

Caracterizações Mecânicas e Microestruturais da Costura em Tubos de Aço Inoxidável Ferrítico - AISI 439  
Soldada com Laser de CO<sub>2</sub><sup>1</sup>

Mechanical and Microstructural Characterization of Seam Welded with CO<sub>2</sub> Laser in Ferritic Stainless Steel -  
AISI 439<sup>1</sup>

Thiago Rocha de Barros<sup>2</sup>, Daniella Caluscio dos Santos<sup>3</sup>, Maurício David Martins das Neves<sup>4</sup>

thiago.barros@aperam.com; dcaluscio@fei.edu.br; mdneves@ipen.br

### **Resumo**

*Tubos de aço inoxidável AISI 439 apresentam alterações de características na região da costura realizada por soldagem envolvendo: a microestrutura, as propriedades mecânicas e a resistência a corrosão. A soldagem a laser é um processo que vem sendo implantado em diversas empresas fabricantes de tubos de aço inoxidável, em razão elevada automatização e mínima zona afetada pelo calor propiciada na região da costura destes tubos. As propriedades das juntas soldadas foram avaliadas por caracterização microestrutural (microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura), caracterização mecânica (microdureza Vickers, achatamento reverso e flangeamento, segundo a norma ASTM A-268-10) e ensaio de suscetibilidade a corrosão intergranular com base na ASTM A-763. Observou-se que a partir de 67 % da potência do laser foi possível alcançar penetração total na costura do tubo. Nos ensaios mecânicos de achatamento reverso e flangeamento observou-se a aprovação das amostras, quanto utilizado os valores de 67, 90 e 100 % da potência do laser. Em todas as condições de soldagem verificou-se uma maior dureza Vickers da zona de fusão em relação ao do metal base. No ensaio de suscetibilidade a corrosão intergranular, ASTM A763, aparentemente não foi observada a presença de corrosão intergranular nas juntas soldadas nas condições usadas neste trabalho.*

*Palavras Chave: 1. Aço inoxidável ferrítico; 2. AISI 439; 3. Soldagem com laser de CO<sub>2</sub>; 4. Caracterização mecânica; 5. Caracterização microestrutural.*

### **Abstract**

Stainless steel tubes AISI 439 present changes in the region of the seam made by welding involving: microstructure, mechanical properties and corrosion resistance. The laser welding is a process that has been implemented in several manufacturers of stainless steel pipes, due to high automation and minimal heat affected zone in the region of the seam these tubes. The properties of the welded joint were evaluated by microstructural characterization (optical microscopy and scanning electron microscopy), mechanical characterization (Vickers hardness, flatness and reverse flange testing with ASTM A-268-10) and testing of susceptibility to intergranular corrosion based the ASTM A-763. It was observed that from 67% of the laser power was possible to achieve full penetration into the seam of the tube. In the mechanical tests of reverse flattening and flaring observed the approval of the samples, as used values of 67, 90 and 100% laser power. In all welding conditions there is a greater Vickers hardness of the melting zone in relation to the base metal. In the test of susceptibility to intergranular corrosion ASTM-A763, was apparently not observed the presence of intergranular corrosion at the welded joints under the conditions used in this study.

*Key-words: 1. Ferritic stainless steel; 2. AISI 439; 3. CO<sub>2</sub> laser welding; 4. mechanical characterization; 5. microstructural characterization*

### **1. Revisão Bibliográfica**

Os aços inoxidáveis ferríticos estão sendo usados em diversos setores, como por exemplo, na área de petróleo em tanques para armazenamento de óleo diesel, usinas de açúcar e álcool, indústrias químicas, vagões ferroviários e linha branca de eletrodomésticos. A alta condutividade térmica do AISI 439 se comparada com o AISI 304 aumenta a eficiência dos evaporadores e trocadores de calor, em consequência do baixo coeficiente de dilatação a soldagem ocorre sem grandes distorções geométricas [1-3]. Em razão da ausência de níquel nos aços inoxidáveis ferríticos favorece-se a relação custo-benefício nestes setores quando do uso deste material [4, 5].

A soldagem afeta as propriedades mecânicas, térmicas e metalúrgicas nos inoxidáveis ferríticos. Portanto, o conhecimento do comportamento mecânico e microestrutural da região soldada são de significativa importância

nestes aços [6]. Um problema que pode ser encontrado quando estes aços são submetidos a altas temperaturas, em uso ou após a realização de soldagem é a sensitização associada à corrosão intergranular [7].

Os aços inoxidáveis ferríticos em geral apresentam menor soldabilidade, em relação aos aços inoxidáveis austeníticos, por causa da redução da ductilidade e da tenacidade em consequência do crescimento excessivo de grão, aumento da sensibilidade à corrosão intergranular pela precipitação de carbonetos e nitretos e a formação de uma rede de martensita ao longo dos contornos dos grãos de ferrita [4, 5-7].

No caso específico de tubos de aço inoxidável AISI 439 com costura, a alteração da microestrutura e a redução da resistência à corrosão são preocupações constantes na região de fechamento do tubo. Na área de petróleo, o aumento da utilização do processo de soldagem a laser e a grande demanda na utilização de tubos de aço inoxidável ferrítico AISI 439 são assuntos que necessitam de estudo [2, 3].

A soldagem laser é tem potencial aplicação para união em aços ferríticos, como o AISI 439, em razão da elevada concentração de energia, o que provoca reduzida zona afetada pelo calor e baixo aporte de calor na junta soldada [8]. A elevada velocidade de resfriamento na junta, em relação aos outros processos tradicionais, propicia obter uma microestrutura mais estável, com mínima segregação e pequeno tamanho de grão, o que eleva diversas propriedades mecânicas da junta soldada. Na soldagem dos aços ferríticos é importante não fornecer um elevado aporte térmico para evitar o crescimento do grão, que pode fragilizar o material [7].

As propriedades dos aços inoxidáveis ferríticos soldados com o processo laser foi estudada por Tullin [9] e verificou-se que as juntas soldadas apresentavam elevada tenacidade e alta resistência a corrosão. Rakesh Kaul e outros pesquisadores [10] observaram que a soldagem a laser foi eficiente no controle do tamanho de grão na zona de fusão e limitou a dimensão da ZAC em 1,2 mm.

O fenômeno de sensitização nos aços inoxidáveis ferríticos é um pouco diferente do que ocorre em aços inoxidáveis austeníticos. A diferença consiste na baixa solubilidade de nitrogênio na estrutura ferrítica, que resulta na precipitação de nitretos de cromo ( $\text{Cr}_2\text{N}$ ), além da precipitação de carbonetos de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  e  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ). Os precipitados podem causar sensitização e perda da resistência à corrosão em aços inoxidáveis ferríticos [11].

A sensitização nesses aços é produzida pela precipitação que ocorre no resfriamento, após aquecimento acima da temperatura de cerca de  $925^\circ\text{C}$ , pois são necessárias maiores temperaturas para solubilizar elementos intersticiais. Devido ao elevado intervalo da temperatura de sensitização, a corrosão intergranular em aços inoxidáveis ferríticos ocorre nas regiões da ZTA mais próximas da zona fundida. [12, 13] (Modenesi,2001; Kou, 2003).

As taxas de difusão de carbono (C) e cromo (Cr) são maiores na ferrita do que na austenita, então nos aços ferríticos sem elementos estabilizadores resfriados por processos industriais podem ocorrer precipitação de uma 2ª fase. Neste caso a redução do teor de carbono e nitrogênio para prevenir a formação de carbonetos e nitretos também pode não ser muito efetiva. Portanto, é comum em muitas grades de aços inoxidáveis ferríticos uma combinação de pequena quantidade de carbono e nitrogênio com adição de titânio ou nióbio para prevenir a sensitização [11, 14]. Fases intermetálicas de elementos de liga como cromo e molibdênio podem ser formadas durante a soldagem de aços inoxidáveis. As fases intermetálicas “*sigma*” e “*chi*” são as segundas fases mais comuns que podem ocorrer nos aços inoxidáveis ferríticos e podem se precipitar na zona termicamente afetada destes aços, reduzindo a tenacidade e a resistência à corrosão [11].

A. K. Lakshminarayanan e V Balasubramanian [1] estudaram a evolução microestrutural e as propriedades mecânicas da junta soldada pelo processo laser no aço inoxidável ferrítico AISI 409. A amostra estudada possuía 4 mm de espessura e foi soldada com um sistema de laser de  $\text{CO}_2$ , sendo tomada como condição ideal de soldagem, a combinação de parâmetros que apresentaram uma região soldada livre de defeitos, como porosidades, trincas e penetração total.

Avaliaram ainda a dimensão do cordão e a caracterização microestrutural do perfil da solda. Verificaram que ocorreu penetração total da solda e a região soldada estava isenta de porosidade e trincas. Ao realizar o ensaio de tração foram obtidos valores de 536 MPa no metal base (MB) e 548 MPa na junta soldada. No ensaio mecânico de dobramento reverso foram obtidos resultados satisfatórios, não evidenciando a presença de trincas ou qualquer outra descontinuidade na região soldada. No ensaio de dureza Vickers, foram realizadas medidas no centro da ZF, na interface da ZF com metal base (MB) e afastando-se progressivamente do centro da ZF para o MB. Após realizar o ensaio foram obtidos maiores valores de dureza na ZF (zona de fusão), que foi diminuindo com o afastamento desta região para o MB.

Passos [15] estudou a microestrutura obtida em juntas soldadas com os processos laser e TIG. Foram comparadas as duas estruturas obtidas, empregando-se microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e medições de microdureza Vickers. No caso da soldagem por feixe de laser, não foi possível identificar a zona termicamente afetada pelo calor, devido à alta concentração de calor em uma pequena área e a rápida solidificação. Foram identificadas a presença de partículas grosseiras de TiN nas amostras soldadas pelo processo TIG, porém não foram evidenciadas estas partículas quando soldada com processo laser.

Na análise de microdureza foram obtidos valores mais elevados na zona de fusão e estes foram decrescendo conforme ocorreu o afastamento do centro da ZF até o MB, onde os valores se mantiveram constantes [15]. No

caso da amostra soldada pelo processo TIG, a dureza foi caindo de forma mais gradativa, em consequência do maior aporte térmico do processo, formando assim uma região termicamente afetada pelo calor (ZTA), já no caso do laser os valores caíram bruscamente logo após se distanciar da zona de fusão.

Segundo a norma ASTM A-268-10 [16] tubos com costura de aço inoxidável ferrítico devem ter a região de fechamento por soldagem (costura) avaliada por meio de ensaios mecânicos de achatamento reverso e flangeamento.

Serna-Giraldo [17] recomendou a realização da prática W da norma ASTM A-763 em aços inoxidáveis estabilizados e que foram submetidos a tratamentos térmicos ou a soldagem, visando avaliação da microestrutura. Na norma ASTM A-763 [18] estão incluídas as práticas X, Y, Z e W. Estas práticas são destinadas para avaliar a suscetibilidade a corrosão intergranular nos inoxidáveis ferríticos.

No caso do aço AISI 439 é recomendada a aplicação da prática W. Existe uma diferença de velocidade na dissolução dos grãos decorrentes a orientação cristalográfica, gerando assim uma estrutura do tipo “degrau”. Outra estrutura possível de ser gerada é a do tipo “vala”, esta se forma em consequência da presença de carbonetos de cromo que são dissolvidos durante o ataque [16]. Na ASTM A-763 são mostradas as representações esquemáticas das estruturas obtidas após ensaio da prática W, respectivamente, a estrutura do tipo degrau e do tipo vala.

O presente trabalho tem como objetivo realizar a avaliação de propriedades mecânicas, segundo ASTM A-268-10, caracterização microestrutural e a susceptibilidade a corrosão com base na ASTM A-763 da costura de um tubo de aço inoxidável ferrítico AISI 439 soldada por feixe laser de CO<sub>2</sub>.

## 2. Materiais e Métodos

O material de base utilizado neste estudo foi aço inoxidável ferrítico AISI 439 (UNS S43932) de geometria tubular com 38,10 mm de diâmetro externo e 2,25 mm de espessura. O material utilizado foi cedido pela Aperam Inox Tubos Brasil Ltda. A composição química esta mencionada na tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 439 qual foi o ensaio??

C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	N %	Ti %	Cu %	Nb %	Co %	Fe %
0,011	0,180	0,480	0,022	0,001	17,240	0,170	0,011	0,014	0,152	0,021	0,188	0,022	Bal.

A matéria prima usada estava na forma de bobinas, sendo cortadas em fitas com a largura adequada para a calandragem para geometria tubular, posteriormente soldada com laser de CO<sub>2</sub> visando o fechamento longitudinal do tubo. A sequência de formação visando a calandragem para a geometria tubular e processo de costura do tubo por soldagem longitudinal estão ilustração na figura 1.



Figura 1: Imagem do bocal do feixe de laser. Fonte: Autor.

Alguns parâmetros de soldagem foram mantidos constantes durante a realização da costura e estão mostrados na tabela 2.

Na tabela 3 estão apresentadas a identificação da amostra, a nomenclatura utilizada, a porcentagem da potência do laser empregada e a energia do laser empregada para a realização dos testes.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem laser usados no fechamento (costura) do tubo.

PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Velocidade de avanço	3,3 m/min
Gás de proteção	Argônio puro
Vazão do gás auxiliar	14,4 L/min
Vazão do gás na tocha	4 L/min
Vazão do gás interno	16 L/min
Diâmetro do feixe	0,8 mm
Posição do ponto focal	-1,125mm
Abertura da raiz de junta de topo	0,00mm
Posição de soldagem	1G
Altura do bico de solda	12,5mm

Tabela 3 - Tabela das condições de retirada das amostras variando a potência do Laser.

Amostra	Nomenclatura	Potência do Laser (%)	Energia gerada pelo Laser (W)
1	AM 67	67	4276
2	AM 40	40	2560
3	AM 50	50	3243
4	AM 90	90	5690
5	AM 100	100	6216

As amostras de tubos soldadas foram retiradas de linha de fabricação. Na figura 2 pode ser observada uma imagem dos 5 lotes separados para testes. As amostras foram retiradas sem qualquer tipo de tratamento térmico, conforme, o processo de formação dos tubos em linha e apenas a remoção da face da solda foi realizada logo após o processo de soldagem. Nesta etapa realizou-se inspeção visual das amostras com base na norma ASTM A-268-10. As amostras soldadas nas condições mencionadas na tabela 3 foram preparadas realizando corte na secção transversal do tubo utilizando uma serra de fita, os tubos foram cortados em “meia cana” e embutidas em baquelite para preparação metalográfica, conforme ilustrado na figura 3.

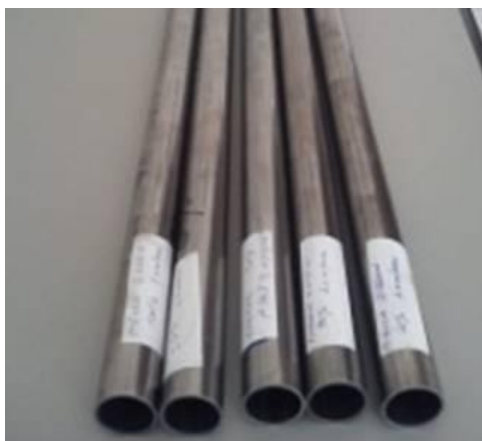


Figura 2: Imagem das amostras para caracterização. Fonte: Autor.

A preparação metalográfica foi realizada usando a sequência de lixas #220, #320, #400 e #600, após as amostras foram submetidas ao polimento com suspensão de diamante na granulometria de 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  e com suspensão de alumina aglomerada de 0,03  $\mu\text{m}$  para acabamento. Após o polimento, foi realizado um ataque químico em uma solução de Villela (5 mL de HCl, 1g de ácido pícrico em 100 mL de álcool etílico 95%) para a revelação geral da microestrutura. O ataque foi realizado por imersão com duração de aproximadamente 30 segundos. A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. Foram observadas as regiões do cordão de soldagem, respectivamente, ZF, ZTA e MB, sendo também realizadas medidas da profundidade de penetração da soldagem, largura do cordão de solda em sua face e na largura da raiz.

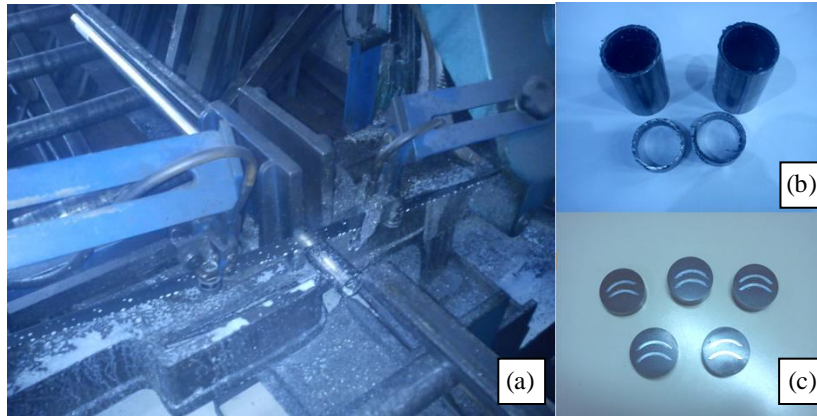


Figura 3: Sequência de corte. (a) corte das amostras, (b) amostras cortadas para ensaio mecânico e metalográfico e (c) embutimento das amostras. **Fonte: Autor.**

O ensaio de dureza Vickers foi utilizado para traçar um perfil de dureza partindo da região soldada, até uma região mais afastada sem alteração da microestrutura, em razão do calor gerado no processo de soldagem. Na figura 4 são mostradas esquematicamente as regiões de medição de dureza realizada nas amostras. No ensaio de dureza foram coletados 5 pontos de cada região e utilizado como carga HV0,5. As regiões ensaiadas foram: zona de fusão (ZF); interface da ZF com o material de base; região situada a uma distância de 2 mm do centro da ZF; região situada a uma distância de 4 mm do centro da ZF e a 6mm de distância do centro da ZF.

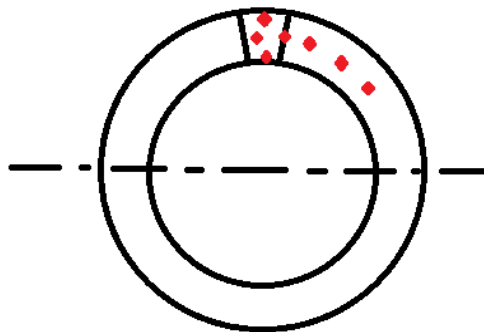


Figura 4: Representação esquemática das regiões e medidas dos pontos de microdureza Vickers.

Foram realizados ensaios mecânicos de achatamento reverso e flangeamento, de acordo, com a norma ASTM A-268-10 para tubos. As amostras para o ensaio de achatamento reverso foram cortados com a dimensão de 6 cm de comprimento, cortados em “meia cana” e a região com a solda foi submetida ao achatamento por meio de uma prensa, até o seu achatamento completo. A sequência de ensaio pode ser evidenciada na figura 5.



Figura 5: Ensaio de achatamento reverso. [1] Antes, [2] durante e [3] depois do ensaio. **Fonte: Autor.**

No ensaio de flangeamento foram usadas amostras cortadas no comprimento de 6 cm e submetidas ao ensaio, conforme ilustrado na figura 6.

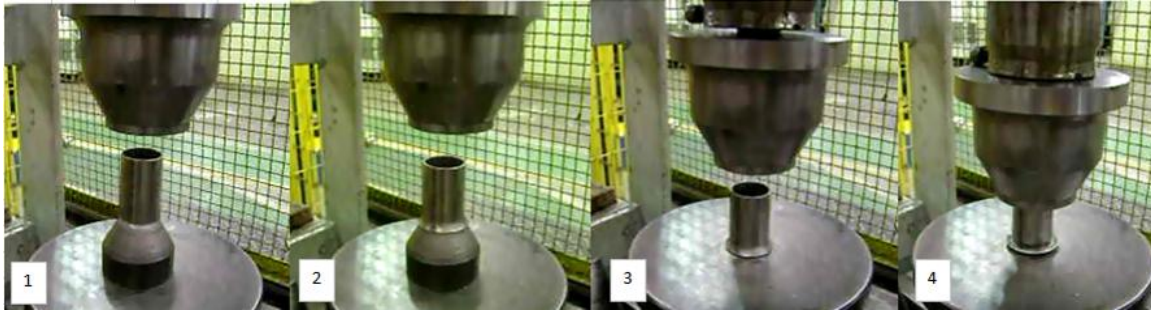


Figura 6: Ensaio de flangeamento. [1] Posicionamento para pré expansão com cone de 60°, [2] Realização da pré expansão, [3] antes do flangeamento e [4] após ensaio de flangeamento. Fonte: Autor.

Após a realização dos ensaios mecânicos, as amostras foram submetidas à inspeção visual e por meio de estereoscópico onde foi verificado se ocorreram trincas ou fissuras na região soldada. Esta observação permitia aprovar ou reprovar a junta soldada com base na norma ASTM A-268-10. Nesta norma ASTM A-268-10 sugere-se que a inspeção deva ser realizada em todo o tubo, devendo estar isento de carepas excessivas. A inspeção visual nos tubos foi realizada numa bancada de inspeção com iluminação adequada.

A susceptibilidade a corrosão foi realizada com base na norma ASTM A-763. O método utilizado foi à prática W, que consistiu num ataque com ácido oxálico com corrente de  $1 \text{ A/cm}^2$  por 90 segundos em uma cuba eletrolítica. As análises foram feitas por microscopia óptica com aumento de 200x e 500x e as imagens obtidas foram comparadas com as incluídas na norma. Observou-se o aspecto em volta do contorno de grão, observando-se o material estava suscetível à corrosão intergranular.

### 3. Resultados e Discussão

Após a realização da inspeção visual dos tubos verificou-se que a amostra AM 40 foi reprovada, apesar da face da solda estar de acordo com o esperado, isenta de trincas e porosidades. No entanto, no interior do tubo foi possível observar que não houve penetração total da solda evidenciada pela falta de raiz da solda. Na inspeção visual das outras amostras não foram identificadas descontinuidades no cordão de solda. Portanto, em todas as condições de soldagem, exceto a condição da amostra AM 40, não foram observados descontinuidades por inspeção visual.

Nas amostras com energia de soldagem gerada pelo laser superior a 4276 W, que são as amostras 4 e 5, notou-se uma raiz mais excessiva, porém sem apresentar cantos vivos, possibilitando a aprovação das amostras.

Medidas da geometria do cordão, respectivamente penetração da solda, largura do cordão na parte superior e largura da raiz da solda foram realizadas, após a preparação metalográfica. As dimensões do cordão estão apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Dimensões do cordão de solda

Amostra	No menclatura	Largura da face do cordão [mm]	Largura da Raiz [mm]	Penetração da solda [mm]
1	AM 67	$1,49 \pm 0,030$	$0,820 \pm 0,003$	$2,30 \pm 0,050$
2	AM 40	$1,18 \pm 0,041$	$0,000 \pm 0,000$	$1,45 \pm 0,050$
3	AM 50	$1,44 \pm 0,035$	$0,233 \pm 0,004$	$2,14 \pm 0,038$
4	AM 90	$1,45 \pm 0,040$	$1,170 \pm 0,020$	$2,39 \pm 0,020$
5	AM 100	$1,48 \pm 0,025$	$1,190 \pm 0,020$	$2,42 \pm 0,036$

As amostras AM 40 e AM 50 foram obtidas com as menores potências do laser, 40 % e 50 %, respectivamente. Nota-se que os valores de penetração foram os menores valores e não atingiram a penetração total da parede do tubo de 2,25 mm. A potência gerada pelo laser abaixo de 50 %, gerando em torno de 3243 W, não foi suficiente para fundir o MB em toda a espessura da peça. Nestas condições a energia foi absorvida basicamente por condução e não ocorrendo a geração do “key-hole”, explicando assim o motivo de não ter ocorrido à penetração total da solda.

As amostras AM 90 e AM 100 foram soldadas com os maiores valores de potência, 90 % e 100 % respectivamente. Os valores obtidos foram os maiores tanto na penetração como na largura da raiz da solda. Nestas condições foram alcançadas penetrações além da espessura do tubo, respectivamente, de 0,13 mm na AM 90 e de 0,17 mm na AM 100. Os valores de 90% e 100% da energia do laser chegaram respectivamente às potências de 5690 e 6216 W. Portanto, a energia absorvida pelo material foi maior e alcançou maior

profundidade de penetração. A amostra AM 67 com 67% da potência do laser, não apresentou um grau de penetração excessivo, ultrapassando somente 0,05mm em relação à espessura do tubo.

A largura do cordão da solda na parte superior (face) do tubo se manteve sem elevada dispersão, como verificado na tabela 4. A exceção foi a amostra AM 40 que alcançou o valor de 1,18 mm, em razão da menor energia imposta na junta soldada, enquanto as outras amostras ficaram entre 1,44 mm até 1,49 mm,. A largura na raiz do cordão para menor potência ficou próxima a zero, pois não existiu penetração total. As outras condições (juntas 3, 1, 4 e 5) tiveram valores crescentes de largura, em razão do aumento da energia do laser.

Na figura 7 são mostradas imagens obtidas por meio de microscopia óptica da região da costura dos tubos, indicando a penetração de soldagem para cada condição do feixe incidente.

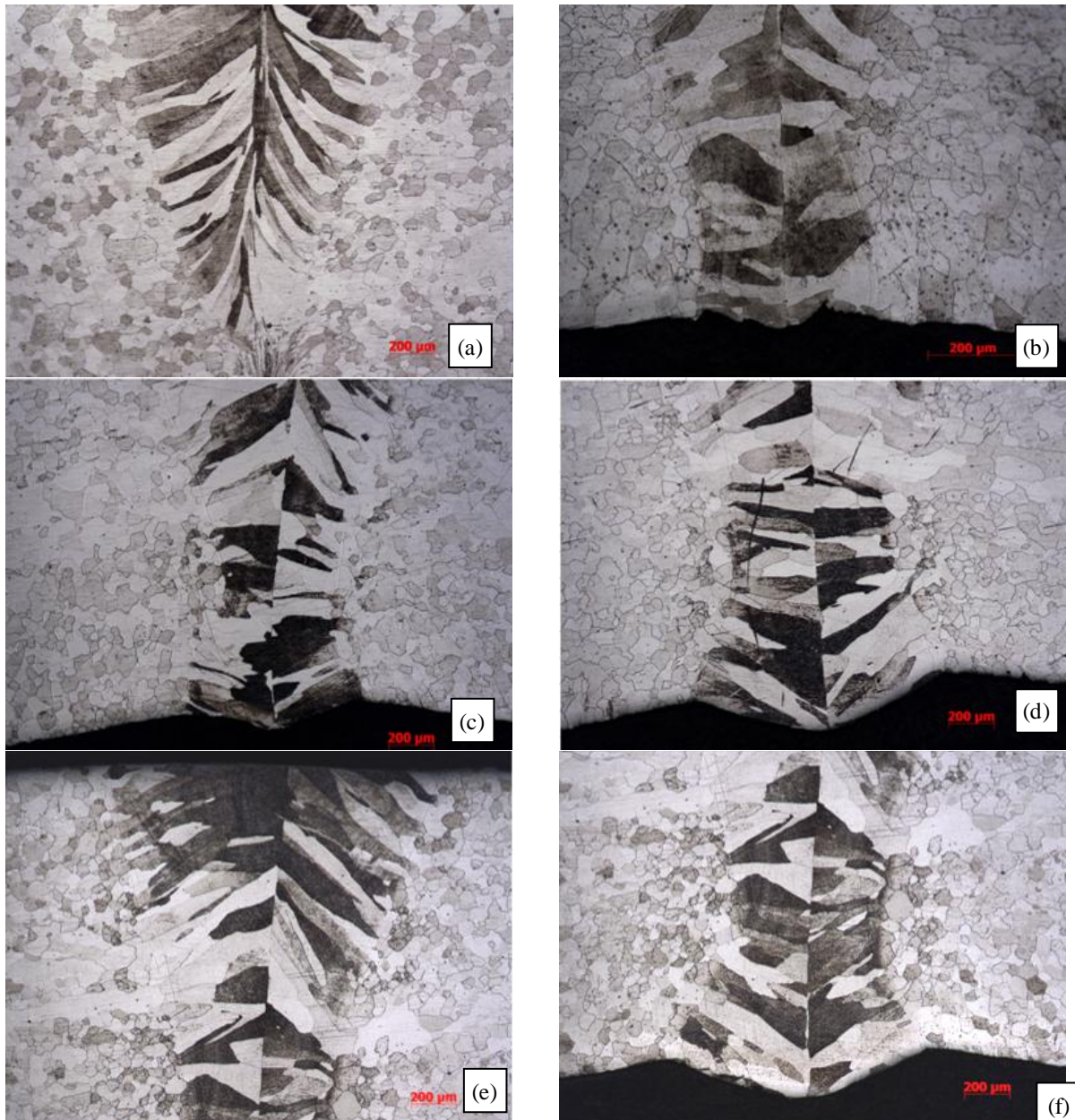


Figura 7: Imagem obtida por microscopia óptica da secção transversal da região soldada – (a) AM 40, (b) AM 50, (c) AM 67, (d) AM 90, (e) AM 100 face da solda e (f) AM 100 raiz do cordão.

O início de solidificação da ZF ocorre por meio do crescimento epitaxial, provocado pela da redução de energia da interface, possibilitando a formação de um sólido sobre outra superfície com orientação cristalina similar ao MB [19, 20]. A solidificação prossegue para o centro da ZF, onde o crescimento dos grãos ocorre na direção paralela ao máximo gradiente de temperatura, favorecendo um crescimento competitivo entre os grãos. Os grãos com orientação favorável à direção do máximo gradiente de temperatura apresentam maior crescimento, em relação, aos grãos que coincidem com direções menos favoráveis [21]. Evidências de

crescimento epitaxial são observadas na figura 7 e seu crescimento seguiu orientação contrária e paralela à direção de extração do fluxo de calor.

À medida que a potência do laser aumentou os grãos os grãos colunares ficaram mais paralelos em relação à linha da face da solda e da raiz, indicando que a extração de calor se deu aproximadamente com a mesma intensidade ao longo de toda espessura do tubo. Na figura 7a e 7b das amostras soldadas com energia de 2560 e 3243 W, valores correspondentes a AM 40 e AM 50, respectivamente, os grãos tenderam ao crescimento em direção a face da solda, indicando que a região próxima a raiz estava retirando calor com maior intensidade, fazendo com que os grãos se orientassem nessa direção. A microestrutura obtida na ZF é composta de grão colunares com crescimento epitaxial. Estes grãos crescem simetricamente a partir do metal base, formando duas frentes de solidificação que se encontram no centro da ZF.

Os resultados dos ensaios de microdureza Vickers estão apresentados na figura 8 e verifica-se uma dispersão de dureza para amostras soldadas. Foram obtidos valores maiores de dureza no centro da ZF que decresceram à medida que se afasta desta região. Os valores encontrados na interface (ZF/MB) e nos demais pontos foram próximos e dentro do desvio, indicando que o calor gerado dissipado no MB não foi suficiente para alterar a microestrutura a ponto de modificar os valores de dureza. Observa-se que, nas amostras AM40, AM 50, AM 67, AM 90 e AM 100 maiores valores de microdureza na ZF, mas estão próximos entre si.

A partir o centro da ZF até a distância de 6 mm para o MB, os valores de microdureza Vickers não se alteraram significativamente, permanecendo praticamente iguais em todas as regiões. Portanto, a ZTA é pequena e não pode ser identificada por meio deste ensaio. A alteração referente à microdureza somente pode ser notada quando, comparam-se os valores de metal base com zona fundida, em razão da elevada velocidade de resfriamento provocando numa microestrutura bem refinada, maior tensão residual e de maior dureza.

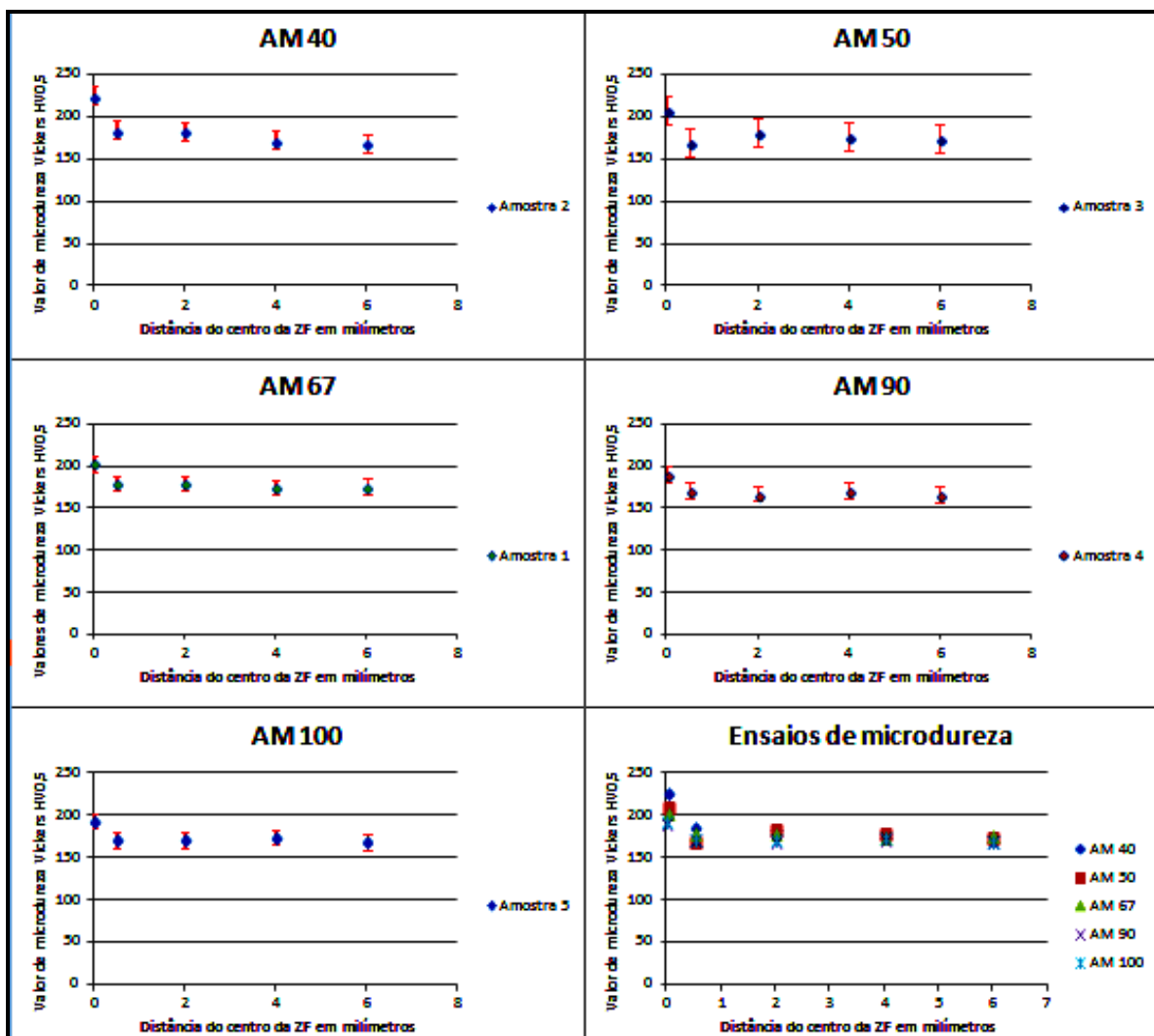


Figura 1: Gráfico do perfil de dureza para as amostras AM 40, AM 50, AM 67, AM 90 e AM 100 iniciando do centro da Zona de Fusão (ZF) passando pela interface ZF/MB e se afastando até a distância de 6 mm com passo de 2 mm entre as medidas.



L. Zhang e outros [22] , observaram maiores valores de dureza na zona de fusão, o que foi atribuída a maior tensão residual provocada pela rápida velocidade de resfriamento da zona de fusão. Neste trabalho ainda foi observado que não ocorreu transformação de fase na zona de fusão e nem nas regiões próximas.

Na figura 9 são observadas imagens das amostras submetidas aos ensaios de flangeamento e achatamento reverso e na tabela 5 são apresentados os resultados obtidos das amostras com base na ASTM A-268-10.

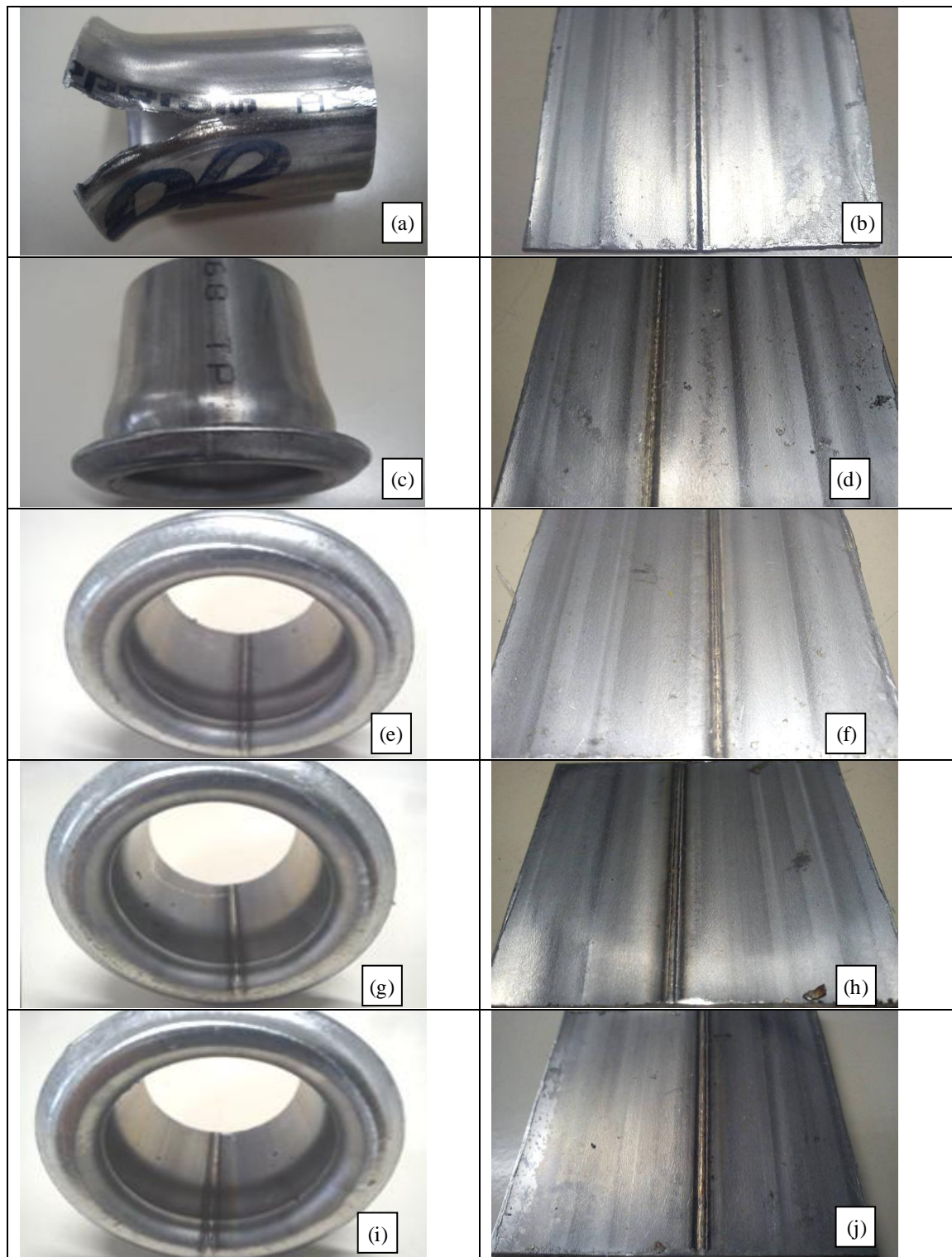


Figura 9: Imagens das amostras submetidas aos ensaios de flangeamento e achatamento reverso da (a) e (b) AM 40, (c) e (d) AM 50, (e) e (f) AM 67, (g) e (h) AM 90 e (i) e (j) AM 100. Fonte: Autor.

Tabela 5: Resultados dos ensaios mecânicos realizados de acordo com a norma ASTM A-268-10.

Amostra	Ensaio	Resultado
AM 40	Flangeamento	Reprovado
	Achatamento Reverso	Reprovado
AM 50	Flangeamento	Aprovado
	Achatamento Reverso	Reprovado
AM 67	Flangeamento	Aprovado
	Achatamento Reverso	Aprovado
AM 90	Flangeamento	Aprovado
	Achatamento Reverso	Aprovado
AM 100	Flangeamento	Aprovado
	Achatamento Reverso	Aprovado

Os resultados mostrados na figura 9 indicam a reprovação da amostra AM 40 nos ensaios mecânicos que foram submetidos. No ensaio de flangeamento a amostra sofreu ruptura no cordão de solda, já na fase de pré-expansão e a imagem do local de ruptura pode ser observada na figura 9a. A amostra com 40% da potência do laser não conseguiu penetração total da solda, com isso a união das duas interfaces ficou comprometida, ao realizar o ensaio mecânico a parte que ficou com falta de fusão, agiu como concentrador de tensão fazendo com que a amostra rompesse ao ser solicitada nos ensaios.

Na amostra AM 50, vide figura 7b, pode-se observar que a penetração da solda foi quase completa, podendo ser evidenciados cantos vivos na raiz. Estas descontinuidades agiriam como concentradores de tensão ao realizar o ensaio de achatamento reverso, conforme figura 9d. Neste ensaio a raiz da solda é a parte mais solicitada, exercendo forças trativas na raiz e forças compressivas na face da solda e com a presença dos cantos vivos a amostra sofreu a ruptura e foi reprovada. No ensaio de flangeamento a amostra suportou o ensaio, vide figura 9c, por existir a etapa de pré-expansão, onde a amostra é forçada a expandir em um cone com 60° de inclinação e com o atrito do cone e a raiz da solda, ocorreu uma leve laminação desta região, eliminando os cantos vivos presentes na raiz, reduzindo o efeito do concentrador de tensão e propiciando a aprovação no ensaio.

Outras condições de soldagem, respectivamente, e amostras AM67, AM 90 e AM 100, vide figura 9e a 9j, apresentaram resultados similares nos ensaios mecânicos e todas foram aprovadas. As amostras apresentaram penetração total e formação de raiz sem cantos vivos, que poderiam prejudicar seu desempenho, portanto, estas amostras foram aprovadas, não apresentando nenhuma fissura ou trinca após ensaios mecânicos.

Na figura 10 são apresentadas imagens obtidas da interface ZF-ZAC obtidas por MEV. Foram localizados precipitados nitretos e carbo-nitretos no MB utilizando-se espectroscopia de energia dispersiva - EDS. Não foi observada a presença de carbonetos e nitretos na zona de fusão.

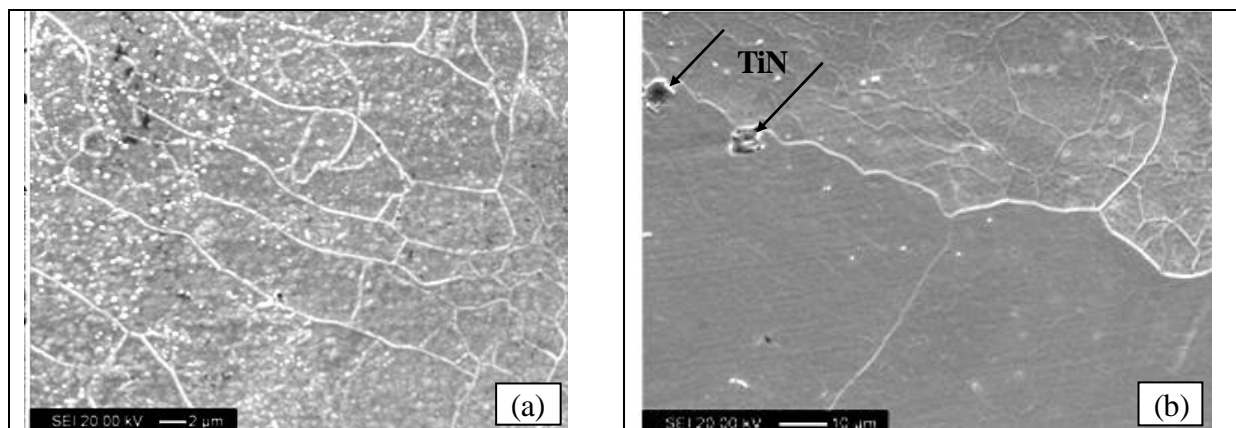


Figura 10: Imagens obtidas por MEV da zona de fusão (a) Imagem da interface ZF/ZAC e (b) Região próxima a ZF evidenciando presença de Nitreto de Titânio.

O local de análise para avaliar a suscetibilidade a corrosão intergranular com base na norma ASTM A 763 está indicado na figura 11a, estando localizado na interface entre a ZF e a ZAC. A escolha deste local de análise próxima da interface ZF e ZTA teve como objetivo verificar se a ZTA sofreu alguma alteração microestrutural. Nas figuras 11b até 11f estão apresentadas imagens obtidas por microscopia óptica das regiões submetidas ao ensaio de susceptibilidade à corrosão intergranular segundo ASTM A 763. Em razão da soldagem a laser possuir pequena ZTA e curto tempo de exposição do material ao feixe de laser não foi observada nenhuma alteração na região do contorno de grão.

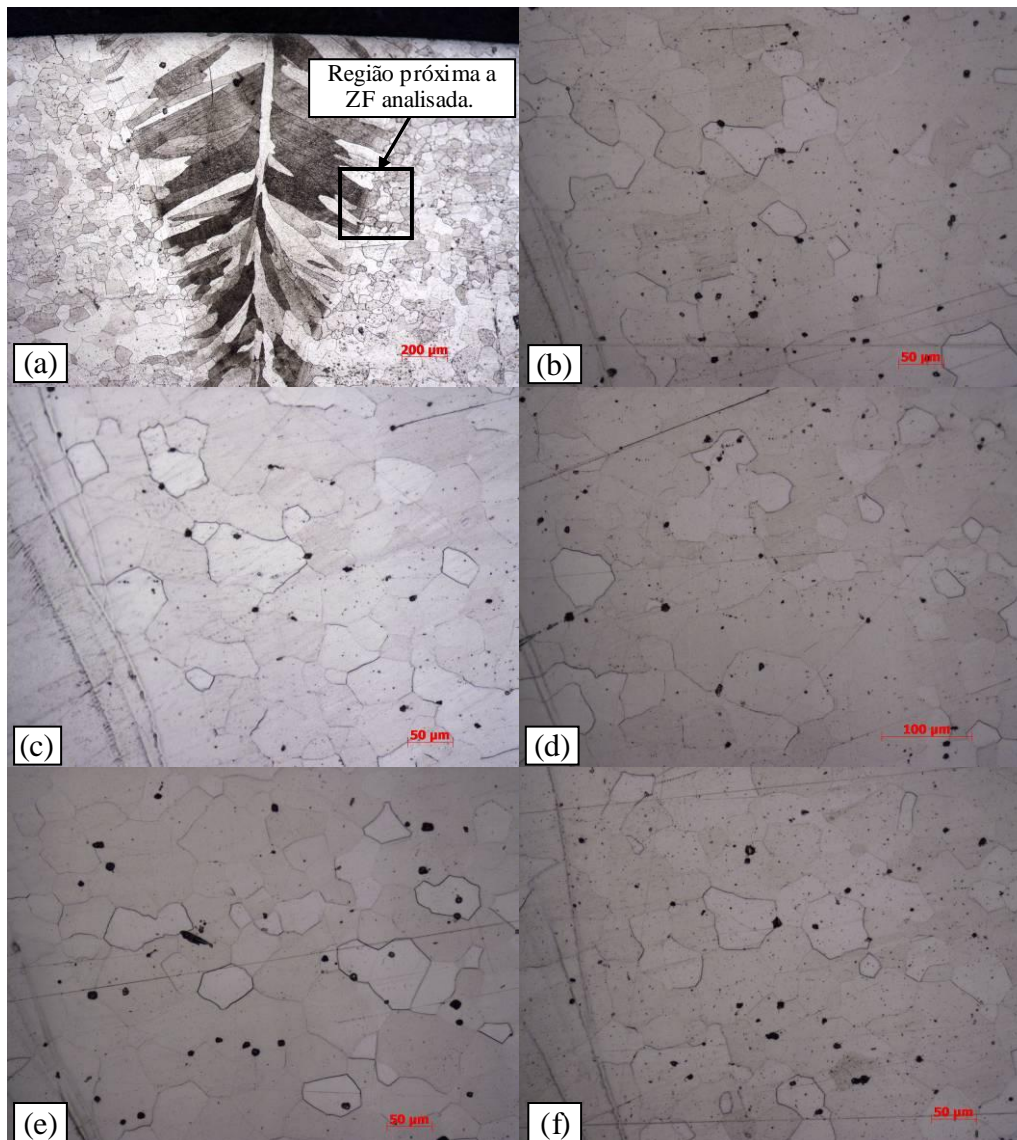


Figura 11: Imagem obtida por microscopia óptica das amostras ensaiadas. (a) AM 40, (b) AM 50, (c) AM 67, (d) AM 90, (e) AM 100 e (f) representação da região analisada.

Os resultados obtidos na figura 11 indicam que não existe a presença de corrosão por degrau ou vala nos contornos de grão. Segundo a norma ASTM A 763 a corrosão intergranular ocorre quando mais de um grão é completamente circundado. Lima L. I. L. [23] realizou deposições de cordões sobre uma chapa do aço AISI 439 empregando o processo de soldagem a arco GMAW robotizado, com diversos aportes térmicos. A amostra com maior aporte térmico apresentou ZAC com maior suscetibilidade a corrosão intergranular. A amostra com menos aporte térmico apresentou somente uma estrutura mista, porém aceitável de acordo com a norma ASTM A-763.

No caso deste estudo a utilização a soldagem laser propicia um aporte térmico menor que outros processos de soldagem, portanto era de se esperar uma microestrutura sem sensitização na ZAC. A utilização do processo laser contribuiu para que não ocorresse a presença de precipitados na ZF e sem prejudicar a resistência a corrosão através do fenômeno de sensitização.

#### 4. Conclusões

As condições usadas na soldagem a laser em tubos de aço inoxidável ferrítico AISI 439 propiciaram penetração total para potências acima de 67 % da potência do laser.

A microestrutura na zona de fusão é predominantemente ferrítica sem e possui um perfil simétrico com as duas frentes de solidificação se encontrando no centro da zona de fusão.

A zona de fusão é a região de maior dureza e não sendo possível por MEV e EDS observar precipitados nesta região, provavelmente por estarem solubilizados, o que poderia contribuir para o aumento de dureza ou ainda pelo aumento da tensão residual nesta região.

As condições de soldagem usadas neste estudo não foram observadas a sensitização do material.

Recomenda-se a utilização da potência do laser que gere valores de energia igual ou superior a 4276 W (67 % da potência do laser), para realização da costura em tubo do aço inoxidável ferrítico AISI 439 com espessura de 2,25 mm, por obter penetração total, aprovação nos ensaios de flangeamento e achatamento reverso e microestrutura favorável pela introdução de menos calor imposto.

## 5. Referências Bibliográficas

- [1] LAKSHMINARA YANAN A. K.; BALASUBRAMANIAN V.; Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of LBW AISI 409M Grade Ferritic Stainless Steel- Journal of Iron and Steel Research International, 2012, 19(1): 72-78
- [2] CARBÓ, Mario H.; Aplicações de aços inoxidáveis S 400 na indústria. Disponível em <[www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/Apres\\_arcerlor.pdf](http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/Apres_arcerlor.pdf)>. Acesso em 30/08/2013
- [3] Aço Inoxidável Ferrítico - ACE P439A <[www.arcelormittalinoxbrasil.com.br/port/arquivos/439Port\\_fin.pdf](http://www.arcelormittalinoxbrasil.com.br/port/arquivos/439Port_fin.pdf)>. Acesso em 30/08/2013
- [4] MODENESI, Paulo J. "Soldabilidade dos aços inoxidáveis." *São Paulo, Senai-SP*, 2001, p.21-48.
- [5] BOTTREL-COUTINHO, C. A. Materiais Metálicos para Engenharia. Fund. Christiano Ottoni, BH. 1992.
- [6] Van Warmelo M, Nolan D, Norrish J. Mitigation of Sensitisation Effects in Unstabilised 12% Cr Ferritic Stainless Steel Welds, *Material Science Engineering*, 2007, 464A: 157.
- [7] M. O. H. Amuda and S. Mridha; An Overview of Sensitization Dynamics in Ferritic Stainless Steel Welds Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Corrosion V. 2011, Article ID 305793, 9 pages doi:10.1155/2011/305793
- [8] ABRAHÃO B. N; OLIVEIRA, S. A. G; FERRARESI, V.; Estudo de Deformações Plásticas em Chapas 20º POSMEC-Simpósio do Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, disponível em <[http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/20/PDF/Sonia\\_POSMEC20RamesABRAHAOBASILIONETO.PDF](http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/20/PDF/Sonia_POSMEC20RamesABRAHAOBASILIONETO.PDF)>, Acesso em 02/09/2013
- [9] Tullmin M, Robinson F P A, Henning C A O, et al. Properties of Laser-Welded and Electron-Beam Welded Ferritic Stainless Steel [JJ. J S A Ir Inst Min Metal, 1989, 89: 243.
- [10] Kaul R, Ganesh P, Nath A K, et al. Comparison of Laser and Gas Tungsten Arc Weldments of Stabilized 17 wt% Cr Ferritic Stainless Steel [JJ. Materials and Manufacturing Processes, 2003, 18: 563.
- [11] FRITZ, JAMES D., Effects of Metallurgical variables on the corrosion of stainless steels. Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, vol. 13A, ASM Handbook, 9ª. Ed., USA, p. 266-274, 2003.
- [12] Penasa M, Rivela C. Application of the Laser Welding Process to Low Thickness Stainless Steels, *J. Welding International*, 2003, 17: 947.
- [13] Lee H. T., WU, L.; The Effects of Peak Temperature and Cooling Rate on the Susceptibility to Intergranular Corrosion of Alloy 690 by Laser Beam and Gas Tungsten Arc Welding, *Corrosion Science*, 2009, 51: p. 439.
- [14] Welding Metallurgy - Sindo Kou, 2º Ed., John Wiley & Sons, 2003
- [15] PASSOS, E. R. dos. Caracterização microestrutural de tubos soldados AISI 409 estabilizado ao titânio: estudo comparativo dos processos TIG e laser. Escola de Engenharia de Lorena. Lorena, 2009.
- [16] ASTM A268 / A268M - 10 Standard Specification for Seamless and Welded Ferritic and Martensitic Stainless Steel Tubing for General Service, 2010.
- [17] SERNA-GIRALDO, C. A. Resistência à Corrosão Intergranular UNS S43000: Avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e mecanismo de sensitização. Tese MSEPUSP, 2006.
- [18] ASTM A763 – Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Ferritic Stainless Steel - American Standards For Testing Materials, 1999.
- [19] NELSON, T.W.; LIPPOLD, J.C. E MILLS, M.J.; Nature and Evolution of the Fusion Boundary in Ferritic-Austenitic Dissimilar Weld Metals, Part 1 – Welding Research Supplement, 1999, 329-s a 337
- [20] NEVES, M. D. M.; Lotto, A.; BERRETTA, J. R.; Wagner de ROSSI, de W.; Nilson Dias VIEIRA JUNIOR, N. D.; Solidificação da Zona de Fusão na soldagem do AISI 304 com Inconel 600 por laser de Nd:YAG, *Soldagem & Inspeção*, 2009, vol.14, no.2, p.104.
- [21] WANG, N.; MOKADEM, S; RAPPAZ, M.; KURZ, W.;- Solidification cracking of superalloy single and bi-crystals, *Acta Materials* 52, 2004, pp.3173-3182.
- [22] Zhang, L.; Lu, J. Z.; Luo, K. Y.; Feng, A. X.; Dai, F. F. Z.; Zhong, J. S.; Luo, M.; Zhang, Y. K.; Residual stress, micro-hardness and tensile properties of ANSI 304 stainless steel thick sheet by fiber laser welding, *Materials Science & Engineering A* 561, 2013, p. 136–144
- [23] LIMA, L. I. L., Metodologia para avaliação da corrosão da zona termicamente afetada de aço inoxidável ferrítico AISI 439 soldado. Tese de mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.