

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

RAQUEL RODRIGUES DE OLIVEIRA BASTOS

**SOLDAGEM DISSIMILAR AUTÓGENA COM LASER PULSADO
Nd:YAG DOS AÇOS AUSTENÍTICO AISI 316L E FERRÍTICO AISI 430**

Ilha Solteira
2022

RAQUEL RODRIGUES DE OLIVEIRA BASTOS

**SOLDAGEM DISSIMILAR AUTÓGENA COM LASER PULSADO
Nd:YAG DOS AÇOS AUSTENÍTICO AISI 316L E FERRÍTICO AISI 430.**

Trabalho de graduação
apresentado à Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira – UNESP,
como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Engenharia
Mecânica.

Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella
Orientador

Ilha Solteira
2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B327s Bastos, Raquel Rodrigues de Oliveira.
Soldagem dissimilar autógena com laser pulsado Nd:YAG dos aços austenítico AISI 316l e ferrítico AISI 430 / Raquel Rodrigues de Oliveira Bastos. - Ilha Solteira: [s.n.], 2022
55 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Grasuação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Vicente Afonso Ventrella
Inclui bibliografia

1. Soldagem laser. 2. Nd:YAG. 3. Aço austenítico. 4. AISI 430. 6. AISI 316L.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “Júlio de Mesquita Filho”1 .
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ATA DA DEFESA TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: SOLDAGEM DISSIMILAR AUTÓGENA COM LASER PULSADO
Nd:YAG DOS AÇOS AUSTENÍTICO AISI 316L E FERRÍTICO AISI
430

ALUNO: RAQUEL RODRIGUES DE OLIVEIRA BASTOS

ORIENTADOR: Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão
Examinadora

Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella
Presidente (Orientador)



MSc. Bruna Berbel Seloto



Dr. Gillian da Silva Crespo

Ilha Solteira, 16 de dezembro de 2022

DEDICATÓRIA

A minha querida mãe, familiares e amigos que compartilharam choro e risadas ao longo desses anos, e ao café que sempre me manteve firme nos momentos de preguiça.

AGRADECIMENTOS

A energia divina que rege esse universo por me permitir existir e seguir meu caminho com muito amor e paz no coração.

Agradeço a minha querida mãe, que além de me presentear com a vida até hoje está presente nos pequenos momentos de felicidade.

Agradeço ao meu querido professor e orientador Prof. Dr Vicente Afonso Ventrella por estar disposto e sempre me ajudar quando precisei, pelos ensinamentos, dedicação e paciência.

Agradeço a todos meus professores, que ao longo de toda minha formação me incentivaram e me ajudaram a chegar até aqui. Em especial ao professor Ricardo do Anglo de Presidente Prudente, aos professores Sinésio, Wilson e Orlando do SENAI – “Santo Paschoal Crepaldi” e aos professores Leandro, Pantaleão, Woiski, Bazani.

Agradeço a minha família, pelos almoços e momentos de risada que alegraram toda essa jornada.

Agradeço as minhas amigadas de infância Yara, Camila, Isabela, Rafael e principalmente Laura que ao longo de 25 anos se tornou uma irmã.

Agradeço aos amigos da escola, Fernanda, Natália e Carolina por tanto carinho, conexão e bons momentos e também aos “Os de sempre”, que proporcionaram tantas boas reuniões e lembranças, em especial Ana Carolina, por tantas conversas e ensinamentos. Aos meus amigos do “rolês alternativos”, pelos encontros e risadas, em especial minha amiga Vanessa que, para mim, sempre foi uma inspiração na engenharia e também como exemplo de pessoa.

Agradeço aos meus amigos da querida Ilha Solteira, que ao longo desses anos de graduação compartilhamos nossas dores e vitórias, e mesmo com o isolamento social da pandemia nossa amizade apenas se fortificou, minhas amigas maravilhosas Sarah e Maria Júlia, meus amigos Murilo, Walter, Alan, André, Hugo, Alexandre, Otávio, Lucas. Aos colegas de Laboratório Bruna, Jonathan e Carla.

Agradeço aos meus amigos cozinheiros Hernani, Yhanick, Guilherme, Vanessa e Rafael que me apoiaram no meu empreendimento gastronômico que foi essencial para manter minha saúde mental e concluir minha graduação.

Ao meu querido amor, Guilherme, meu parceiro de vida.

Enfim a mim, por tanta resiliência mesmo com tantos obstáculos no caminho, por seguir firme e estar conquistando o que sonho há 13 anos.

“Whether you think you can, or
you think you can’t – you’re right”

Henry Ford

RESUMO

Há muito tempo vem se aperfeiçoando materiais e métodos, principalmente dentro da indústria mecânica. O estudo de materiais vem se aprimorando pois muitas vezes é o fator limitante para a realização de projetos. Desde 1912 vem se estudando o uso de aços inoxidáveis, pois apresentam resistência à corrosão em ambientes mais severos.

Além do foco em materiais, os processos de fabricação também vêm sendo desenvolvidos, e a soldagem a laser apresenta muitas vantagens em relação à solda convencional, por apresentar menor espessura de cordão de solda, pequena zona afetada termicamente, agride menos o material apresentando poucas distorções, é um processo muito rápido comparado aos processos de solda tradicionais, a região soldada tem sua dureza mecânica aumentada e com maior resistência a tensão.

O presente trabalho teve como objetivo analisar uma chapa com 1,5 mm de espessura com laser Nd:YAG pulsado, na condição autógena, entre os aços austenítico AISI 316L e Ferrítico AISI 430. As soldagens foram realizadas em juntas de topo e sem abertura de raiz. A energia do pulso foi fixada em 10J, com potência de pico de 2kw e largura temporal de 5ms. A frequência variou de 1,8 Hz a 9 Hz. Soldou-se amostras somente composta, por aço inox austenítico AISI 316L, depois somente aço ferrítico AISI 430 e por último três amostras contendo ambos aços se variando a taxa de sobreposição do cordão de solda entre 50%, 70% e 90%. Foram realizadas análises macrográficas e micrográficas da junta soldada através de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. Foram realizados ensaios mecânico de dureza Vickers para comparar a dureza ao longo dos metais base e da junta soldada. Os resultados mostraram que a soldagem dissimilar entre os aços austenítico AISI 316L e Ferrítico AISI 430 gera microestrutura duplex no cordão de solda. A junta soldada apresenta balanço microestrutural apresentou em média 48% de austenita e 52% ferrita, indicando uma correção do balanço entre 50% de ferrita e austenita. Houve um aumento da dureza da zoa soldada em relação a dureza isolada dos metais base.

Palavras-chave: Soldagem laser. Nd:YAG. Aço austenítico. Aço ferrítico. AISI 430. AISI 316L.

ABSTRACT

Materials and methods have been improved for a long time, especially within the mechanical industry. The study of materials has been improving because it is often the limiting factor for the realization of projects. Since 1912 the use of stainless steels has been studied, because they present resistance to corrosion in more severe environments.

Besides the focus in materials, the manufacturing processes have also been developed, and the laser welding presents many advantages in relation to the conventional welding, because it presents smaller thickness of the weld seam, small heat affected zone, it harms less the material presenting few distortions, it is a very fast process compared to the traditional welding processes, the welded region has its mechanical hardness increased and with higher resistance to tension.

The present work had as objective to analyze a plate with 1,5 mm of thickness with laser Nd:YAG pulsed, in the autogenous condition, between austenitic AISI 316L and ferritic AISI 430. The welds were performed in butt joints and without root gap. The pulse energy was set at 10J, with a peak power of 2kw and a temporal width of 5ms. The frequency ranged from 1.8 Hz to 9 Hz. Samples were welded consisting only of austenitic stainless steel AISI 316L, then only ferritic steel AISI 430, and finally three samples containing both steels, varying the overlap rate of the weld bead between 50%, 70% and 90%. Macrographic and micrographic analyses of the welded joint were performed using light microscopy and scanning electron microscopy. Mechanical Vickers hardness tests were performed to compare the hardness along the base metals and the welded joint. The results showed that dissimilar welding between austenitic AISI 316L and ferritic AISI 430 steels generates duplex microstructure in the weld bead. The welded joint microstructural balance showed an average of 48% austenite and 52% ferrite, indicating a balance correction between 50% ferrite and austenite. There was an increase in the hardness of the welded zone relative to the hardness of the base metals alone.

Keywords: Laser welding. Nd:YAG. Austenitic steel. Ferritic steel. AISI 430. AISI 316L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de equilíbrio Ferro Carbono	17
Figura 2. Esquema de funcionamento dos elementos do Laser	22
Figura 3. Formação do cordão de solda na soldagem à Laser.....	23
Figura 4. Aparelhagem para soldagem a Laser.....	25
Figura 5. Esquema da montagem da junta soldada entre aços inoxidáveis AISI 316 L e AISI 430.....	27
Figura 6. Microscópio Zeiss, modelo Discovery V8.	29
Figura 7. Microscópio Eletrônico de Varredura, Zeiss, modelo EVO LS15.	29
Figura 8. Microdurômetro Buehler MicroMet 5114.....	30
Figura 9. Micrografia eletrônica da junta soldada do aço inoxidável AISI 316L com AISI 316L.....	31
Figura 10. Micrografia ótica da junta soldada do aço inoxidável AISI 430 com AISI 430.	31
Figura 11. Macroscopia ótica da sobreposição do cordão de solda 50%.	32
Figura 12. Microestrutura do cordão de solda entre os aços AISI 316L e AISI 430. Taxa de sobreposição 50%.....	32
Figura 13. Macroscopia ótica da sobreposição do cordão de solda 70%.	33
Figura 14. Microestrutura do cordão de solda entre os aços AISI 316L e AISI 430. Taxa de sobreposição 70%.....	33
Figura 15. Macroscopia ótica da sobreposição do cordão de solda 90%.	34
Figura 16. Microestrutura do cordão de solda entre os aços AISI 316L e AISI 430. Taxa de sobreposição 90%.....	34
Figura 17. Esquema utilizado para medição da microdureza vickers. ...	35
Figura 18. Comparação do perfil de microdureza ao longo da junta soldada.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características da Fonte Laser Nd:YAG pulsada, modelo UW 150A, United Winners.	26
Tabela 2. Composição dos materiais em peso por cento.	27
Tabela 3. Condições de soldagem do AISI 316L:.....	27
Tabela 4. Condições de soldagem do AISI 430:.....	27
Tabela 5. Parâmetros de soldagem laser Nd:YAG pulsada.....	28
Tabela 6. Balanço microestrutural no metal de solda.	35
Tabela 7. Dados de microdureza obtidos ao longo da junta.	36

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO E JUSTIFICATIVA	15
3. REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1 DEFINIÇÕES E CONCEITOS	16
3.1.1 Aço inoxidável	16
3.1.2 Composição	16
3.1.3 Ferrita	18
3.1.4 Austenita	18
3.1.5 Martensita.....	18
3.2 CLASSES DE AÇOS INOXIDÁVEIS	19
3.2.1 Aços inoxidáveis austeníticos.....	19
3.2.2 Aço inoxidável austenítico AISI 316L	19
3.2.3 Aço inoxidável ferrítico	20
3.2.4 Aço inoxidável ferrítico AISI 430.....	20
3.2.5 Aço inoxidável martensítico.....	20
3.3 LASER	21
3.3.1 Soldagem a laser	23
3.3.2 Laser Nd:YAG	24
4 MATERIAIS E MÉTODOS	25
5 RESULTADOS E DISCUSSOES	31
5.1 MACROGRAFIA E MICROGRAFIA	31
5.2 ENSAIO DE DUREZA.....	35
6 CONCLUSÃO	38
REFERENCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

Há muito tempo vem se aperfeiçoando materiais e métodos, principalmente dentro da indústria mecânica. A crescente evolução na indústria de aplicação de materiais necessita por uma busca do aperfeiçoamento dos métodos e materiais utilizados. São necessários materiais que combinados apresentem redução de custos de produção e operação e aperfeiçoamento de propriedades mecânicas nas juntas soldadas.

O estudo de materiais vem se aprimorando pois muitas vezes é o fator limitante para a realização de projetos. Desde 1912 vem se estudando o uso de aços inoxidáveis, pois apresentam resistência à corrosão em ambientes mais severos.

Além do foco em materiais, os processos de fabricação também vêm sendo desenvolvidos, e a soldagem a laser apresenta muitas vantagens em relação à solda convencional, por apresentar menor espessura de cordão de solda, pequena zona afetada termicamente, agride menos o material apresentando poucas distorções, é um processo muito rápido comparado aos processos de solda tradicionais, a região soldada tem sua dureza mecânica aumentada e com maior resistência a tensão, o que preserva mais o metal-base.

A aplicação do laser é muito abrangente, incluindo mercados como a indústria de processamento de materiais, aeroespacial, médica e atualmente é muito utilizada na soldagem de carrocerias de automóveis. Como é um método fácil de automatização, sem desgaste de ferramenta, com excelente qualidade final, sem contato, com alta velocidade de execução, vem se tornando muito competitivo em relação aos processos convencionais de manufatura.

Como o processo de solda a laser possui foco na excelência de qualidade, é necessário que uma combinação precisa de parâmetros seja seguida. Os parâmetros que ditam as soldas a laser são velocidade do processo, polarização da luz, comprimento focal da lente utilizada, energia e duração temporal do pulso a laser, pressão e fluxo do gás de assistência, densidade de potência, modo transversal do feixe laser e comprimento de onda.

O estudo da combinação entre os aços austenítico AISI 316L e Ferrítico AISI 430 é necessário pois uma microestrutura duplex no cordão de solda é formada

pelas fases ferrita e austenita, pois não somente os materiais estudados estão suprimindo as necessidades requeridas como também a sua combinação.

2. OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

O objetivo desse trabalho foi estudar a soldagem dissimular autógena realizada com Laser Nd:YAG dos aços austenítico AISI 316L e Ferrítico AISI 430.

Objetivos específicos:

- Interpretar os resultados obtidos pela caracterização de forma visual qualitativa, através de microscópio ótico e microscópio eletrônico de varredura;
- Analisar diferenças entre juntas soldadas formadas entre os aços isolados em relação a juntas formadas pelos dois aços combinados;
- Para juntas formadas pelos dois aços analisar a consequência na alteração da taxa de sobreposição do metal de solda e comparar o resultado obtido qualitativamente com uma análise quantitativa assistida pelo software ImageJ;
- Analisar o perfil de microdureza ao longo das juntas formadas pelos dois materiais e qual a influência da taxa de sobreposição nos respectivos resultados;
- Avaliar como as propriedades resultantes encontradas dessa combinação são vantajosas nas atuais aplicações de juntas formadas por aços austenítico AISI 316L e Ferrítico AISI 430

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 DEFINIÇÕES E CONCEITOS

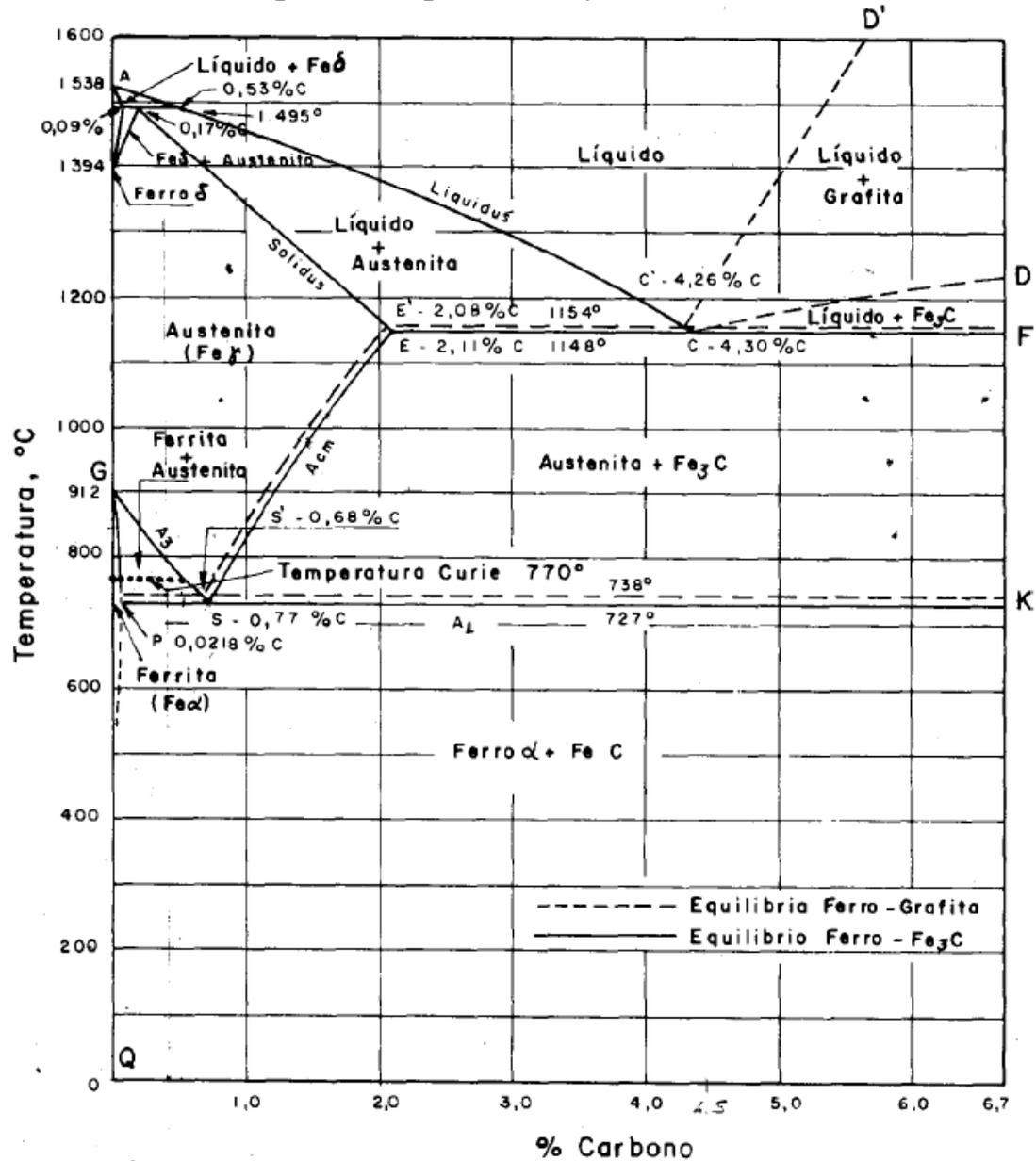
3.1.1 AÇO INOXIDÁVEL

Essencialmente o que caracteriza um aço como inoxidável é sua porcentagem de adição de metais de liga que concede a característica de resistência a oxidação. Foram inventados após estudos realizados na Inglaterra e Alemanha em 1912. Composto principalmente por Fe, também tem em sua composição o C e Cr com no mínimo 10,5%. Outros elementos metálicos também fazem parte dessa liga, com o Cr sendo considerado o mais importante, atuando na garantia de elevada resistência à corrosão. (CARBÓ, H. M, 2008)

3.1.2 COMPOSIÇÃO

Para melhor entendermos a composição que determina a diferença entre Ferros e aços é preciso analisar o Diagrama presente na Figura 1:

Figura 1. Diagrama de equilíbrio Ferro Carbono.



Fonte: CHIAVERINI, V. 2005.

Este diagrama nos permite entender a composição microestruturas dos aços inoxidáveis. As fases de equilíbrio definem os três principais microconstituintes do aço inox, sendo estes a ferrita, a austenita e a martensita. Com 6,7% de carbono o Fe_3C , chamado cementsita. A área que define os aços é a com teor de carbono até 2,11%, passando desse valor temos o Ferro fundido. Para carbono com teor entre 0 e 0,008% temos F puro (CHIAVERINI, 1988)

O diagrama também indica as três principais fases do F: alfa, gama e Fe₃C. A ferrita, também chamada de fase alfa, é a forma alotrópica do F puro. A fase gama, em temperatura mais elevada, é capaz de manter uma quantidade significativa de C em comparação a fase alfa. A cementita, Fe₃C, possui maior teor de carbono, e é um material que apresenta elevada dureza. (KALPAKJIAN; SCHIMID, 2009)

3.1.3 FERRITA

Trata-se do F no estado alfa, formada por difusão e na forma estruturada cúbica de corpo centrada (CCC), possuindo baixa resistência a tração, baixa dureza, mas com resistência ao choque.

Durante sua formação, a ferrita nucleia-se principalmente na região de contorno de grão da austenita, tendo a possibilidade de nuclear no interior do grão para maior taxa de resfriamento, quando ocorre que pode gerar a chamada ferrita intergranular.

Por conter pequenos traços de C, como C é considerado um formador de austenita, que não apresenta propriedades magnéticas, então sua estrutura CCC é responsável pelas suas propriedades magnéticas (CHIAVERINI, 1988).

3.1.4 AUSTENITA

Esta fase é estável apenas em altas temperaturas. Fase gama, é formada pela solução de C no Fe gama, e apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC).

Possuindo maior densidade do que a ferrita, a austenita apresenta maior ductilidade, maior resistência mecânica e maior tenacidade. (KALPAKJIAN; SCHIMID, 2009).

3.1.5 MARTENSITA

Quando ocorre o resfriamento rápido dos aços com a velocidade de resfriamento atingindo um ponto crítico, temos como resultado a formação da estrutura denominada martensita, que possui dureza e resistência mecânica maior que as outras fases, sendo, porém, mais frágil (KALPAKJIAN; SCHIMID, 2009)

A martensita é caracterizada por uma estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC) possuindo menor tamanho de grão, dureza elevada, menores distorções nos seus planos cristalino, menores tensões internas formadas por sua expansão. Em contrapartida, a martensita é consideravelmente frágil.

3.2 CLASSES DE AÇOS INOXIDÁVEIS

Podem ser divididos em dois grupos distintos:

- Aços ao Cr-Ni.
- Aços ao Cr-Mn-Ni.

O Cr é o principal responsável pela dada corrosão por ser um elemento menos nobre que o F nas séries eletroquímicas (MOREIRA, 2008). A adição do Ni melhora a resistência à corrosão e oxidação em altas temperaturas, ao formar uma camada de óxido que protege o aço (CHIAVERINI, 2008).

3.2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Possui excelente resistência a corrosão, alta tenacidade e boa soldabilidade. São aços não-magnéticos, não endurecíveis por tratamento térmico, apresentam dureza superior que outros aços quando encruados (SILVA, MEI, 2006). Conforme o teor de Ni aumenta, o encruamento é menos pronunciado, levando em conta que esse elemento é estabilizante, resultando em elevado nível de resistência dado o encruamento (CHIAVERINI, 2005).

Utilizados na indústria petroquímica, pois resistem a corrosão gerada pela combustão de gases, vapor e processos químicos. Apesar de existirem vários tipos, é mais comum que as ligas possuam 18% de Ni e 18% de Cr.

3.2.2 AÇO INOXIDÁVEL AUSTENITICO AISI 316L

Dentre os aços austeníticos é o mais popular. Podemos encontrar utilização em indústrias farmacêuticas, fins hospitalares, utensílios de cozinha assim como nas indústrias química e petroquímica.

O aço AISI 316L se assemelha ao 316, porém com menor teor de carbono acarretando conseqüentemente, em uma maior resistência a corrosão intercrystalina. Sua aplicação se encontra em tanques, evaporadores, agitadores,

peças em atmosfera marítima, bombas, partes de válvulas, bandejas, e revestimento de fornos de calcificação.

3.2.3 AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO

Basicamente são ligas com 10,5% a 30% de Cr e menos de 0,1% de carbono. A microestrutura até sua fusão é ferrítica. Possui características magnéticas por possuir estrutura cúbica de corpo centrado – CCC (ASM Handbook, 1990).

São mais baratos pois não contém alto teor de Ni, o que também garante maior resistência a fissuração (YAN, 2009). Possuem maior porcentagem de Cr em relação aos martensíticos, melhorando sua resistência à corrosão, porém diminuindo sua resistência ao impacto (CARBÓ, H. M, 2008).

3.2.4 AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 430

É o mais popular dos aços ferríticos, contendo Cr superior a 16% e apresentando excelente resistência à corrosão. Possui boa capacidade de estampagem, desde que não sejam muito profundas (CARBÓ, H. M, 2008).

As soldas nesse tipo de aço tendem a ser frágeis e apresentar menor resistência à corrosão, devido à formação parcial de martensita, apesar do baixo teor de carbono, ocorrendo a precipitação de carbonitretos de Cr e crescimento excessivo do tamanho de grão nas regiões soldadas (CARBÓ, H. M, 2008).

3.2.5 AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO

Os aços inoxidáveis martensíticos são compostos por uma liga de Fe e Cr (de 11% a 18%) com maior quantidade de carbono em relação aos outros tipos de aços inoxidáveis, cerca de 0,1% a 0,5% (NERI, 2001).

Apresenta maior resistência mecânica e capacidade de endurecimento, se comparado a aços inoxidáveis com menor teor de carbono. Possui estrutura tetragonal de corpo centrado - TCC. (OUTOKUMPU, 2013). Por conter essas características que facilitam seu endurecimento, as temperaturas de solda devem ser limitadas pela sua facilidade de sofrer o processo de têmpera. (STREICHER, 1977)

São usados para construção de turbinas, compressores, instrumentos de medida e componentes da indústria petroquímica. (MODENESI, 2001).

3.3 LASER

A palavra Laser na verdade é uma sigla das palavras em inglês: “Light amplification by simulated emission of radiation” e pode ser traduzida livremente como “amplificação de luz por emissão estimulada de radiação”. Basicamente é uma luz intensa que é gerada por um dispositivo que tem a capacidade de estimular um grande número de elétrons em repouso, gerando fótons de luz de forma repetitiva, o que garante a sua intensidade. Ao incidir essa energia sobre o material que se deseja soldar ocorre um aquecimento concentrado na faixa de 1,5mm de largura sobre o material (DAMOULIS E BATALHA, 2014).

Historicamente, tem-se registro de que os primeiros trabalhos de pesquisa que levaram à invenção de feixe de laser devem-se à Albert Einstein em 1917. O primeiro laser só foi construído por Maimann em 1960, utilizando um sólido de rubi excitado por uma lâmpada fluorescente de vapor de mercúrio e filamento helicoidal. Há registros de que em pouco tempo depois os Laboratórios AT&T Bell produziram um laser gasoso de He-Ne. Alguns anos depois surgiu o laser de CO₂.

A partir desta breve definição, podemos passar a entender que basicamente o laser é composto por três elementos:

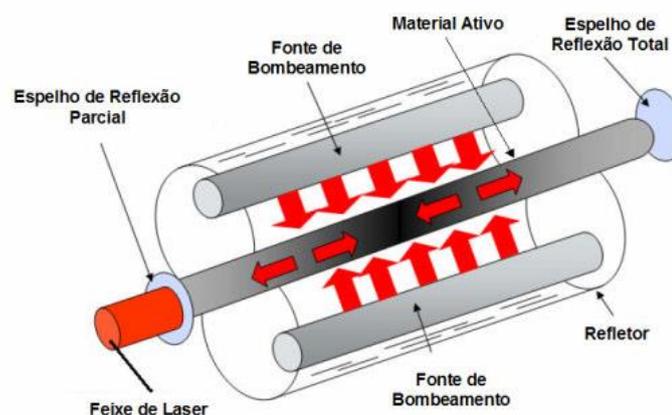
- Elemento 1: Fonte de bombeamento. Esta fonte emite a energia que será amplificada e a emissão pode ser de forma pulsada ou contínua. Temos como exemplo de forma pulsada um flash de luz ou uma descarga elétrica única. Como exemplo de forma contínua temos um arco de xenônio que envolve um material ativo.
- Elemento 2: Material ativo. O material ativo é responsável pelo aumento na amplitude da energia emitida pela fonte, e este material pode estar na forma sólida, líquida ou gasosa. Temos como exemplos de sólidos um cilindro usinado de cristal de rubi, vidro de neodímio e YAG, sigla em inglês que significa Yttrium Aluminium Garnet e tem sua fórmula química $Y_3Al_5O_{12}$ dopado com neodímio.

Já os materiais líquidos ou gasosos precisam de um recipiente para contê-los, com duas paredes opostas transparentes e planas. Os materiais líquidos são mais utilizados em laboratório e os gasosos são bastante utilizados na indústria como o He-Ne, anídrico carbônico, argônio ionizado, CO₂, etc. (KAVAMURA, 2007)

- Elemento 3: Cavity Ressonante. Estruturalmente é composta por dois espelhos paralelos, sendo o primeiro com 100% de refletividade e o segundo com refletividade parcial, o que permite que parte da radiação que está circulando no ressonador seja transmitida por um estreito feixe de luz perpendicularmente direcionado às superfícies do espelho. Esta construção permite que a principal função seja realimentar de forma seletiva, armazenando luz que circula entre os espelhos e permite que parte do sinal óptico emitido pelo meio ativo retorne para ser amplificado, influenciando também as propriedades espectrais e potência da radiação emitida (KAVAMURA, 2007)

Sua construção deve ser realizada de forma muito cuidadosa pois não pode haver contaminação em seu sistema e suas lentes devem ser precisas para aumentar a eficiência da aplicação desejada (MODENESI, 2011).

Figura 2. Esquema de funcionamento dos elementos do Laser



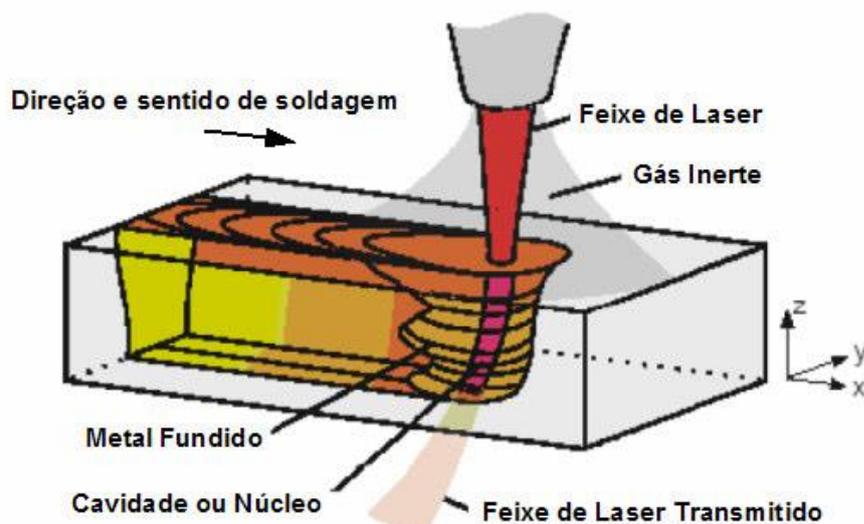
Fonte: Damoulis & Batalha (2004)

As aplicações do Laser atualmente são diversas, desde leitores de CD, até utilização médica nas áreas de oftalmologia, dermatologia e odontologia. Na área mecânica é comum seu uso em instrumentação e equipamentos de medição, para alinhar máquinas e obter medidas de superfícies. Na área de fabricação é utilizado para processos como corte, soldagem e tratamento superficial (MODENESI. 2011).

3.3.1 SOLDAGEM A LASER

A energia concentrada presente no feixe de luz funde e vaporiza o metal ao tocar na superfície (KAVAMURA, 2007). A pressão resultante perfura a superfície e forma um núcleo cheio de vapor superaquecido no interior e material fundido a sua volta (LOREDO & MARTIN & ANDRZEJEWSKI & GREVEY, 2002). O aquecimento e resfriamento são parâmetros que caracterizam a solda à Laser e então um volume de poça líquida é formada e permanece estável até se solidificar sendo o objetivo criar uma poça de fusão, criada pela absorção da radiação a laser incidente e controlar os parâmetros de solda para que aumente até o tamanho desejado e então essa poça é propagada através da interface sólida o que elimina a linha da junta original entre as peças dos materiais a serem unidos (DULEY, 1998).

Figura 3. Formação do cordão de solda na soldagem à Laser.



Fonte: Damoulis & Batalha (2004)

As variações de temperatura em áreas pequenas e concentradas provocam a formação de um cordão de solda estreito e delgado com uma

pequena Zona Termicamente Afetada – ZTA. Este processo é muito rápido e associado a elevada velocidade de resfriamento culminam para que a região soldada seja dura, resistente à tensão se comparadas aos metais base antes da soldagem (KAVAMURA, 2007)

O laser então permite que propriedades sejam obtidas, as quais não seriam possíveis em outros métodos de soldagem, como alta velocidade de soldagem, a fonte de calor não tocar o material que está sendo soldado, poucas distorções e pequena ZTA. (SENAI, 1994).

Para proteger a qualidade do cordão de solda, recomenda-se a utilização de um gás inerte para proteção da zona de fusão sendo comum a utilização de gases Hélio, Argônio ou Nitrogênio. Existem duas técnicas para operação com fontes de alta intensidade: fusão convencional ou de penetração. (MONDENESI, 2011).

3.3.2 LASER Nd:YAG

O meio ativo do laser Neodymium – Yttrium Aluminum Garnet – Nd:YAG – é um cristal artificial de neodímio dopado com ítrio e alumínio (WAINER, BRANDI & MELO, 1992). Este cristal é transparente, considerado o mais comum nas aplicações industriais. A radiação alcançada tem 1,06 micrometros de comprimento de onda, transmitida facilmente por fibras óticas flexíveis de quartzo. O meio ativo pode ser excitado por luz de Xe ou de Kr.

É possível atingir uma melhor flexibilização dos movimentos em sua aplicação, pelo uso de fibras óticas, e também apresenta menor custo dando vantagem na solda de chapas finas em relação ao laser de CO₂ (HOFFMAN & GREIGER, 1995).

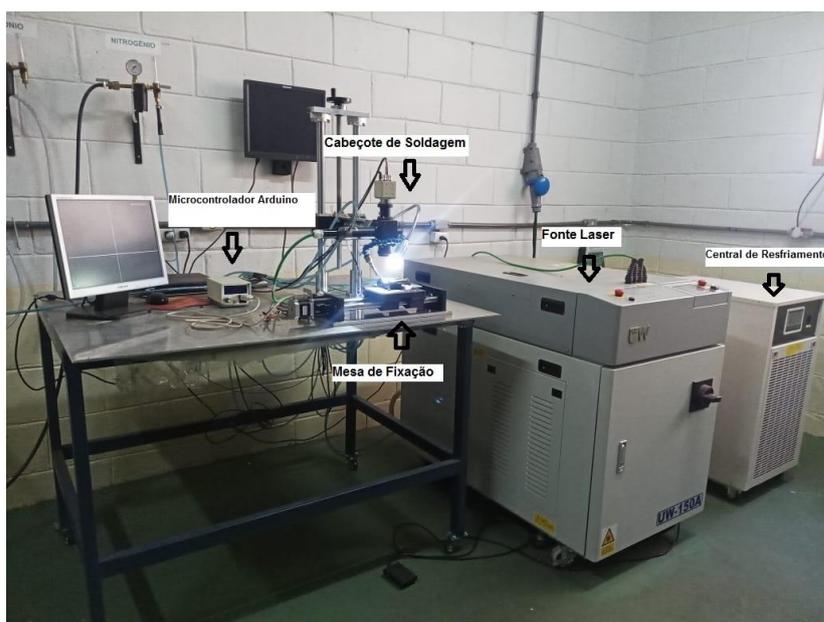
As indústrias automobilísticas utilizam muito o laser Nd:YAG em alta escala para soldagem de peças das carrocerias. Já o laser de CO₂, ainda domina em processos que exigem maior profundidade de solda (HOFFMAN & GREIGER, 1995).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As soldagens a laser foram realizadas com a utilização um sistema laser Nd:Yag, modelo UW 150A, da United Winners, na condição pulsado, cujas especificações técnicas estão contidas na Tabela 1. A Figura 4 mostra o sistema, composto por uma fonte, do laser, uma central de resfriamento, o cabeçote do gás de proteção e a mesa de fixação das chapas com velocidade controlada por microcontrolador programado em Arduíno. O aparato ainda conta com a presença de uma câmera para monitorar o processo em tempo real.

O processo foi executado com a utilização de uma atmosfera protetora de gás Argônio com vazão de 15l/min. A profundidade de penetração foi definida por meio de dados provenientes de experimentos já realizados anteriormente em estudos prévios.

Figura 4. Aparelhagem para soldagem a Laser.



Fonte: LEITE, G. S. C.

Tabela 1. Características da Fonte Laser Nd:YAG pulsada, modelo UW 150A, United Winners.

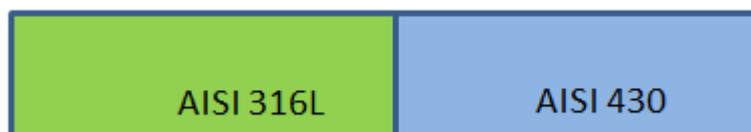
MODELO	UW 150A
Laser	Estado sólido
Tipo	Nd:YAG
Comprimento de onda	1064 nm
Potência máxima do laser	150W
Potência de pico	7 kW
Energia máxima do pulso	80 J
Largura do pulso	0,5 a 30 ms
Frequência	1 a 300 Hz
Sistema de posicionamento	Diodo e câmera CCD

Fonte: United Winners.

Para avaliar a influência do aporte térmico na soldagem dissimilar as chapas de aço foram posicionadas em junta de topo, sem abertura de raiz. Foram realizados pré-testes para estabelecer os parâmetros. Elas foram soldadas com feixe de diâmetro de 0,2 mm e ângulo de 90°, a energia do pulso (E_p) foi mantida fixa em 10J, potência de pico de 2 kW, largura temporal (t_p) de 5 ms, velocidade de soldagem (v) 1,0 mm/s e frequência variável.

Todas as amostras foram feitas em chapas com dimensões originais de 1,5 x 20 x 50 mm (A x L x C) e após a união obteve-se as dimensões 1,5 x 20 x 100 mm (A x L x C). Inicialmente foi feita soldagem da junta do aço inoxidável AISI 316L com AISI 316L e em sequência para comparativo foi feita a soldagem da junta do aço inoxidável AISI 430 com AISI 430, ambas contando com apenas uma amostra. Por fim realizou-se a soldagem da junta dissimilar entre os aços inoxidáveis austenítico AISI 316L com o aço inoxidável ferrítico AISI 430 como mostrado na Figura 5. Para a soldagem dissimilar foram confeccionadas três amostras, cada uma com uma condição de sobreposição de cordão de solda: 50%, 70% e 90%, e para cada amostra foi feita uma macrografia e uma micrografia do cordão de solda.

Figura 5. Esquema da montagem da junta soldada entre aços inoxidáveis AISI 316 L e AISI 430



Fonte: Próprio autor.

A composição química dos materiais utilizados é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição dos materiais em peso por cento.

Metal Base	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	N
AISI 430	0.12	1.00	1.00	17.00	0.75	-	-	0.04	-
AISI 316L	0.030	0.75	0.80	17.28	13.00	2.30	0.003	0.045	-

Fonte: Empresa Realum

A soldagem foi realizada de maneira autógena e dos dois lados com o intuito de obter-se maior penetração do processo.

As condições de soldagem para as juntas dos aços isolados são descritas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Condições de soldagem do aço AISI 316L.

Amostra	Velocidade da mesa (mm/s)	Taxa de Sobreposição (%)	Frequência (Hz)	Potência de Pico (kW)	Largura Temporal (ms)	Energia de Pulso em J
316L/316L	1	90	9,0	2,0	5,0	10,0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4. Condições de soldagem do aço AISI 430:

Amostra	Velocidade da mesa (mm/s)	Taxa de Sobreposição (%)	Frequência (Hz)	Potência de Pico (kW)	Largura Temporal (ms)	Energia de Pulso em J
430/430	1	90	9,0	2,0	5,0	10,0

Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros de soldagem laser utilizados para as amostras da junta dissimilar entre os aços inoxidáveis austenítico AISI 316L e o aço inoxidável ferrítico AISI 430 são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5. Parâmetros de soldagem laser Nd:YAG pulsada na junta dissimilar entre o aço inoxidável austenítico AISI 316L e o aço inoxidável ferrítico AISI 430.

Amostra	Velocidade da mesa (mm/s)	Diâmetro da marca (mm)	Taxa de Sobreposição (%)	Frequência (Hz)	Potência de Pico (kW)	Largura Temporal (ms)	Energia de Pulso em J
CP1	1	1,07	50	1,8	2,0	5,0	10,0
CP2	1	1,07	70	3,0	2,0	5,0	10,0
CP3	1	1,07	90	9,0	2,0	5,0	10,0

Fonte: Próprio autor.

Foi feito o balanço microestrutural no metal de solda e os resultados experimentais foram analisados com base na relação entre aporte térmico, frequência, taxa de sobreposição, geometria do cordão de solda, microestrutura e dureza.

As amostras foram preparadas por meio de preparação metalográfica convencional, com emprego de processos de lixamento e polimento. A microestrutura dos metais de solda foi revelada utilizando o reagente Behara modificado (20 ml de HCl, 80 ml de água destilada e deionizada, 1,0g de metabissulfito de potássio e 2,0g de bifluoreto de amônio).

Para a realização das macrografias as amostras foram analisadas pelo equipamento Estéreo Microscópio Zeiss – Discovery V8 (Figura 6) do laboratório de microscopia da Unesp – Ilha Solteira, que capta as imagens por uma câmera conectada a um computador, com o software Axio Vision instalado, utilizado na medição da geometria dos cordões de solda. As micrografias e análises químicas por EDS foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) do

laboratório multiusuário da Unesp – Ilha Solteira da mesma marca Zeiss, modelo EVO LS15 (Figura 7);

Figura 6. Microscópio Zeiss, modelo Discovery V8.



Fonte: LEITE,G. S. C.

Figura 7. Microscópio Eletrônico de Varredura, Zeiss, modelo EVO LS15.

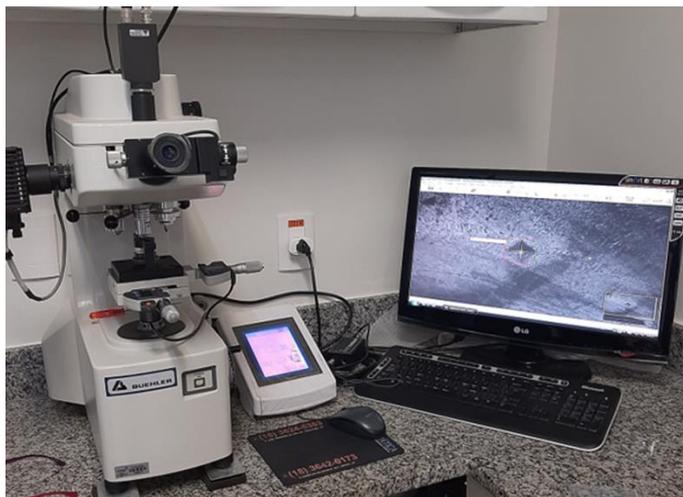


Fonte; LEITE,G. S. C.

A análise do balanço microestrutural dos cordões de solda foi feita utilizando-se o software livre Image J. Utilizou-se o processo de binarizar as imagens e o software entrega a contagem de bits pretos e brancos. A região de ferrita é representada pelos bits pretos e a região de austenita representada pelos bits brancos.

Afim de avaliar as variações de propriedades mecânicas entre o metal base e o cordão de solda (zona fundida e ZTA) foram realizados ensaios de microdureza Vickers utilizando-se o microdurômetro do fabricante Buehler, modelo MicroMet 5114, localizado no Laboratório da Área de Pediatria, do departamento de odontologia da Unesp – Campus de Araçatuba, mostrado na Figura 8.

Figura 8. Microdurômetro Buehler MicroMet 5114.



Fonte: Próprio Autor.

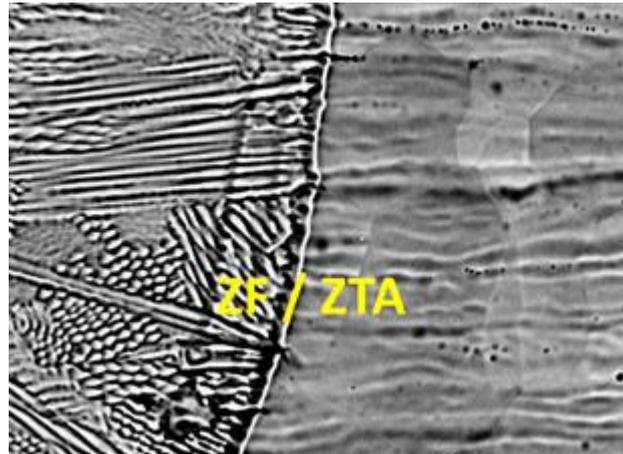
O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM E384, utilizando-se um indentador Vickers (ponta piramidal de diamante), carga de ensaio de 2N (200 gf) e, uma distância mínima de 2,5 vezes a diagonal da endentação, sendo que a padronização do distanciamento determina que a distância entre os pontos não seja menor do que o triplo da diagonal da pirâmide gerada. Os valores obtidos permitiram traçar um perfil de microdureza Vickers no cordão de solda e em suas regiões adjacentes.

5 RESULTADOS E DISCUSSOES

5.1 MACROGRAFIA E MICROGRAFIA

A seguir são observadas as microestruturas da zona de fusão e material base. A Figura 9 mostra o metal base AISI 316L e o metal de solda.

Figura 9. Micrografia eletrônica da junta soldada do aço inoxidável AISI 316L com AISI 316L.

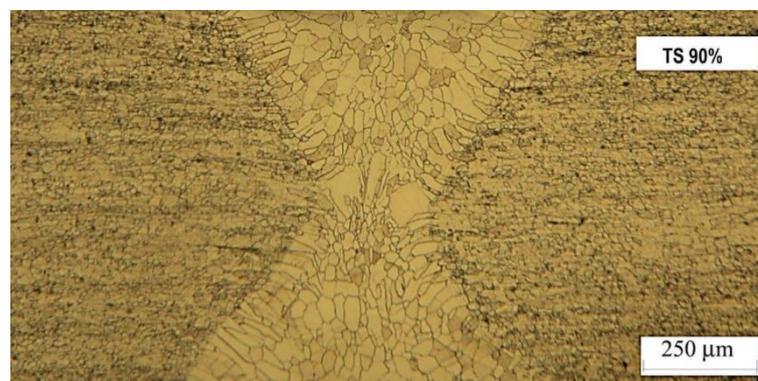


Fonte: Próprio Autor.

Nesse caso, ao soldar somente o aço inoxidável austenítico AISI 316L, a microestrutura do metal de solda formada foi completamente austenítica.

A Figura 10 mostra o metal base AISI 430 e o metal de solda, com taxa de sobreposição de 90%.

Figura 10. Micrografia ótica da junta soldada do aço inoxidável AISI 430 com AISI 430.

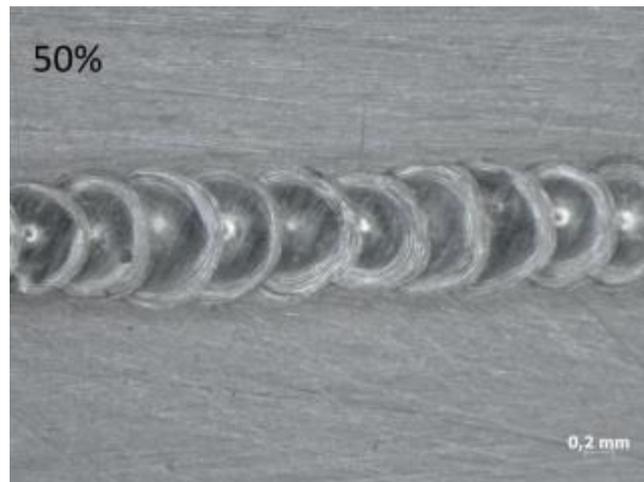


Fonte: Próprio Autor.

Nesse caso, quando soldamos somente o aço inoxidável ferrítico AISI 430, a microestrutura do metal de solda obtida foi totalmente ferrítica.

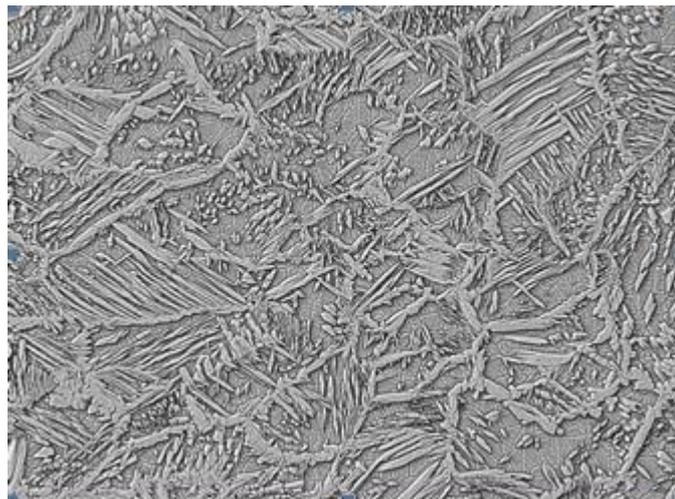
A Figura 11 e Figura 12 abaixo apresentadas são para os corpos de prova com taxa de 50%, a Figura 13 e Figura 14 com taxa de 70% e a Figura 15 e Figura 16 com taxa de 90% de sobreposição do cordão de solda, seguidas de suas respectivas micrografias binarizadas.

Figura 11. Macroscopia óptica da sobreposição do cordão de solda 50%.



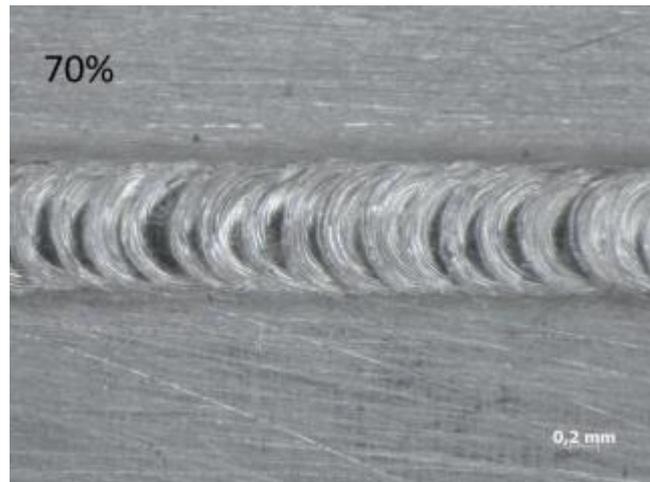
Fonte: Próprio Autor.

Figura 12. Microestrutura do cordão de solda entre os aços AISI 316L e AISI 430. Taxa de sobreposição 50%.



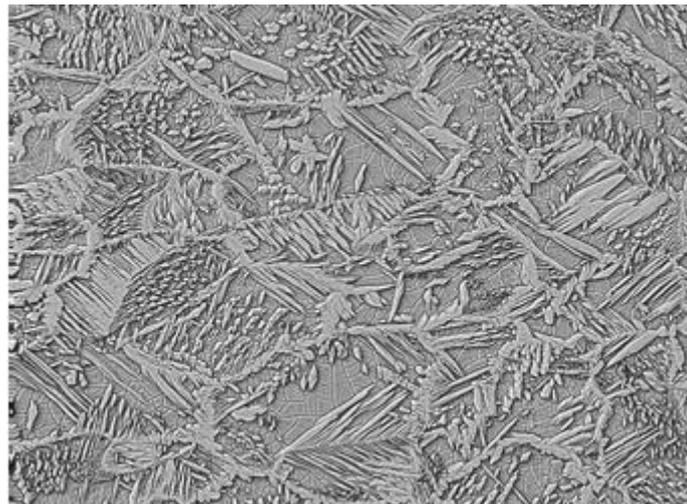
Fonte: Próprio Autor.

Figura 13. Macroscopia óptica da sobreposição do cordão de solda 70%.



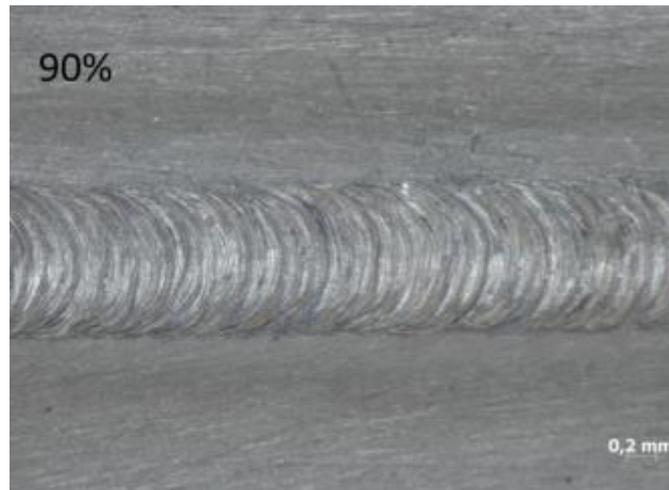
Fonte: Próprio Autor.

Figura 14. Microestrutura do cordão de solda entre os aços AISI 316L e AISI 430. Taxa de sobreposição 70%.



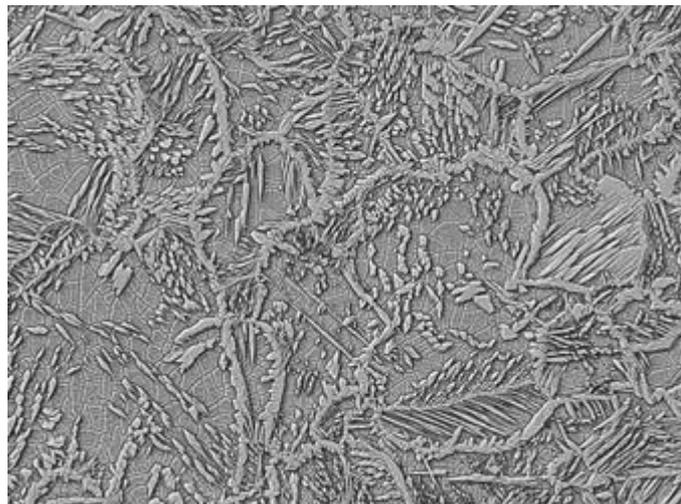
Fonte: Próprio Autor.

Figura 15. Macroscopia óptica da sobreposição do cordão de solda 90%.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 16. Microestrutura do cordão de solda entre os aços AISI 316L e AISI 430. Taxa de sobreposição 90%.



Fonte: Próprio Autor.

Após a soldagem dissimilar entre os aços austenítico AISI 316L com o aço inoxidável ferrítico AISI 430 observa-se uma microestrutura duplex no cordão de solda, formada pelas fases ferrita e austenita, sendo que o aço austenítico fica encarregado pelo fornecimento de elementos gamagênicos, como o Ni (que estabilizam a austenita) enquanto que o aço ferrítico responsável pelo fornecimento de elementos alfa gênicos como o Cr (estabilizadores da ferrita).

A Tabela 6 apresenta os resultados após a contagem de bits na Figura 12, 14 e 16 mostradas anteriormente.

Tabela 6. Balanço microestrutural no metal de solda.

Imagem	Percentual de Ferrita	Percentual de Austenita
CP01	57,1	42,9
CP02	49,8	50,2
CP03	49,1	50,9

Fonte: Próprio Autor.

Verifica-se pela análise da tabela um aumento significativo de austenita do metal de solda, variando entre 40% a 50%. Existe então um aumento significativo da quantidade desse microconstituente através da soldagem dissimilar com emprego de um aço austenítico.

5.2 ENSAIO DE DUREZA

A medição de dureza Vickers aplicada aos metais base e a região fundida entre os aços austenítico AISI 316L e o aço inoxidável ferrítico AISI 430 é mostrada na Figura 17, na qual é possível visualizar as distancias entre as endentações e os sentidos aplicados para as medições assim como a impressão obtida após a análise.

Figura 17. Esquema utilizado para medição da microdureza Vickers.



Fonte: Próprio Autor.

Os resultados de dureza são apresentados na Tabela 7.

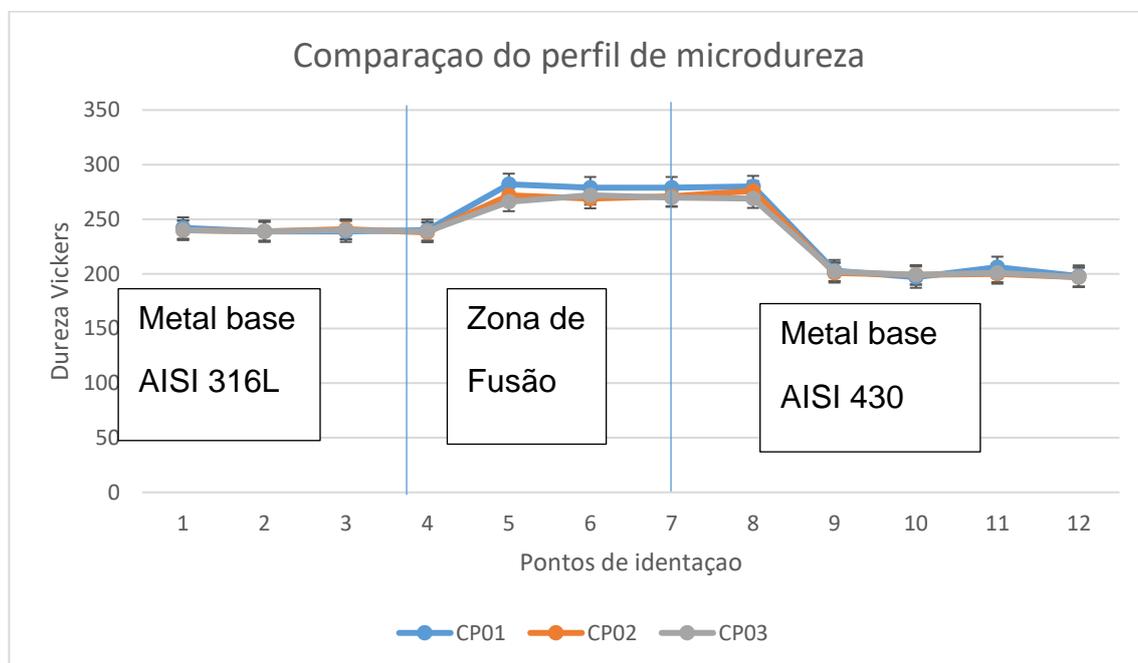
Tabela 7. Dados de microdureza obtidos ao longo da junta de soldagem dissimilar entre os aços AISI 316L e AISI 430,

Pontos	CP01	CP02	CP03	
1	242	240	240	Metal base AISI 316L
2	239	239	239	
3	239	241	240	
4	240	238	239	
5	282	272	266	Zona de Fusão
6	279	269	272	
7	279	271	270	
8	280	276	269	
9	203	201	202	Metal base AISI 430
10	197	199	199	
11	206	200	201	
12	198	197	197	

Fonte: Próprio Autor.

A partir dos dados da Tabela 7, construiu-se o gráfico comparativo apresentado na Figura 18.

Figura 18. Comparação do perfil de microdureza ao longo da junta de soldagem dissimilar entre os aços AISI 316L e AISI 430.



Fonte: Próprio Autor.

A dureza do metal de solda apresentou pequenas variações ao longo das medições realizadas para cada sobreposição, e comparando as três zonas, a maior dureza encontrada ocorreu na zona de fusão. Podemos esperar um maior limite de resistência à tração para esta região, uma vez que este se correlaciona de maneira diretamente proporcional com o aumento de dureza.

Também observou-se que quanto maior a porcentagem de sobreposição maior foi a dureza obtida na zona fundida.

Através dos dados também foi possível obter as respectivas microdurezas de 225 Hv para o metal de solda do aço AISI 316L e de 335 Hv para o metal de solda do aço AISI 430.

6 CONCLUSÃO

O balanço microestrutural apresentou em média 48% de austenita e 52% ferrita, para os corpos de prova com junta de soldagem dissimilar, indicando uma correção do balanço entre 50% de ferrita e austenita.

A análise da superfície do cordão de solda possibilitou a determinação da taxa de sobreposição. Quanto maior a taxa de sobreposição do cordão de solda, maior o aporte térmico aplicado, sendo o de maior aporte o CP 5 com 90% de sobreposição com 9,0 Hz e sendo relativamente baixa na amostra CP 1 com 1,8 Hz.

As macrografias das amostras não apresentaram uma ZAT macroscopicamente visível, fato atrelado ao baixo aporte térmico e rápido resfriamento característico do processo de soldagem a laser. As micrografias demonstraram um excelente resultado, sendo possível observar o equilíbrio de fases austenítica e ferrítica fator motivador da junção entre os aços austenítico AISI 316L e o inoxidável ferrítico AISI 430.

O ensaio de dureza demonstrou que a zona de fusão apresentou maior dureza que ambos os metais isoladamente, dado ao processo de soldagem a laser possuir rápido resfriamento, garantindo maior limite de resistência a tração para essa região.

REFERENCIAS

ASM Handbook. **Properties and selection: Irons, Steel and High-Performance Alloys**. 10ª ed. USA: ASM International, 1990.

CARBÓ, H. M. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações ArcelorMittal Inox Brasil**. [s.l: s.n.] 2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1988.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2005.

DAMOULIS, G. L., BATALHA, G. F. **Solda Laser Aplicada ao Processo de Fabricação de Carrocerias Automotivas**, 16th National Conference on Sheet Metal Forming, Ed. Lírio Schaeffler, LDTM-UFRGS, Porto Alegre, 21 outubro 2004.

DULEY, E. E. Laser welding. Nova York: **A Wiley-Interscience Publication**, 1998. Não paginado. ISBN: 0-471-24679-4.

KALPAKJIAN, S.; SCHIMID, S. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6. ed. Urbana-Champaign: Prentice Hall, 2009.

KAVAMURA, Haroldo Akira. **Aplicação de solda laser em carrocerias automotivas: estudo comparativo entre a solda laser e a solda ponto por resistência** /H.A. Kavamura. -- São Paulo, 2007.

LOREDO, A; Martin, B; Andrzejewski, H ; Grevey. D. **Numerical support for laser welding of zinc-coated sheets process development**. Applied surface science: [s.n.] 2002.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MOREIRA, Alcindo Fernando. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW** / Alcindo Fernando Moreira. – Ilha Solteira : [s.n.], 2008

NERI, M.A., Cola, R. ***Analysis of a martensitic stainless steel that failed due to the presence of coarse carbides.*** *Materials Characterization*. 47: 283- 289, 2001.

OUTOKUMPU. ***Outokumpu stainless steel handbook.*** Suécia: Outokumpu Oyj, 2013.

SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial Do Estado de São Paulo. **Soldagem.** São Paulo: SENAI, 1994. p.271–272 (Coleção Tecnologia).

STREICHER, M. A. In: ***Stainless Steel 77.*** Londres: *Climax Molybdenum Co*, 1977.

YAN, H., Bi, H., Li, X., Xu, Z. ***Microstructure, texture and grain boundaries character distribution evolution of ferritic stainless steel during rolling process.*** *Journal of Materials Processing Technology*. 209: 2627-2631, 2009.

WAINER, Emilio; BRANDI, Sergio Duarte; MELO, Fabio D. H. **Soldagem processos e metalografia.** São Paulo: Edgard Blucher, 1992.