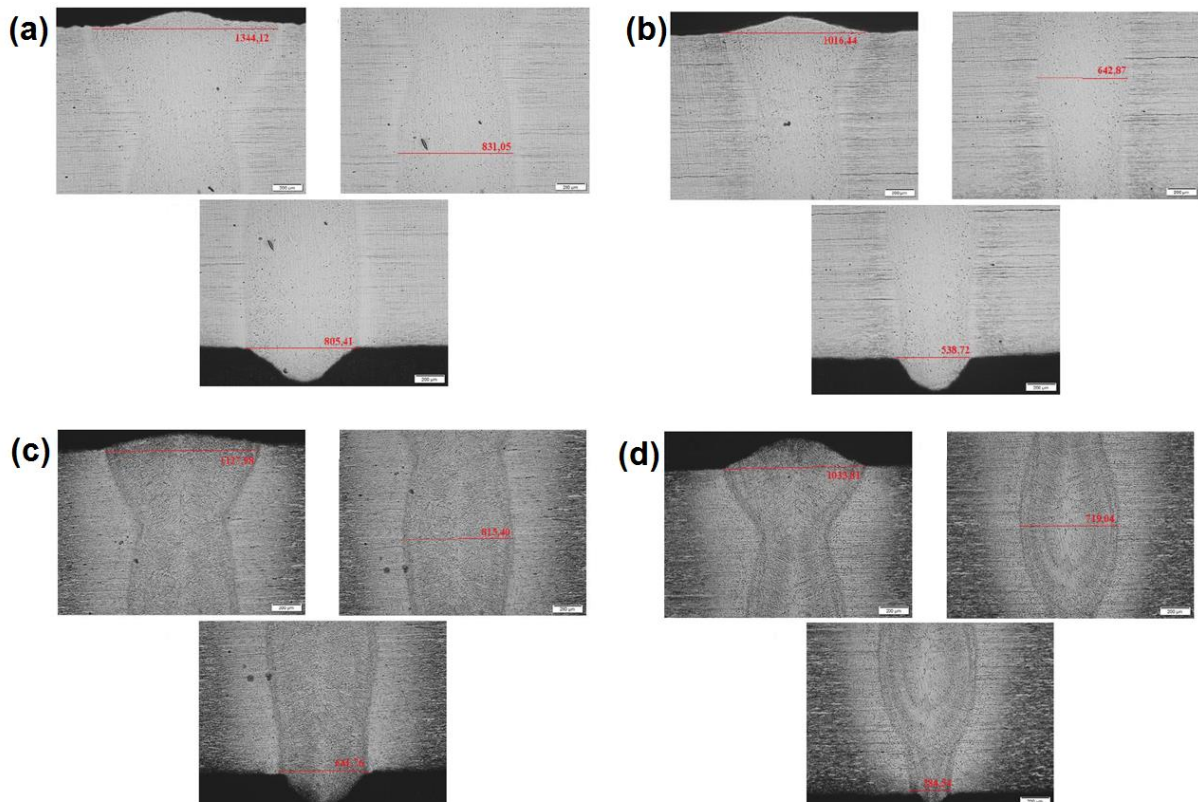


Figura 3. Imagens via MO dos testes de soldagem (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4 da amostra 1TTTA com aumento de 50x, conforme parâmetros dos testes descritos na Tabela 2.

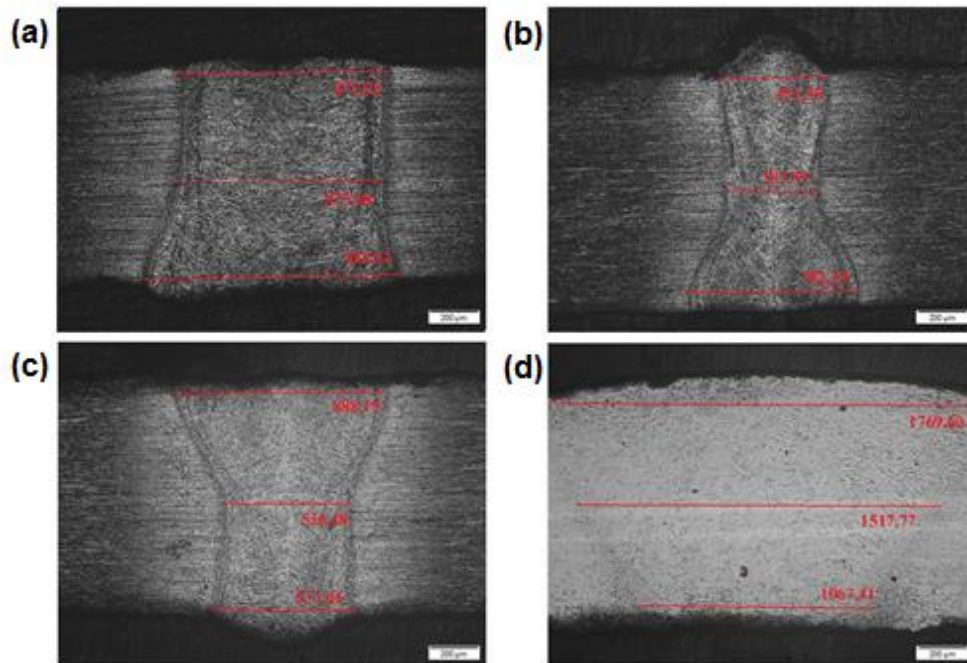


Figura 4. Imagens via MO dos testes de soldagem (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4 da amostra 2TTTA com aumento de 50x, conforme parâmetros dos testes descritos na Tabela 2.

Todos os testes de solda apresentaram um cordão de solda sem discontinuidades, ou seja, sem presença de porosidades e trincas, com desenvolvimento da poça de fusão essencialmente simétrica em relação ao eixo do feixe laser, onde se verifica a presença de dendritas e grãos colunares acompanhando o fluxo de resfriamento do processo de soldagem. As soldas alcançaram penetração total, com exceção do teste 4 da amostra CR (as dimensões de topo, meio e raiz da dos testes 1 e 4 da amostra CR estão descritas na Tabela 5).

Tabela 5. Larguras (mm) da face, meio e raiz das soldas da amostra CR, conforme parâmetros dos testes descritos na Tabela 2.

Testes	Face	Meio	Raiz
1	1,709	1,178	0,170
4	1,781	1,682	-

As micrografias obtidas via MO dos testes 1 e 2 da amostra 1TTTA, que sofreram ataques eletrolítico com ácido nítrico, não permitiram observar uma microestrutura da poça de fusão de forma bem definida, mas o limite da zona de fusão foi detectado, possibilitando a medição de face, meio e raiz da solda. O teste 2 alcançou as menores dimensões de face e meio da solda para essa amostra. A menor largura da raiz foi obtida por meio do teste 4. As maiores larguras de face, meio e raiz foram as do teste 1. O aumento da velocidade entre os três primeiros testes de soldagem possibilitou a diminuição de todas as dimensões dos cordões de solda, assim como a diminuição da potência do laser e velocidade de soldagem do teste 4, conforme pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6. Larguras (mm) da face, meio e raiz das soldas da amostra 1TTTA, conforme parâmetros dos testes descritos na Tabela 2.

Testes	Face	Meio	Raiz
1	1,344	0,831	0,805
2	1,016	0,642	0,538
3	1,127	0,815	0,641
4	1,033	0,719	0,284

Na amostra 2TTTA, os testes 1 e 4 não seguiram a tendência de um formato do tipo cone, como nas outras amostras. Pode ser consequência da menor velocidade de soldagem empregada. A velocidade interfere diretamente na largura da poça de fusão, devido ao aumento do aporte térmico, afetando o formato da solda. Como essa amostra é a de menor espessura o efeito da diminuição da velocidade na solda foi mais pronunciado, uma vez que chapas mais finas são mais sensíveis ao aquecimento. Além de dimensões extremamente largas, quando comparada com as dos outros testes, o teste 4 não apresentou uma linha central na zona de fusão, o que também pode ter sido consequência da velocidade empregada, pois em velocidades mais baixas as isotermas tendem a apresentar-se com uma forma elíptica e com menor formação de grãos colunares. Na região central os grãos se orientam em direção à poça de fusão sem formar uma linha central [8, 9]. Assim como a amostra 1TTTA, o teste 2 foi o que alcançou menores dimensões de face e meio da solda para a 2TTTA, a menor dimensão de raiz foi obtida pelo teste 3, como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7. Larguras (mm) da face, meio e raiz das soldas da amostra 2TTTA, conforme parâmetros dos testes descritos na Tabela 2.

Teste	Face	Meio	Raiz
1	0,875	0,875	0,883
2	0,451	0,387	0,702
3	0,888	0,536	0,537
4	1,769	1,517	1,067

3 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos e discussão realizada, as principais conclusões que se destacam são:

- Nas amostras tratadas termomecanicamente, através de análises macroscópicas, os testes que exibiram menores dimensões de cordão de solda foram os testes 1, 2, 3 e 4;
- No geral, as amostras apresentaram formato do tipo cone, característico de soldagem a laser;
- Não foram observadas porosidades ou trincas;
- As soldas apresentaram zona de fusão com morfologia dendrítica, com grãos colunares que crescem no sentido do gradiente de temperatura, perpendicular à linha central da zona de fusão;
- Através das imagens via MO, observou-se que o teste 2 (com maior potência do feixe laser, selecionada para os testes em função da espessura, e maior velocidade de soldagem empregue), de modo geral, foi o que apresentou soldas mais estreitas para as amostras 1TTTA e 2TTTA. Enquanto na

amostra CR, somente o teste 1 de soldagem (maior potência e velocidade de 1000 mm/min) alcançou penetração total da peça;

- A diminuição da potência do laser, com relação à potência de partida, não favoreceu a otimização da soldagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Capes pela bolsa de doutorado de Náhrima C. Moraes, e ao CNPq pela bolsa de doutorado de Camila O. Souza e Produtividade em Pesquisa PQ-2 (Processos 307798/2015-1 e 312313/2018-7) de Andersan S. Paula; a Aperam South America pela doação do material em estudo e ao Instituto de Estudos Avançados (IEAv) pela disponibilização do equipamento de soldagem a laser Yb:fibra. Ao Cel Julio Cesar Soares de Oliveira e a equipe da FMCE pela viabilização dos cortes a jato d'água.

REFERÊNCIAS

- 1 Outokumpu Oyj. Handbook of Stainless Steel. Outokumpu Oyj, 2013;
- 2 Charles, J.; Mithieux, J.D.; Santacreu, P.O.; Peguet, L.; The ferritic stainless steel family: the appropriate answer to nickel volatility?, Science and Market 6(2008), pp.703-717.
- 3 McGuire, M.F. Stainless steels for design engineers. Asm International, 2008.
- 4 Behjati, P. et al. Influence of prior cold rolling reduction on microstructure and mechanical properties of a reversion annealed high-Mn austenitic steel. Materials Science and Engineering: A, v. 650, p.119-128, jan. 2016.
- 5 Hamada, A.S., et al. Enhancement of mechanical properties of a TRIP-aided austenitic stainless steel by controlled reversion annealing. Materials Science and Engineering: A, v. 628, p.154-159, mar. 2015.
- 6 Kou, S. Welding metallurgy. New Jersey, USA, 3 ed., 2003.
- 7 ASM International. Welding, Brazing and Soldering. V. 6. ASM Handbook, 1998.
- 8 Siqueira, H. M. S. Soldagem a Laser Autógena em Passe Único de Juntas T de Alumínio AA 6013-T4 com Alta Resistência Mecânica. [Tese de doutorado]. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2016.
- 9 Lippold, J.C. et al. Welding Metallurgy and Weldability. John Wiley & Sons Incorporated, 2015.