

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

CAROLINA DE OLIVEIRA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DO METAL DE SOLDA DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO AISI 316L COM LASER PULSADO Nd:YAG**

Ilha Solteira
2017

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CAROLINA DE OLIVEIRA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DO METAL DE SOLDA DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO AISI 316L COM LASER PULSADO Nd:YAG**

Categoria do trabalho de Dissertação, apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de conhecimento: Materiais e processos de fabricação.

Nome do orientador
Vicente Afonso Ventrella

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- S586c Silva, Carolina de Oliveira.
Caracterização do metal de solda do aço inoxidável austenítico AISI 316L com laser pulsado Nd:YAG / Carolina de Oliveira Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
70 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2017
- Orientador: Vicente Afonso Ventrella
Inclui bibliografia
1. Aço inoxidável austenítico. 2. AISI 316L. 3. Soldagem a laser. 4. Nd:YAG.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

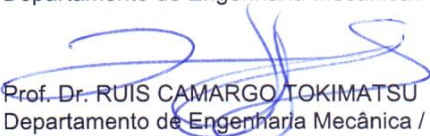
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Caracterização de juntas soldadas de aço inoxidável austenítico AISI 316L por laser pulsado Nd:YAG

AUTORA: CAROLINA DE OLIVEIRA SILVA

ORIENTADOR: VICENTE AFONSO VENTRELLA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. OTAVIO VILLAR DA SILVA NETO
Profissional Liberal / Perito Judicial da Poder Judiciário dos Estados

Ilha Solteira, 17 de fevereiro de 2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia, socorro presente na hora da angústia, a minha mãe Iria de Oliveira, minha irmã Carina de Oliveira Silva e ao meu sobrinho Jorge de oliveira Rodrigues.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella pela orientação, dedicação, ensinamentos e apoio no decorrer desse trabalho.

Aos amigos do mestrado Eduardo Fcamidu, Gabriel Pontin, Silvia Melo, Nicolas Sales, Gabriel Giampietro, André Emiliano, Bruno Alexsander, Arthur Videira e Rodrigo Souza Furlan que caminharam e contribuíram de alguma forma para que eu chegasse até aqui.

Aos amigos e familiares que a vida me proporcionou Ismael Junior, Patricia Alves, Aparecida Nascimento, Hugo Lopes e Jhonatan Aziel.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNESP-Campus de Ilha Solteira e todos os professores pela estrutura e ensinamentos.

A todos os técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a concretização deste trabalho.

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade”.

Albert Einstein

RESUMO

O aço inoxidável austenítico 316L é um material empregado nas indústrias que requerem resistência à corrosão e mecânica como a indústria de petróleo, gás natural e papel e celulose. O uso do laser vem se tornando uma ferramenta atrativa em relação as soldagens convencionais, devido aos seus benefícios que vão desde processo sem contato, controle de energia do feixe e fácil automatização do sistema. Nesse trabalho o objetivo foi analisar a influência do processo de soldagem laser pulsado Nd: YAG nas características mecânicas e microestruturais da junta soldada de chapas de aço inoxidável austenítico AISI 316L com 1,0 mm de espessura, averiguando o efeito da energia de soldagem nas características do cordão de solda desenvolvidas no Laboratório de Soldagem Laser, do Departamento de Engenharia Mecânica da FEIS UNESP. Foram realizadas soldagens de juntas de chapas aço inoxidável austenítico com valores fixos de energias de soldagem em 8 Joules, largura temporal em 4 ms, velocidade de soldagem em 1 mm/s, variando apenas a frequência entre 2 e 10 Hz, com isso obteve-se diferentes taxas de sobreposição, com proteção gasosa de argônio. Com as diferentes condições obtidas foram realizadas análises macrográficas das juntas soldadas, através de secções transversais das mesmas e, ensaios de microdureza Vickers e ensaios de tração. Os resultados obtidos mostraram que o cordão de solda se comportou de forma frágil, rompendo-se todos no cordão, a fractografia da seção transversal aparentemente apresentou muitos vazios, a ZTA mostrou-se muito pequena e aparentemente não houve crescimento do grão, o aumento da sobreposição da junta soldada tem influencia direta com a dureza do material.

Palavras-chave: Aço inoxidável austenítico. AISI 316L. Soldagem a laser. Nd:YAG.

ABSTRACT

316L austenitic stainless steel is a material used in industries which require mechanical and corrosion resistance like the petroleum industry, natural gas and paper/cellulose industry. The usage of laser has become an attractive tool compared to conventional welding, due to its benefits ranging from contactless process, beam power control and easy system automation. In this work the objective was to analyze the influence of the Nd: YAG pulsed laser welding process on the mechanical and microstructural characteristics of the welded joint of AISI 316L austenitic stainless steel sheets with 1.0 mm thickness, investigating the effect of the welding energy on the characteristics Of the weld bead developed at the Laser Welding Laboratory of the Mechanical Engineering Department of FEIS UNESP. Sheet joints of austenitic stainless steel were welded with fixed values of welding energies in 8 Joules, temporal width in 4 ms, welding speed in 1 mm / s, only varying the frequency between 2 to 10 Hz. With this, different rates of overlap, with argon gas protection. With the different conditions obtained, macroscopic analysis of the welded joints were carried out through cross sections of the welds and Vickers microhardness tests and tensile tests. The results showed that the weld bead behaved in a fragile manner, breaking all in the cord, the fracture of the cross section apparently presented many voids, the ZTA showed to be very small and apparently there was no growth in the grain, the increase of the overlap of the welded joint has a direct influence on the hardness of the material.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Morfologias da ferrita na Zona Fundida (ZF) para aços inoxidáveis austeníticos ...	20
Figura 2 - Esquema de funcionamento de uma cavidade geradora de laser.....	26
Figura 3 - Conjunto para soldagem a laser.	28
Figura 4 - técnica de solda a laser por condução.....	29
Figura 5 - técnica de solda a laser por “Keyhole”	30
Figura 6 - Formação do cordão de SL.	35
Figura 7 - Sistema de soldagem por laser pulsado de Nd: YAG, modelo UW 150A.	37
Figura 8 - Parâmetros de soldagem da amostra L80.	38
Figura 9 - Dispositivo de fixação da junta para a soldagem laser.	39
Figura 10 - Estereomicroscópio ZEISS, modelo DISCOVERY V.8.	40
Figura 11 - Junta soldada e macrografia do cordão de solda [µm].	40
Figura 12 - a) Microscópio óptico, marca: ZEISS, modelo Neophot 21; b) Microscópio Eletrônico de Varredura, marca: Zeiss, modelo Evo LS15.	41
Figura 13 - Ultramicrodurômetro digital Shimadzu, modelo DUH 211S.	42
Figura 14 - Máquina Universal de Ensaio, EMIC modelo: DL30.000.	43
Figura 15 – Desenho esquemático do corpo de prova.....	43
Figura 16 - Equipamento de eletroerosão a fio Eletrocut NOVICK.	44
Figura 17 - Sistema linear.....	45
Figura 18 - Fonte chaveada e motor de passo.	46
Figura 19 - Driver do motor de passo.....	46
Figura 20 - Arduino Mega.....	47
Figura 21 - Potência de Pico x Largura Temporal.....	48
Figura 22 - Macroscópica óptica da sobreposição do cordão de solda: 50%, 60%.....	50
Figura 23 - Macroscópica óptica da sobreposição do cordão de solda: 70%, 80%.....	50
Figura 24- Macroscopia óptica da sobreposição de 90% do cordão de solda.	51
Figura 25- Microscopia ótica transição metal base e metal de solda com 50% de sobreposição.	51
Figura 26 - Microscopia ótica metal base.....	52
Figura 27- Micrografia eletrônica da transição entre a zona fundida solda e metal base do aço inoxidável autêntico 316L com 50% de sobreposição.	52
Figura 28 - Micrografia eletrônica do metal base aço inoxidável autêntico 316L.	53
Figura 29- Macroscopia da seção transversal da soldagem com 50% de sobreposição.....	53
Figura 30 - Macroscopia da seção transversal da soldagem com 60% de sobreposição.....	54
Figura 31 - Macroscopia da seção transversal da soldagem com 70% de sobreposição.....	54
Figura 32 - Macroscopia da seção transversal da soldagem com 80% de sobreposição.....	55
Figura 33- Macroscopia da seção transversal da soldagem com 80% de sobreposição.....	55
Figura 34 – Amostra usada para ensaio de dureza.	56
Figura 35 - Gráficos de Microdureza das Juntas Laser 316L com 50%, 60%, 70%, 80% e 90% de sobreposição.	57
Figura 36 - Medida de microdureza todas as amostras.	58
Figura 37 - Cordões rompidos com sobreposição de 50% e 60%, respectivamente.	59

Figura 38 - Cordões rompidos com sobreposição de 70% e 80%, respectivamente.	59
Figura 39 - Cordão rompido com sobreposição de 90% e rompimento do metal base (MB)..	60
Figura 40 - Ensaio de tração com 50, 60, 70,80 e 90% de sobreposição.	61
Figura 41 - Fractografias com aumento de 120x com 50 % e 60% de sobreposição, respectivamente.	62
Figura 42 - Fractografias com aumento de 120x com 70 % e 80% de sobreposição, respectivamente.	62
Figura 43 - Fractografias com aumento de 120x com 90% de sobreposição e Metal base, respectivamente.	63
Figura 44 - Montagem do sistema.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Desenvolvimento comercialização e aplicações dos lasers.....	25
Tabela 2 - Comparação dos lasers para soldagem.	32
Tabela 3 - Composição química do aço AISI 316L (% peso).	36
Tabela 4 - Características da Fonte Laser Nd:YAG pulsada, modelo UW 150A, United.	36
Tabela 5 – Parâmetros de soldagem laser Nd:YAG pulsada.....	38
Tabela 6 - Descrição do kit sistema mesa linear.	44
Tabela 7 - Dados técnicos motor de passo.	45
Tabela 8 - Tabela de custo.....	47
Tabela 9 - Medidas de profundidade.	49
Tabela 10 - Resultado de Dureza.....	58
Tabela 11 - Resultado ensaio de tração.	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CP's	Corpos de provas
CP	Corpo de prova
UNESP	Universidade Estadual Paulista
ZF	Zona fundida
MB	Metal Base
ZTA	Zona termicamente afetada
B	Boro
P	Fósforo
Si	Silício
CO ₂	Dióxido de carbono
Ni	Nitrogênio
Cr	Cromo
CFC	Cúbica de face centrada
SL	Soldagem a laser

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1.	OBJETIVO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	AÇOS	16
2.1.1	Aços-liga	16
2.1.2	Aços inoxidáveis austeníticos.....	16
2.1.3	Soldabilidade do aço inoxidável austenítico.....	17
2.1.4	Microestrutura da zona fundida e corrosão	19
2.2	LASER	23
2.2.1	Laser Breve Histórico.....	24
2.2.2	Conceitos básicos de soldagem a laser	26
2.2.2.1	<i>Material Ativo</i>	26
2.2.2.2	<i>Fonte de Bombeamento</i>	27
2.2.2.3	<i>Cavidade Ressonante</i>	27
2.2.2.4	<i>Soldagem a Laser</i>	28
2.2.2.5	<i>Solda a laser por condução</i>	29
2.2.2.6	<i>Solda a laser por penetração</i>	30
2.2.3	Comparação do processo de soldagem Nd: YAG versus CO ₂	31
2.2.4	Vantagens e desvantagens da soldagem a laser	33
2.2.4.1	<i>Vantagens da solda laser</i>	33
2.2.4.2	<i>Desvantagens da solda laser</i>	34
2.2.4.3	<i>Cordão de solda laser</i>	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4	RESULTADOS.....	48
4.1	GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA	48
4.2	MICROSCOPIA OTICA	50

4.3	MICRODUREZA.....	55
4.4	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	58
4.5	FRACTOGRAFIA	62
4.6	AUTOMAÇÃO DA MESA GUIA	63
5	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A	68

1 INTRODUÇÃO

A busca por novas tecnologias vem se tornando cada vez mais importante no atual cenário mundial, isso se dá por mercado cada vez mais competitivo, a automação encontra lugar em abrangentes setores industriais, a fim de trazer maior agilidade ao processo e ter mais controle sobre ele, maior qualidade e acabamento, bem como reduzir custos e mão de obra em lugares inóspitos. Com isso também a crescente busca por fontes renováveis de energia para suprir a demanda energética crescente, uma vez que as fontes de energia usuais principalmente no Brasil provêm de energia não renovável ou que depende do volume de recursos hídricos.

A ferramenta laser tornou-se uma alternativa interessante e competitiva em relação aos métodos convencionais de manufatura. Atualmente, sua aplicação é diversificada, principalmente devido aos seus benefícios e a sua versatilidade, abarcando mercados como o da indústria automotiva, aeroespacial e médica. Esta tecnologia exerce grande interesse, pois consegue agregar inúmeras vantagens. Das quais mais são: processo sem contato, sem desgaste de ferramenta, uso de atmosfera controlada, alta densidade de energia, controle da energia empregada, flexibilidade do feixe, simplicidade de fixação, facilidade no processo de automação, pequena zona afetada termicamente (ZAT), alta velocidade de processo, excelente qualidade de borda, baixa emissão de poluição, entre outras.

Existe uma lacuna de desconhecimento entre as investigações teóricas e experimentais que determine a real influência dos parâmetros no processamento laser. Este fato, devido à complexidade do processo, é mais evidente no sistema laser pulsado. O tipo de laser é determinado pelo comprimento de onda de sua emissão e pelo regime de operação, contínuo, pulsado, chaveado, etc. Além disso, é imprescindível escolher e ajustar os vários parâmetros relativos ao processamento a laser que exercem influência na qualidade do resultado final, no custo e na velocidade de processo, entre outros.

Como a soldagem a laser visa a excelência de qualidade, esta deve obedecer a uma combinação precisa dos inúmeros parâmetros envolvidos. Estes parâmetros são: densidade de potência, modo transversal do feixe laser, polarização da luz, velocidade do processo, comprimento focal da lente utilizada, tipo, pressão e fluxo de gás de assistência, energia e duração temporal do pulso laser, comprimento de onda, entre outros.

O laboratório de soldagem da UNESP de Ilha Solteira recebeu a máquina de soldagem à laser em 2015, porém não contava com um dispositivo de soldagem automatizado. Portanto, havia dificuldade em produzir juntas com velocidades de soldagem controladas, sendo essencial a construção de um dispositivo automático para deslocamento da mesa.

Baseado nestes fatos, o escopo do presente trabalho foi determinar os efeitos da energia do pulso de um laser pulsado de Nd:YAG, utilizado na soldagem de lâminas finas de aço inoxidável austenítico AISI 316L, além de automatizar o processo de soldagem visando a melhoria do sistema, confiabilidade e conferir precisão. As suas aplicações incluem na indústria petroquímica, nuclear, processamento químico, tratamento de águas residuais, em usinas sucroalcooleiras entre outros.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo o estudo e o desenvolvimento da soldagem por laser pulsado Nd:YAG de juntas de lâminas finas do aço inoxidável austenítico AISI 316L.

Os objetivos específicos consistem em:

- Construir uma mesa de deslocamento-X para a fonte laser, para que seja possível uma soldagem com velocidade de avanço controlada;
- Determinar a melhor condição de soldagem através da variação da frequência observando as diferentes sobreposições do cordão de solda;
- Avaliar as características geométricas do cordão de solda;
- Avaliar a microestrutura do cordão de solda;
- Realizar medidas de microdureza no cordão de solda;
- Verificar a resistência mecânica das juntas soldadas com medições de dureza e ensaios de tração.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 AÇOS

O aço é uma liga composta por vários elementos químicos, alguns aços possuem uma composição química balanceada para ter alta resistência, ductilidade, tenacidade e alta resistência a corrosão, características essas vantajosas para o setor industrial.

2.1.1 Aços-liga

O aço inoxidável é constituído de uma mistura de ferro com 10,5% de cromo, o que o torna superior em quesitos de propriedades mecânicas se for comparadas ao aço comum. Na medida em que há adição controlada de elementos de liga a liga básica do aço inox, como silício, níquel e carbono, ela ganha mais propriedades mecânicas e aplicações como na indústria automotiva, construção civil e outras indústrias.

2.1.2 Aços inoxidáveis austeníticos

Possuem uma ampla aplicação de uso do níquel, que está presente em cerca de dois terços dos aços inoxidáveis produzidos, onde se inclui o inox mais comum, AISI 304 18Cr - 8Ni . Dependendo do teor de níquel os aços austeníticos respondem a trabalho a frio com aumento da resistência mecânica, podendo ser utilizado em operações severas de conformação, evitando ruptura prematura e trinca. Possui melhor ductilidade, boa soldabilidade, como também a proteção à corrosão e à oxidação a altas temperaturas.

Os aços inoxidáveis austeníticos são normalmente empregados nas indústrias petroquímicas para combater os ataques corrosivos causados pela combustão de gases, vapor e processos químicos.

Segundo (Modenesi, 2001) os aços inoxidáveis apresentam estrutura predominantemente austenítica à temperatura ambiente, não sendo endurecíveis por tratamento térmico. Formam o grupo mais usado e numeroso de aços inoxidáveis. Contêm entre cerca de 16 e 30% de Cr, entre 6 e 26% de Ni e menos de 0,3% de carbono, sendo o tipo

mais comum o aço AISI 304. Apresentam, à temperatura ambiente, um baixo limite de escoamento, um limite de resistência elevado e grande ductilidade. São, entre os aços inoxidáveis, os materiais de melhor soldabilidade e resistência geral à corrosão. Encontram aplicações na indústria química, alimentícia, de refino de petróleo e em muitas outras.

O aço AISI 316L é semelhante ao 316 (sua composição conta com molibdênio, o que torna esta liga superior aos 304 e 304L para aplicações nos mesmos tipos de indústrias só que com baixo teor de carbono), o que proporciona maior resistência à corrosão intercrystalina. As principais aplicações do aço AISI 316L são: peças de válvulas; bombas; tanques; evaporadores e agitadores; equipamentos têxteis condensadores; peças expostas à atmosfera marítima; adornos; tanques soldados para estocagem de produtos químicos e orgânicos; bandejas; revestimento para fornos de calcinação.

2.1.3 Soldabilidade do aço inoxidável austenítico

Segundo Moreira (2008) os aços inoxidáveis são ligas ferrosas que contêm Cromo, comumente Níquel e, em vários casos, outros elementos de liga. O Cromo é o principal responsável pela resistência à corrosão de tais aços devido ao fato de ser um elemento menos nobre que o Ferro nas séries eletroquímicas. Sendo assim, a maior afinidade do Oxigênio pelo Cromo leva a formação de uma camada passivante de óxido de Cromo na superfície destas ligas, que se torna uma barreira invisível, contínua, aderente, impermeável e praticamente insolúvel quando em contato com um grande número de reagentes. Quando esta camada é destruída e as condições são contrárias à sua regeneração espontânea, tal como a presença de um meio redutor (deficiente em Oxigênio), um aço inoxidável se torna muito pouco resistente à corrosão.

O efeito anticorrosivo do Cromo aparece mesmo quando este se encontra presente em pequenas quantidades na liga. Assim, aços com apenas 5% de Cromo são muito mais resistentes à corrosão do que aços ao Carbono comuns. Contudo, convencionalmente, o nome aço inoxidável é reservado a ligas Fe-C-Cr (Ferro-Carbono-Cromo) ou Fe-C-Cr-Ni (Ferro-Carbono-Cromo-Níquel) que contêm, no mínimo, de 10 a 12%Cr (CRESPO, 2014).

Em virtude da multiplicidade de composições químicas e das características microestruturais que estas lhes conferem após o resfriamento, os aços inoxidáveis foram divididos nas seguintes categorias:

- Aços inoxidáveis martensíticos;

- Aços inoxidáveis austeníticos;
- Aços inoxidáveis ferríticos;
- Aços inoxidáveis duplex;
- Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação.

Os principais tipos de aços inoxidáveis austeníticos são:

- Resistentes à corrosão;
- Resistentes ao calor;
- Resistentes ao desgaste;

Os aços inoxidáveis austeníticos formam o maior grupo de aços inoxidáveis em uso, representando cerca de 65 a 70% do total produzido. Essa classe de aços inoxidáveis possui as seguintes propriedades:

- Tenacidade e ductilidade superiores a da maioria dos aços, o que, segundo Marques (2003) também se traduz em boa resistência à cavitação. Para Zeemann (1998b), devido à presença de uma estrutura CFC (Cúbica de Faces Centradas) o aço inox austenítico não se fragiliza. E sempre apresenta comportamento dúctil, qualquer que seja a temperatura de serviço, estado de tensões ou taxa de carregamento. Estas propriedades são mantidas até temperaturas muito baixas, viabilizando sua utilização em sistemas de criogenia;
- Boa resistência mecânica e à corrosão a temperaturas elevadas, o que permite a sua utilização em temperaturas consideravelmente superiores à temperatura máxima de serviço de aços baixa liga ou de aços inoxidáveis martensíticos e ferríticos;
- Elevada capacidade de endurecimento por deformação plástica com baixa perda de ductilidade. A medida que o aço inox austenítico sofre deformação ocorre o encruamento da estrutura austenítica e o material vai aumentando sua resistência e dureza. Adicionalmente, os baixos valores de limite de escoamento, σ_e próximo de $40\%\sigma_r$, fazem com que em serviço, quando ocorre a união entre os esforços previstos em projeto e as tensões residuais oriundas da soldagem, o material se deforme e alivie o tensionamento interno, de forma que, para a maioria das aplicações os aços inoxidáveis austeníticos não precisam de tratamentos térmicos pós-soldagem para alívio de tensões.

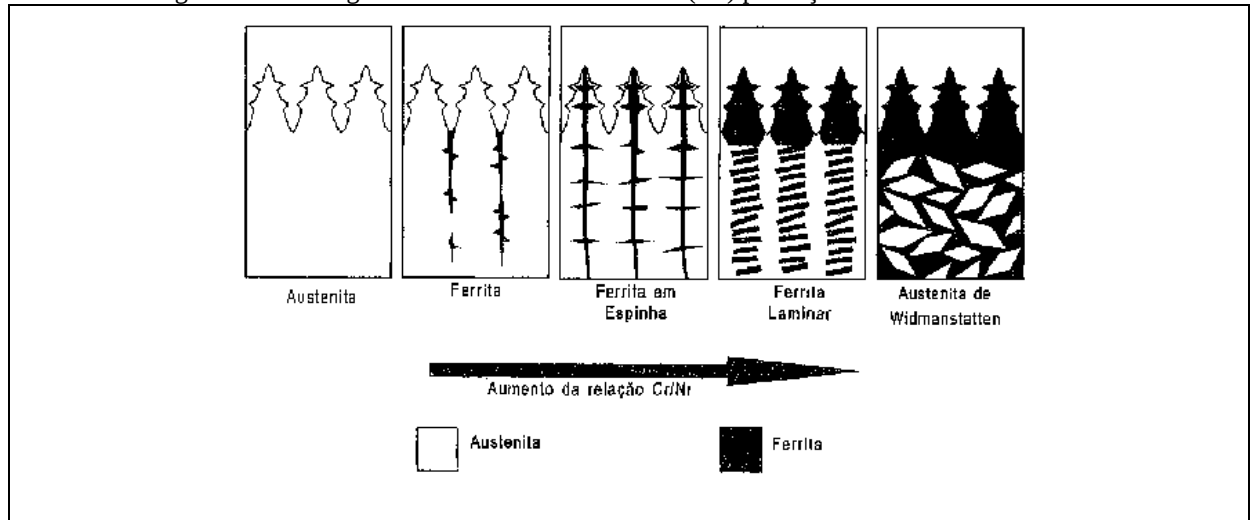
- Soldabilidade relativamente boa. A ausência de transformação martensítica durante a soldagem e sua boa tenacidade implicam em insensibilidade à fissuração por Hidrogênio;
- Não possuem propriedades magnéticas.

2.1.4 Microestrutura da zona fundida e corrosão

A microestrutura final da ZF (Zona Fundida) de um aço inoxidável austenítico dependerá da forma de solidificação do aço e das transformações subsequentes no estado sólido. Esta microestrutura pode ser classificada de acordo com a morfologia da ferrita. As principais microestruturas encontradas para valores crescentes da relação Cr/Ni são:

- Austenita - Este tipo de microestrutura resulta da solidificação direta para austenita, sem formação de ferrita- δ ;
- Austenita + Ferrita – Resulta da solidificação em austenita primária com formação de ferrita localizada em contornos de grão ou de dendritas de austenita;
- Austenita + Ferrita em Espinha ou Vermicular – Resulta da solidificação em ferrita primária, com formação de austenita tanto nas etapas finais desta como no estado sólido. A ferrita remanescente se localiza ao longo do centro das dendritas de austenita. Esta costuma ser a morfologia mais encontrada em soldas de aço inoxidável austenítico;
- Austenita + Ferrita Laminar ou Rendilhada – Resulta da solidificação em ferrita primária com a transformação desta em austenita ao seu final, principalmente no estado sólido.
- Ferrita + Austenita de Widmanstatten – Neste caso, a solidificação ocorre somente com a formação de ferrita. A austenita é formada na matriz de ferrita já completamente solidificada, nucleando nos contornos de grão de ferrita e crescendo como placas para o interior dos grãos. A Figura 1 apresenta as estruturas anteriormente citadas.

Figura 1 -Morfologias da ferrita na Zona Fundida (ZF) para aços inoxidáveis austeníticos



Fonte: (MODENESI, 2001)

Para a maioria das aplicações a ferrita- δ , quando presente em teores não muito elevados, é um constituinte benéfico para a ZF, pois tende a atrair elementos formadores de inclusões tais como o P e S, reduzindo a tendência ao desenvolvimento de trincas a quente. Por outro lado, a quantidade de ferrita- δ deve ser controlada em aplicações em que a junta soldada necessita de uma ótima resistência à corrosão, uma alta tenacidade da solda a baixas temperaturas e quando a peça não puder apresentar qualquer magnetismo residual (a ferrita- δ por ser uma fase ferromagnética pode ser magnetizada enquanto a austenita não). A quantidade de ferrita na microestrutura também deve ser controlada a fim de se evitar o trincamento a frio assistido pelo hidrogênio, já que este elemento possui uma elevada difusibilidade na ferrita.

Quando um inox austenítico comum é exposto a temperaturas que variam na faixa de 425 a 870°C ocorre a precipitação de carbonetos e nitretos de Cr nos contornos de grão, fazendo com que o teor de Cr das regiões adjacentes aos contornos caia de tal modo a facilitar o processo corrosivo.

A intensidade da sensitização varia com a composição química, tempo de exposição, faixa de temperatura e taxa de resfriamento. Assim, um tempo de poucos segundos a uma temperatura intermediária dentro da faixa de temperatura de sensitização, 650°C, por exemplo, pode ser mais danoso do que muitos minutos a 425°C ou a 870°C.

Por ser extremamente prejudicial contra a resistência à corrosão dos inoxidáveis austeníticos surgiu a necessidade do desenvolvimento de alguns métodos de controle do processo de sensitização, entre eles:

- Tratamento térmico pós-soldagem de solubilização, o qual tem como objetivo recolocar o Carbono e o Cr contido nos carbonetos novamente em solução e assim restaurar a resistência à corrosão da liga. Este tratamento é feito através da permanência do material a temperaturas de, aproximadamente, 1040°C. É válido lembrar que a esta temperatura o aço inox deve estar bem protegido contra a oxidação em decorrência da elevada reatividade com o ar atmosférico. Adicionalmente, peças de grande espessura devem ser adequadamente suportadas para evitar distorções e seu resfriamento em água não é aconselhável;
- Utilização de aço inox austenítico de extra-baixo teor de carbono – ($0,03\%C_{\text{máx}}$), os quais são resistentes à precipitação de carbonetos de Cr na faixa de temperatura de sensitização em virtude de seu baixo teor de Carbono;
- Utilização de aço inox austenítico estabilizado a base de Nb + Ta ou Ti. Por possuírem uma maior afinidade química que a do Cr pelo C estes elementos possibilitam a formação de carbonetos preferenciais os quais precipitam quando a faixa de temperatura de sensitização é atingida, deixando em solução o Cr, que atuará no combate à corrosão.

Por se tratarem de materiais de alta liga, o procedimento de soldagem pode provocar a precipitação de certos elementos químicos, os quais também são responsáveis pela resistência ao desgaste ou a elevadas temperaturas, devido à exposição de certas áreas da junta a determinadas faixas de temperatura.

Aços resistentes ao desgaste possuem uma estrutura austenítica a temperatura ambiente, de modo que ao sofrerem trabalho mecânico a estrutura austenítica encrua e aumenta sua resistência e dureza. Ao se realizar a soldagem deste tipo de aço, certas regiões da junta podem ser submetidas a faixas de temperaturas que favoreçam a precipitação de elementos estabilizantes da austenita, o que pode levar ao aparecimento de martensita na microestrutura, que por ser muito frágil pode ser arrancada facilmente durante o serviço. Desse modo, recomenda-se realizar a soldagem com processos de alta intensidade e baixo aporte de calor a fim de se evitar o aquecimento de certas regiões da junta a temperaturas que possibilitem a precipitação.

No caso de aços resistentes a elevadas temperaturas, elevados percentuais de Carbono e Cromo são adicionados com o intuito de conferir resistência à fluência e à corrosão. O

principal problema consiste em se realizar soldagem de manutenção em equipamentos que já sofreram algum tipo de aquecimento em serviço, pois pode ter ocorrido a precipitação de fases como do tipo σ , que elevam muito a dureza e resistência do aço, de modo que o risco de aparecimento de trincas durante e após a soldagem seja eminente.

Outro grave problema de soldabilidade característico dos aços inoxidáveis austeníticos são as trincas a quente.

De acordo com Zeemann (2003) as trincas a quente ocorrem devido à baixa solubilidade das impurezas na estrutura austenítica. Estas impurezas consistem de óxidos formados por elementos como B (Boro), S, P e Si (Silício), os quais possuem baixo ponto de fusão e, por isso, são arrastados até a última região a se solidificar, geralmente localizada no metal de solda. Desse modo, em virtude de sua baixa resistência mecânica e das tensões desenvolvidas durante o resfriamento da peça ocorre a fissuração do material. Uma variante da trinca a quente é a trinca de liquação, na qual os óxidos de baixo ponto de fusão se alojam nos contornos de grão situados entre o metal de solda e o metal base e, quando são aquecidos, perdem resistência mecânica e permitem a fissuração, mesmo sob um baixo nível de tensão.

As trincas a quente podem ser minimizadas ou prevenidas tanto através do correto controle do teor de ferrita- δ presente na microestrutura quanto pela minimização do teor de impurezas como B, S, P e Si contidos na liga, embora este último procedimento não seja muito utilizado por aumentar significativamente os custos para produção do aço.

É recomendado que se tenha um percentual de ferrita na microestrutura tal que promova a prevenção das trincas a quente sem, contudo, causar prejuízo à resistência à corrosão. Sendo assim, proporções de ferrita na microestrutura em torno de 4% são consideradas suficientes para a prevenção das trincas a quente e insuficiente para causar uma redução efetiva na resistência à corrosão.

Em virtude dos problemas de soldabilidade apresentados pelos aços inoxidáveis austeníticos é recomendado que na soldagem destas ligas se evite os seguintes procedimentos:

- Pré-aquecimento do material, o qual pode aumentar a precipitação de carbonetos, causarem deformação dimensional e elevar a tendência ao trincamento a quente;
- Selecionar consumíveis que não evitem trincamento a quente

- Soldagem com elevada restrição da junta, onde, tal procedimento pode ocasionar tanto um aumento no tamanho do grão próximo a ZTA, levando a uma queda de tenacidade, quanto maiores deformações plásticas na peça decorrentes de gradientes térmicos;
- Utilização de moderados a altos aportes térmicos;
- Utilização de processos de soldagem de baixa intensidade térmica;
- Resfriamento lento ou pós-aquecimento da junta;
- Soldar a junta sem refrigeração;
- Realização de tratamentos térmicos pós-soldagem dentro da faixa de sensitização do material;
- Soldar um inoxidável resistente ao calor que já foi submetido a serviço a quente.

É desejável que na soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos sejam utilizados metais de adição similares com um teor de elementos de liga tal que promova a presença de uma quantidade de ferrita na microestrutura de, aproximadamente, 4% na condição como soldado.

O uso de Ar como gás de proteção é recomendado para a maioria dos casos por ser um gás inerte e, desse modo, não influenciando na composição química do metal de solda.

2.2 LASER

A palavra LASER é formada pelas iniciais de “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”, que podemos entender por “Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação”. Essa fonte de energia que incide sobre o material a ser soldado provoca aquecimento concentrado na faixa de 1,5mm sobre o material (Damoulis & Batalha, 2004, citado por Munekata, 2011). Essa fonte é produzida a partir de algum tipo de fonte de energia, como uma lâmpada, que estimula um grande número de elétrons em repouso, os quais são capazes de produzir fótons de luz e este processo desencadeia uma ação repetida de emissão de energia gerando uma luz intensa. Os tipos de lasers comumente mais usados na indústria é o laser de CO₂ e o laser Nd:YAG.

2.2.1 Laser Breve Histórico

Os primeiros trabalhos de pesquisa que conduziram à invenção do feixe de laser foram realizados por Albert Einstein e datam de 1917: versam sobre os fenômenos físicos de emissão espontânea e estimulada subjacentes ao funcionamento do laser. Townes confirmou experimentalmente em 1954 o fenômeno através da aplicação da emissão estimulada à amplificação de ondas ultracurtas.

O primeiro LASER, um sólido de rubi, excitado por uma lâmpada fluorescente de vapor de mercúrio e filamento helicoidal, foi construído em 1960 por Maimann. Poucos meses depois os Laboratórios da AT&T Bell desenvolveram um laser gasoso de He-Ne, e somente alguns anos depois surgiria um LASER de CO₂. O feixe LASER se propaga no ar com pouca divergência, orientando-se por óticas sem perder ou alterar suas características físicas, fato este que impulsionou seu desenvolvimento. Existem hoje vários tipos, indo do sólido ao gasoso, com comprimentos de onda na faixa do Infravermelho (IF) até o Ultravioleta (UV).

A evolução histórica do laser pode ser resumida nos fatos relacionados abaixo:

1917 – Einstein publica a teoria da emissão estimulada

1954 – Townes e Shawlow criam o *Maser*

1958 - Townes e Shawlow publicam suas hipóteses para a construção de um laser.

1960 – Maimann constrói o primeiro laser

1961 – Javan e Herriot desenvolvem laser de HeNe

1962 – Rediker, Nathan e Hall desenvolvem o laser de diodo

1964 – Patel constrói o laser de CO₂

1964 – Geusic desenvolve o laser Nd:YAG

Década de 70 e 80 – Utilização industrial do laser de CO₂ e Nd:YAG

Década de 80 e 90 – Desenvolvimento de novas fontes de laser

Década de 80 e 90 – Disseminação do uso de laser em vários campos.

O comprimento de onda e a potência de saída de um determinado laser definirão sua aplicação. Atualmente os lasers são aplicados nos mais diversos campos, tais como:

- Optoeletrônicos -CD players; CD-ROM drivers;

- Medicina – oftalmologia; dermatologia; odontologia;
- Medição e Instrumentação – alinhamento de máquinas; medidas superficiais;
- Fabricação – corte; soldagem; tratamento superficial;

A Tabela 1 apresenta a evolução dos materiais utilizados para soldagem a laser junto com seu desenvolvimento e aplicação.

Tabela 1 - Desenvolvimento comercialização e aplicações dos lasers.

Laser	Ano do desenvolvimento	Comercializado desde	Aplicação
Rubi	1960	1963	Metrologia, aplicações medicas e processamento de materiais inorgânicos.
Nd-Vitreo	1961	1968	Medidas de comprimento e velocidade
Diodo	1962	1965	Aplicações biomédicas e soldagem
He-Ne	1962	1965	Medidas de comprimento e velocidade, alinhamento e pontos de luz
CO₂	1964	1966	Processamento de materiais, corte, fusão.
Nd-YAG	1964	1966	Processamento de materiais, fusão , técnicas analíticas
Íon de Argonio	1964	1966	Luz intensa, aplicações médias
Dye	1966	1969	Detecção de poluição, separação de isótopos
Cobre	1966	1989	Separação de isótopos

Excimer	1975	1976	Aplicações médicas, processamento de materiais
----------------	------	------	---

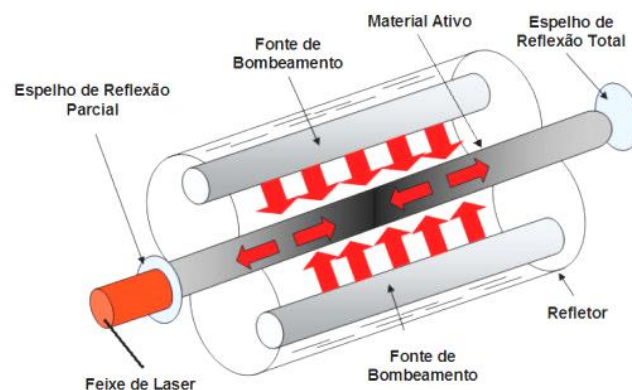
Fonte: Munekata (2011)

2.2.2 Conceitos básicos de soldagem a laser

O laser é uma fonte de radiação na qual um fóton emitido por um átomo excitado é levado a extrair energia dos outros átomos excitado, criando com isso outros fótons e aumentando assim a amplitude do campo eletromagnético original. Portanto, é preciso dispor de um grande número de átomos excitados passíveis de serem estimulados. (Universidade Santa Cecília – Unisantia). Os três elementos são:

1. Um material ativo;
2. Uma fonte de bombeamento;
3. Uma cavidade ressonante.

Figura 2 - Esquema de funcionamento de uma cavidade geradora de laser.



Fonte: Damoulis & Batalha (2004, citado por Kavamura, 2007, p 8)

2.2.2.1 Material Ativo

Segundo Kavamura (2007), o material ativo é o responsável pela amplificação da

energia emitida pela fonte de bombeamento. O material usado pode ser sólido, líquido ou gasoso. No caso de sólidos o material ativo pode ser um cilindro usinado de cristal de rubi, vidro de neodímio ou YAG (Yttrium Aluminium Garnet - $Y_3Al_5O_{12}$ dopado com neodímio). Os materiais ativos líquidos ou gasosos devem ser fechados em um recipiente e as duas paredes opostas são transparentes e planas. Os materiais líquidos ainda não ultrapassam o âmbito dos laboratórios, porém os gasosos são amplamente usados como o hélio-neônio, anidrido carbônico, argônio ionizado, CO_2 etc.

2.2.2.2 Fonte de Bombeamento

Segundo Kavamura (2007) a fonte de bombeamento é responsável pela emissão de energia a ser amplificada, é através dela que é possível o feixe ser contínuo ou pulsado. O sinal pode ser pulsado como um flash de luz ou como uma descarga elétrica que vai resultar no laser pulsado, mas poder ser contínuo também, como o arco de xenônio envolvendo o material ativo.

2.2.2.3 Cavity Ressonante

É constituído por dois espelhos posicionados paralelamente entre si, no qual um dos espelhos tem refletividade de 100% e outro parcial, permitindo que parte da radiação circulante no ressonador seja transmitida. (Kavamura, 2007)

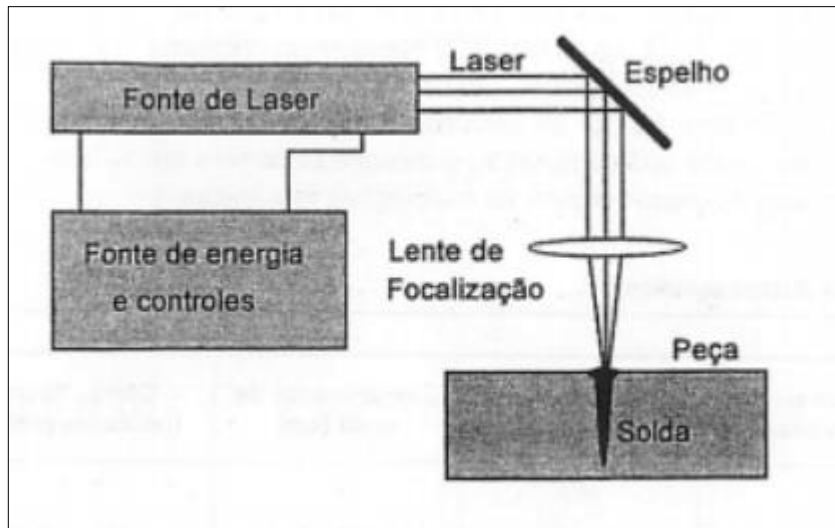
Ainda segundo Kavamura (2007) a principal função da cavidade ressonante é agir como um elemento de realimentação altamente seletivo, armazenando luz que circula entre os espelhos e permitindo que parte do sinal óptico emitido pelo meio ativo retorne para ser amplificado. Esta amplificação ocorre de modo coerente e colimado, resultando em um estreito feixe de luz direcionado perpendicularmente às superfícies dos espelhos. Além disso, o ressonador também é responsável pela distribuição espacial de intensidade do feixe laser, e também exerce influência nas propriedades espectrais e de potência da radiação emitida.

Uma característica fundamental da cavidade do laser é o cuidado na sua construção, pois é necessário que o sistema seja livre de contaminações e que suas lentes sejam precisas para a aplicação desejada a fim de aumentar sua eficiência (MODENESI, 2011, p 310).

2.2.2.4 Soldagem a Laser

Os equipamentos necessários para a soldagem a laser são uma fonte de energia e seus controles, a fonte do laser e seu sistema de refrigeração, como mostra na Figura 3:

Figura 3 - Conjunto para soldagem a laser.



Fonte: Modenesi (2011)

A alta concentração do feixe de laser proporciona uma radiação de excelente qualidade, permitindo diversas aplicações, dentre elas a soldagem. A utilização do laser no processo de soldagem possibilita a obtenção de determinadas características impossíveis de serem obtidas por outros processos, tais como velocidade de soldagem elevadas, ausência de contato entre a fonte de calor e o material utilizado, baixa distorção e pequenas áreas termicamente afetadas pelo calor (SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL - SENAI, 1994).

A soldagem a laser é caracterizada por um delicado balanço entre aquecimento e resfriamento dentro de um volume, no qual uma poça líquida é formada e permanece estável até a solidificação. O objetivo da solda a laser é criar a poça de fusão pela absorção da radiação laser incidente, possibilitar o seu crescimento até o tamanho desejado e então

propagar esta poça através da interface sólida, eliminando a linha de junta original entre os componentes a serem unidos (DULEY, 1998).

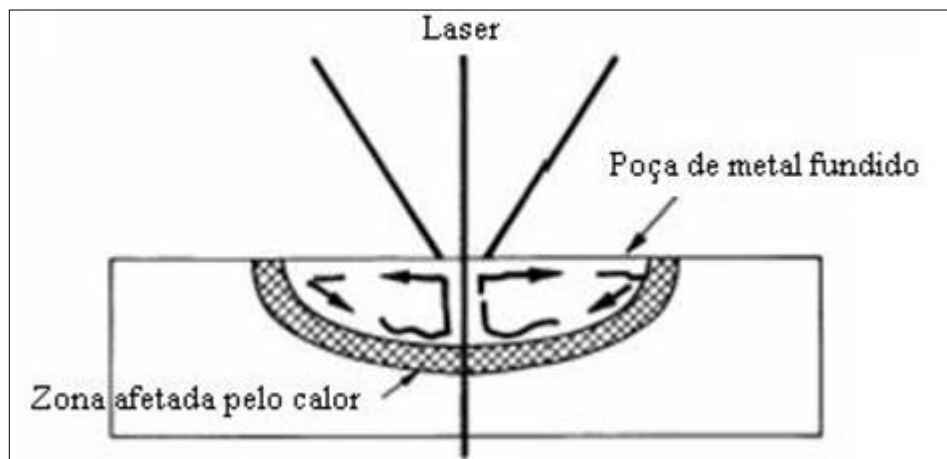
Segundo Modenesi (2011) as operações com fontes de alta intensidade podem ser feitas utilizando-se duas técnicas: a da fusão convencional, como em outros processo de soldagem, comumente chamada de condução, e a técnica “Keyhole” ou do penetração. A diferença básica entre elas está na superfície da poça de solda, que permanece íntegra durante a solda por condução e é alterada na solda por penetração pelo feixe de laser que penetra na região de fusão (DULEY, 1998).

Segundo essas técnicas de soldagem são possíveis de serem executadas com laser contínuo ou pulsado. No caso do laser pulsado, a duração do pulso e a intensidade do feixe definem se a solda é feita por condução ou por penetração (HEL; FUERSCHBACH; DEBROY, 2003, citado por Munekata, 2011).

2.2.2.5 Solda a laser por condução

Segundo Berreta et al. (2005) Na soldagem por condução o material é aquecido até fundir e a energia do laser não é suficiente para evaporar o material. A energia do pulso é transmitida para o resto do material por condução de calor na poça fundida, de acordo com a Figura 4.

Figura 4 - técnica de solda a laser por condução.



Fonte: Berreta et al. (2005)

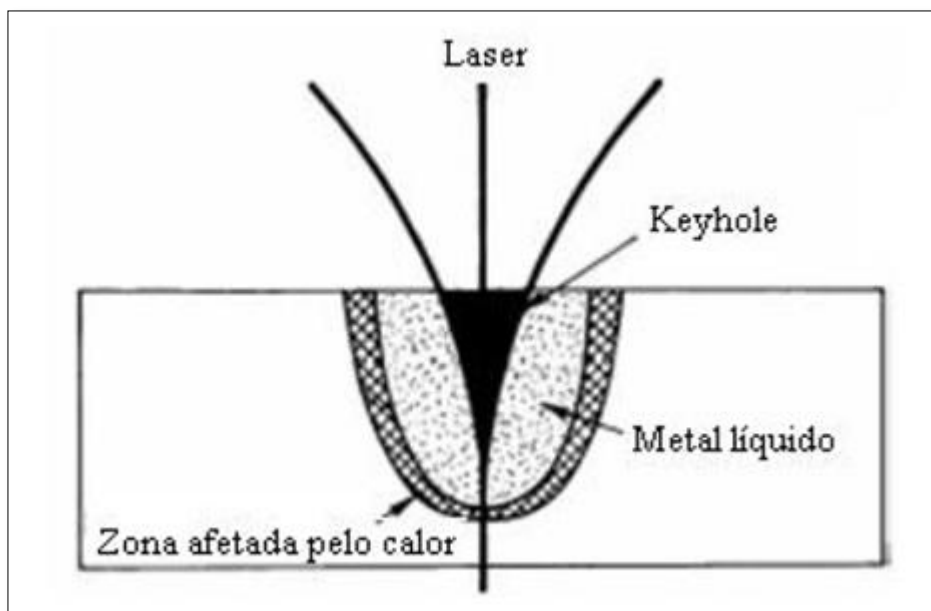
A sua grande desvantagem é por possuir pouca penetração, as propriedades mecânicas da solda podem ser prejudicadas.

2.2.2.6 Solda a laser por penetração

A soldagem por penetração ou “keyhole” é mais utilizada e é possível se a densidade de energia for suficiente alta para fundir toda espessura junta, para tanto é necessário que o feixe de laser seja perpendicular a superfície da peça e que seja bem absorvido, como mostra a Figura 5.

As temperaturas dentro do furo podem alcançar valores extremamente altos tornando a técnica “keyhole” muito mais eficiente, pois o calor é conduzido de forma radial para fora, formando uma região fundida que cerca o vapor. Quando o feixe de laser se move ao longo da peça, o metal fundido preenche o espaço atrás do furo e se solidifica (MODENESI, 2011, p 310).

Figura 5 - técnica de solda a laser por “Keyhole”.



Fonte: Berreta et al. (2005).

2.2.3 Comparação do processo de soldagem Nd: YAG versus CO₂

Segundo Modenesi (2011, p 311) a tecnologia de soldagem a laser evoluiu muito. Dois tipos de lasers estão sendo usados para soldagem: o de CO₂ e o de Nd: YAG (“Neodymium – Yttrium Aluminum Garnet”) [1]; cada tipo de laser possui algumas características próprias. O laser de CO₂ começou com uma certa vantagem em relação ao Nd:YAG por se conseguir do mesmo, potências elevadas, porém com as melhorias nos processos atuais essa diferença praticamente não têm influenciado muito nos processos de junção, pois cada laser tem suas características, e potências muito altas nem sempre nos leva a melhor solução. Kawamura (2007).

Conseguiram-se potencias de feixes que chegam a 5 kW para Nd:YAG, e lasers de CO₂ com potencias iguais ou maiores que 15 kW, e uma velocidade de soldagem de mais de 65 mm/s para ambos. Segundo Hoffmann & Geiger (1995) o laser de Nd:YAG possui vantagem na soldagem de chapas finas porque conseguimos uma melhor flexibilização de movimentos em sua aplicação devido ao uso de fibras ópticas, e também pelo seu custo mais barato em relação ao laser de CO₂. A aplicação em solda Nd:YAG para chapas finas pode ser confirmada por Barnes & Pashby (2000, citado por Kawamura, 2007), onde os autores afirmam que esse tipo de laser consegue uma profundidade de penetração que varia de 2 a 6 mm, e o laser de CO₂ consegue uma profundidade de penetração por volta de 15 mm, dependendo da potência adotada.

Na tabela 2 abaixo pode-se realizar a comparação dos laser para processos de soldagem.

Tabela 2 - Comparação dos lasers para soldagem.(continua)

Comparação dos lasers para soldagem

Tipos de Lasers	CO₂ (gás)	Nd: YAG (estado sólido)	Diodo (estado sólido)	Laser a fibra (estado sólido)
Comp. de onda (μm)	10,6	1,06	0,8 – 1,0	1,07
Faixa de Potência (potência máx.)	0,5 – 25 kW (60 kW)	100 W a 1kW (8kW)	1 mW – 500 W (6 kW)	0,5 W – 4kW (17 kW)
Eficiência	10%	3%	30%	17%
Proteção gasosa	Necessária	Opcional	Opcional	Opcional
Transmissão do feixe	Sistema óptico	Fibra óptica	Fibra óptica/sistema óptico	Fibra óptica
Flexibilidade	Baixa	Média	Alta	Alta
Dimens. Mín. Spot (mm)	0,2	0,1	0,5	0,05
Investimento inicial	100W: R\$150k 1000W:R\$500k	100W: R\$230k 1000W:R\$600k	100W: R\$120k 1000W:R\$600k	100W: R\$45k 1000W:R\$600k
Custo de manutenção (R\$/h.)	100W: 4 1000W:30	100W: 1 1000W:25	100W: 0,5 1000W:10	100W: 0* 1000W:0* *10.000h

Interação com plásticos	Completa absorção até 0,5mm	Transmissão e aquecimento em 0,1 – 10 mm	Transmissão e aquecimento em 0,1 – 10mm	Transmissão e aquecimento em 0,1 – 10mm
--------------------------------	-----------------------------	--	---	---

Fonte: Milton S.F. Lima Instituto Tecnológico de Aeronáutica, citado por Muneakata, 2011. (conclusão)

2.2.4 Vantagens e desvantagens da soldagem a laser

O laser já é usado pela indústria a muito tempo, sendo assim os trabalhos que existem a respeito dessa tecnologia já possuem dados aprofundados e difundidos no mundo. Podemos notar que diversos autores possuem a mesma opinião das vantagens e desvantagens do laser, Barnes & Pashby (2000, citado por Kavamura, 2007).

2.2.4.1 Vantagens da solda laser

- O processo produz distorções pequenas nas peças soldadas, devido a energia relativamente baixa e concentrada usada nesse tipo de soldagem.
- Cordões de solda estreitos (aproximadamente 1,2 a 1,5 mm).
- ZTA pequena.
- Possibilita altas velocidades de soldagem.
- Resulta em geral na formação de soldas de alta qualidade.
- Solda visivelmente mais agradável aos olhos do cliente, o que favorece a qualidade percebida no veículo.
- Alta resistência mecânica.
- Flexibilidade e versatilidade para a automação do processo através de robôs.
- Menor investimento no caso de modificações no produto. Muitas vezes apenas a reprogramação dos robôs já engloba toda a modificação necessária.
- Não necessita de acesso do equipamento pelos dois lados da área de contato para ser feito a soldagem. Por causa disso a solda laser possibilita construções que antes eram impossíveis com os processos de

soldagem convencionais.

2.2.4.2 Desvantagens da solda laser

- Requer um nível de automação alto como robôs e dispositivos, pois não existe a possibilidade de usar um processo manual devido ao nível de periculosidade do laser.
- Limitação de profundidade de penetração do cordão de solda.
- Requer uma tolerância dimensional acurada entre peças, cerca de 10% das espessuras a serem soldadas. Na indústria, usa-se um valor de 0,3 mm de variação máxima da área de contato a ser soldado.
- O nível de equipamentos e aparatos para proteção contra acidentes é altíssimo, proporcionalmente ao alto risco de acidentes. Os operadores não devem ter acesso à cabine de soldagem enquanto o equipamento está em funcionamento.
- O retrabalho no caso de falhas na soldagem é complexo e caro em relação a outros processos de junção.
- Devido aos fatores mostrados anteriormente os investimentos necessários são altíssimos se compararmos com outros processos, de soldagem convencional.
- Requer um volume de produção relativamente alto para amortizar o investimento, salvo a exceção de veículos de alto valor agregado, onde o custo final do produto compensa o baixo volume produzido.

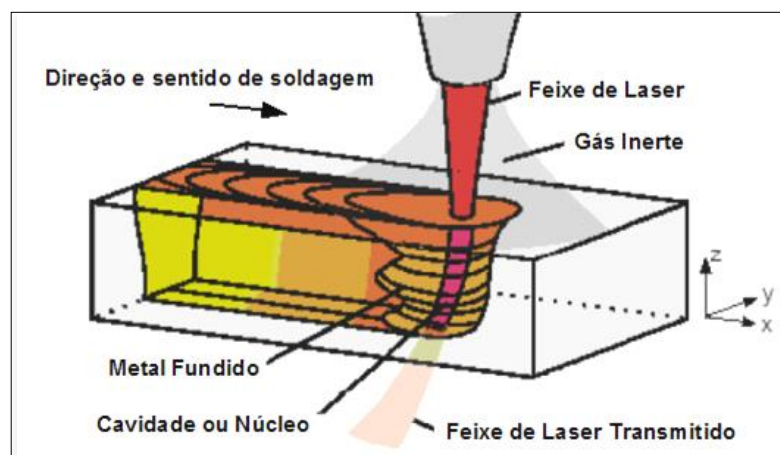
2.2.4.3 Cordão de solda laser

Quando o feixe de laser toca a superfície de metal, a energia concentrada aquece rapidamente a área atingida, fundindo e vaporizando metal (Kavamura, 2007). Segundo Loredó & Martin & Andrzejewski & Grevey (2002, citado por Kavamura, 2007), a pressão resultante acaba perfurando a superfície formando uma cavidade ou núcleo, cheio de vapor superaquecido em seu interior e cercado de material fundido.

As variações de temperaturas em áreas pequenas e concentradas provocam a formação de um cordão estreito e delgado com uma ZTA pequena. A brevidade desse processo associado à velocidades de resfriamento muito elevadas, resulta em uma região soldada com características mecânicas, como dureza e resistência à tensão, próximas aos metais base antes da soldagem.(KAVUMURA, 2007, p 11)

Para evitar problemas com a qualidade do cordão de solda, como mostra a figura 6, é recomendado usar um gás inerte para proteger a zona de fusão, podendo ser o gás hélio, argônio ou nitrogênio.

Figura 6 - Formação do cordão de SL.



Fonte: Ribolla, Damoulis e Batalha (2004, citado por KAVUMURA, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O metal base utilizado neste estudo foi composto por chapas de aço inoxidável austenítico AISI 316L com 1,0 mm de espessura. A composição química do metal base é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do aço AISI 316L (% peso).

Elementos	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Mo
AISI 316 L	0,030	17,28	13,00	0,80	0,75	0,045	0,003	2,3

Fonte: Elaboração da própria autora

As soldagens foram realizadas no *Laboratório de Soldagem Laser*, do Departamento de Engenharia Mecânica da FEIS UNESP, utilizando um sistema laser, de estado sólido Nd: YAG, modelo UW 150A, da United Winners, na condição pulsado, cujo arranjo experimental e detalhes são mostrados na Figura 7.

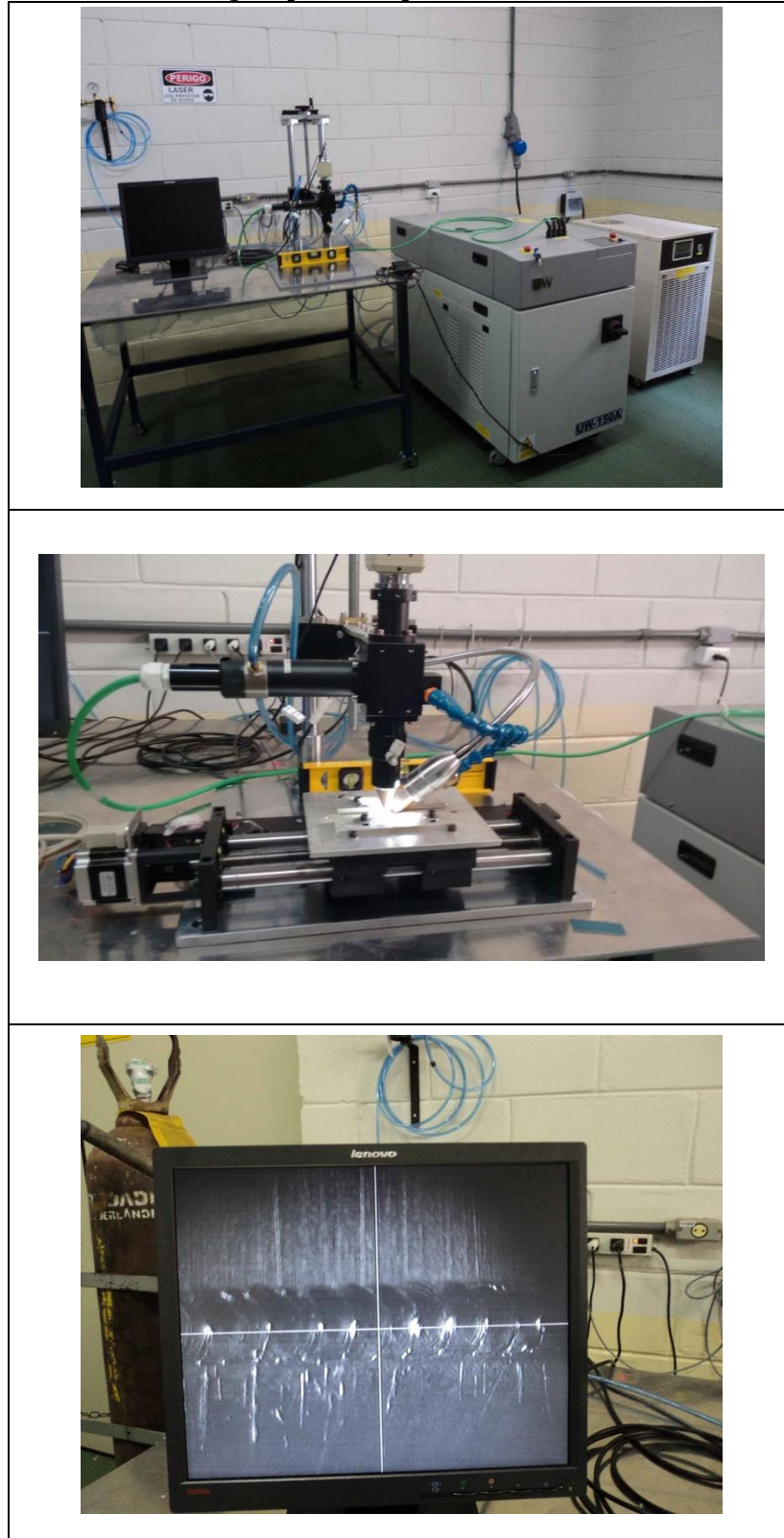
A Tabela 4 apresenta as principais características da Fonte Laser Nd:YAG pulsada, modelo UW 150A, da United Winners.

Tabela 4 - Características da Fonte Laser Nd:YAG pulsada, modelo UW 150A, United.

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

Fonte: United Winners (2010)

Figura 7 - Sistema de soldagem por laser pulsado de Nd: YAG, modelo UW 150A.



Fonte: Elaboração da própria autora.

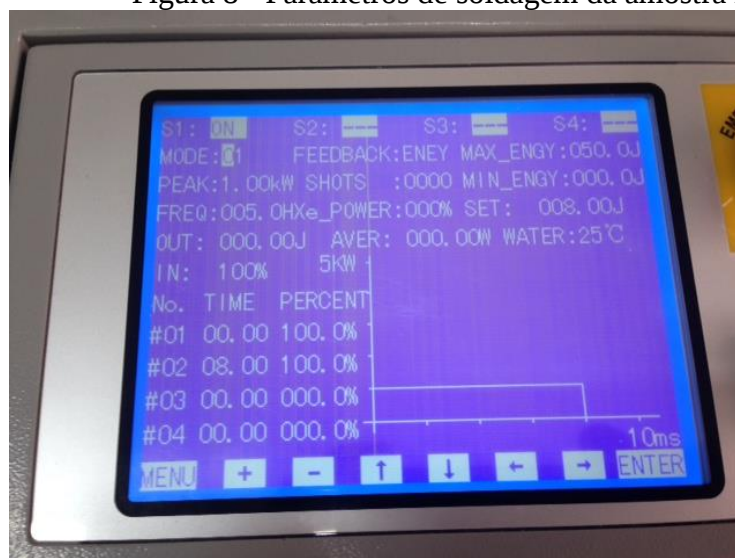
Para avaliar a influência do aporte térmico, as chapas foram posicionadas em junta de topo, sem abertura de raiz. Elas foram soldadas com feixe de diâmetro de 0,2 mm e ângulo de 90°. A energia do pulso (E_p) foi mantida fixa em 8J, potencia de pico de 1 kW, largura temporal (t_p) de 8 ms, velocidade de soldagem (v) 1 mm/s e frequência variável. Dessa maneira, obtiveram-se amostras com taxa de sobreposição de 50, 60, 70, 80, e 90 %. Os parâmetros de soldagem laser utilizados no presente trabalho estão descritos na Tabela 5 e mostrado na Figura 8.

Tabela 5 – Parâmetros de soldagem laser Nd:YAG pulsada.

Amostra	Potência de Pico [kW]	Largura temporal [ms]	Energia do Pulso [J]	Velocidade Soldagem [mm/s]	Taxa de sobreposição [%]	Frequencia [Hz]	Aporte Térmico [kJ/mm]
L50	1	8	8	1,0	50	2	0,16
L60	1	8	8	1,0	60	2,5	0,20
L70	1	8	8	1,0	70	3,3	0,26
L80	1	8	8	1,0	80	5	0,40
L90	1	8	8	1,0	90	10	0,80

Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 8 - Parâmetros de soldagem da amostra L80.



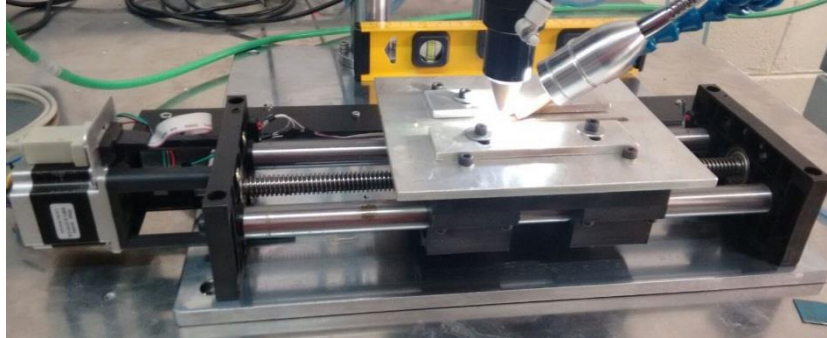
Fonte: Oliveira (2016)

Os resultados experimentais foram analisados com base na relação entre aporte térmico, geometria do cordão de solda, presença de discontinuidades, microestrutura e

propriedades mecânicas. As amostras foram preparadas e limpas para garantir a mesma condição superficial das chapas e um acabamento homogêneo.

As amostras foram mantidas fixas através de um dispositivo (Figura 9) o qual proporcionou o contato da junta. Antes da soldagem as chapas foram totalmente limpas com acetona para retirar toda impureza que poderia estar impregnada nas mesmas.

Figura 9 - Dispositivo de fixação da junta para a soldagem laser.



Fonte: Elaboração da própria autora

As amostras foram soldadas em uma atmosfera de gás argônio utilizando-se um fluxo de 20 l/min. Não foi utilizada proteção de argônio na raiz da solda. Posteriormente, foi realizada uma preparação metalográfica da secção transversal do cordão de solda, através de corte, lixamento e polimento das amostras.

As imagens macrográficas utilizadas para a verificação da geometria do cordão de solda e presença de discontinuidades foram feitas em um estereomicroscópio da marca ZEISS, modelo DISCOVERY V.8, acoplado a uma câmera AXIOCAM ERC5S, pertencente ao Laboratório de Microscopia Ótica da FEIS/UNESP. Ver Figura 10.

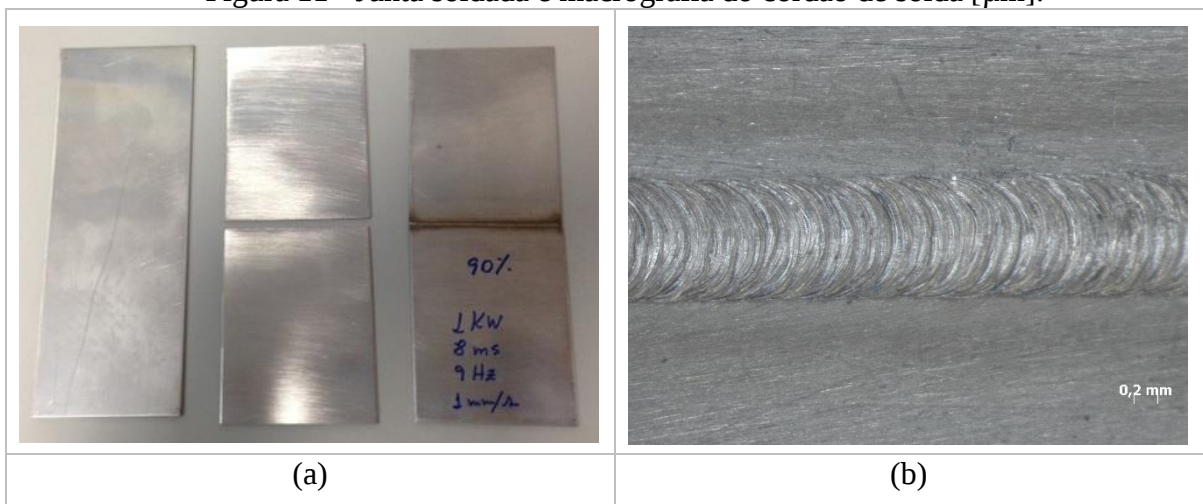
Figura 10 - Estereomicroscópio ZEISS, modelo DISCOVERY V.8.



Fonte: Elaboração da própria autora

A Figura 11a mostra uma junta soldada de topo, onde as faces do chanfro foram retificadas para garantir um contato perfeito, isto é, abertura de raiz zero. A Figura 11b mostra uma macrografia da secção transversal da junta soldada.

Figura 11 - Junta soldada e macrografia do cordão de solda [μm].



Fonte: Elaboração da própria autora

Para facilitar a observação macro e microscópica e a aplicação do ensaio de dureza, os materiais foram embutidos em baquelite (fenol-formaldeído) com cura a quente em moldes plásticos com 25 mm de diâmetro.

Iniciou-se o lixamento, começando com lixa grana 320, passando por lixas grana 400,600,1200,1500 e terminando com a 2000. Utilizou-se de uma politriz marca *Struers* modelo DP-10. Posteriormente foi realizado o polimento com alumina 1 μ m e 0,5 μ m. O ataque eletrolítico foi realizado com ácido oxálico 10% (10 g de ácido oxálico + 90 ml H₂O) com imersão do corpo de prova por 20 segundos com tensão de 6 Vcc. Após o ataque aplicou-se banhos ultrassônico para promover a total remoção de resíduos químicos deixados sobre a superfície atacada.

Terminada a fase de caracterização macrográfica, os CDP'S foram novamente lixados, agora iniciando com a lixa grana 600, passando pelas 1200, 1500 e finalizando 2000. Após o lixamento foi realizado o polimento com alumina 1 μ m e 0,5 μ m, e posteriormente o ataque químico com Ácido oxálico 10%, e também foi feito testes com ácido nítrico 50% (10 ml H₂O + 10ml HNO₃).

Terminado o ataque, a caracterização microestrutural das amostras foi feita recorrendo-se a um microscópio óptico (MO) da marca Carl Zeiss, modelo Neophot 21 (Figura 12a) pertencente ao Laboratório de Microscopia Ótica da FEIS/UNESP e um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Zeiss, modelo EVO LS15 (Figura 12b).

Figura 12 - a) Microscópio óptico, marca: ZEISS, modelo Neophot 21; b) Microscópio Eletrônico de Varredura, marca: Zeiss, modelo Evo LS15.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração da própria autora

As propriedades mecânicas das juntas soldadas foram avaliadas através de ensaios de microdureza Vickers (HV0,01) e ensaios de tração. As medidas de microdureza foram realizadas na secção transversal da junta soldada, numa direção paralela à superfície da chapa. Foram realizadas medidas no centro do cordão e próximo a superfície do mesmo. Foi

correlacionada a microdureza com possíveis efeitos de heterogeneidades microestruturais, tanto no metal base quanto no metal de solda. Utilizou-se um ultramicrodurômetro digital da marca Shimadzu, modelo DUH 211S, apresentado na Figura 13. Para realizar a indentação, foi empregada uma carga de 0,01kgf. Durante este procedimento foi respeitado tanto a distância mínima entre indentações adjacentes quanto o tempo de carregamento, com a finalidade de minimizar erros na realização das medidas.

Figura 13 - Ultramicrodurômetro digital Shimadzu, modelo DUH 211S.



Fonte: Elaboração da própria autora

Foram realizados ensaios de tração empregando-se uma Máquina Universal de Ensaio, EMIC Modelo: DL30.000, eletromecânica, micro processada, Capacidade: 30.000 kgf (300 kN); Para realização de tal ensaio, o método utilizado foi à norma ASTM E8/E8M – 16a, em condição ambiente de temperatura de 25° C, do Laboratório de Ensaio Mecânicos, IFSP de Votuporanga – SP. Ver Figura 14.

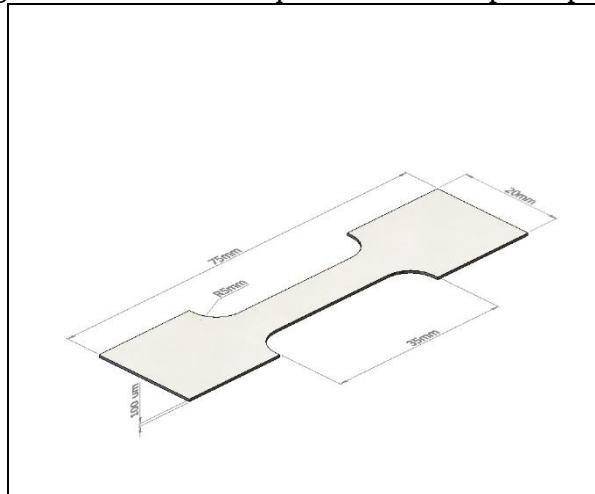
Figura 14 - Máquina Universal de Ensaio, EMIC modelo: DL30.000.



Fonte: Elaboração da própria autora

A Figura 15 mostra um desenho esquemático e corpos de prova da junta soldada, preparados para ensaio de tração.

Figura 15 – Desenho esquemático do corpo de prova.



Fonte: Elaboração da própria autora

A fim de garantir precisão e uma área de corte livre de alteração microestrutural, utilizou-se na preparação dos corpos de prova para o ensaio de tração um equipamento de eletroerosão a fio Eletrocut NOVICK, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Equipamento de eletroerosão a fio Eletrocut NOVICK.



Fonte: Elaboração da própria autora

Neste tópico é mostrado as informações do sistema linear da mesa e do microcontrolador que foi utilizado para automatizar a máquina de soldagem a laser Nd: YAG modelo UW 150A do *Laboratório de Soldagem Laser*, do Departamento de Engenharia Mecânica da FEIS UNESP, a Tabela 6 apresenta as principais características do sistema linear da mesa.

Tabela 6 - Descrição do kit sistema mesa linear.

Descrição do kit
Mesa Linear com curso de 200mm
Capacidade de 1Kg de carga.
Eixo em aço retificado 20mm
Pillow Block com rolamentos lineares de 20mm fechado
Fuso Trapezoidal 14mm passo 3mm
Castanha de Poliacetal em Mancal injetado de nylon com fibra vidro reforçada

Fonte: Elaboração da própria autora.

A Figura 17 ilustra a mesa linear com acoplamento elástico termoplástico utilizada para movimentação da peça para a soldagem a laser pulsado Nd: YAG.

Figura 17 - Sistema linear.



Fonte: Adaptado de Tekkno Mecatrônica (2015).

O componente utilizado para empurrar a mesa guia é um motor de passo da marca NEMA 23 com carga máxima de 10Kgf. A fonte utilizada para alimentação do sistema automatizado é do tipo chaveada com 12 V/ 2.1 A, a Tabela 7 traz os dados técnicos do motor de passo.

Tabela 7 - Dados técnicos motor de passo.

Motor de passo	Modelo NEMA 23
Peso :	3 Kg
Altura :	20 Cm
Largura :	20 Cm
Comprimento :	20 Cm

Fonte: Adaptado de Tekkno Mecatrônica (2015).

A Figura 18a ilustra a fonte chaveada, e a figura 18b o motor de passo, utilizados no sistema automatizado.

Figura 18 - Fonte chaveada e motor de passo.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Tekkno Mecatrônica (2015).

Para a movimentação e controle do motor de passo foi utilizado um driver bipolar com oscilador interno de acordo com a Figura 19.

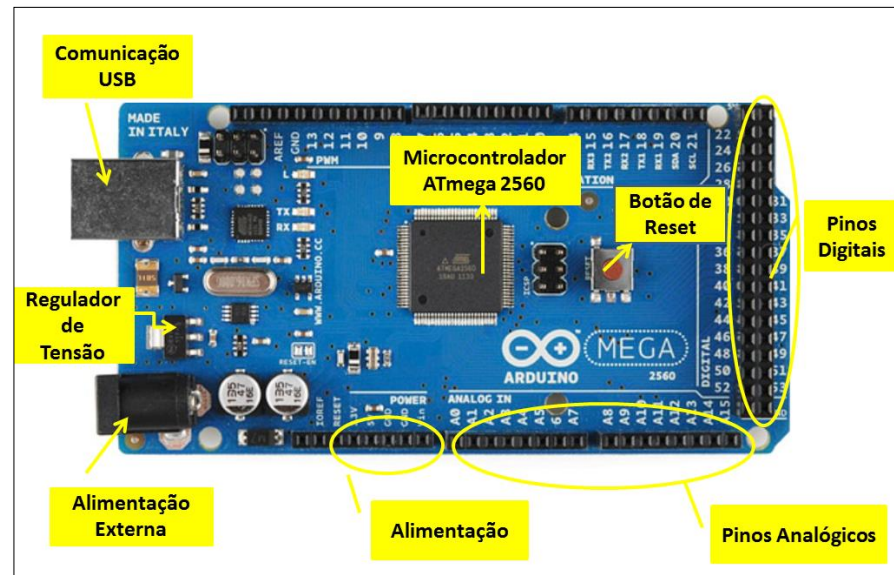
Figura 19 - Driver do motor de passo.



Fonte: Adaptado de Tekkno Mecatrônica (2015).

Neste projeto foi utilizado um microcontrolador da família Arduino, modelo Atmega 2560 de acordo com a Figura 20, é uma plataforma composta por hardware e software livre com linguagem de programação baseada em C ++, todos os comandos executados pelo dispositivo sejam de iniciar o movimento linear ou parar o motor quando chega no fim de curso, é recebido pelo arduino que processa a informação e manda um sinal de comando para drive, seja para ligar o motor ou desliga-lo.

Figura 20 - Arduino Mega.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A Tabela 8 trata do custo dos materiais para implementação do cursor automático para o sistema a laser.

Tabela 8 - Tabela de custo.

Tabela de custo sistema automatizado mesa linear		
Componentes	Quantidade	Valor R\$
Kit (mesa guia, motor, drive, fonte de alimentação)	1	1300.00
Arduino	1	100.00
Fim de cruso	2	10.00
cabos	50 cm	3.00
Caixa	1	25.00
Display 2 x 8	1	20.00
Total		1460.00

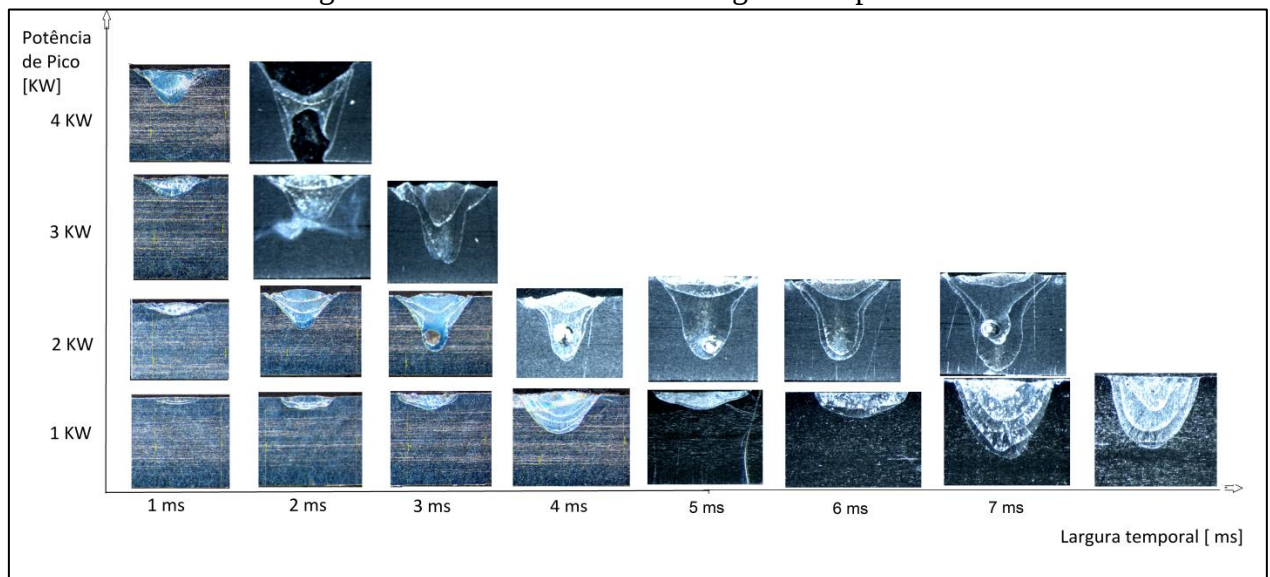
Fonte: Elaborado pela própria autora.

4 RESULTADOS

4.1 GEOMETRIA DOS CORDÕES DE SOLDA

A Figura 21 trás as imagens dos cordões de solda utilizados como parâmetro para definição dos padrões adotados.

Figura 21 - Potencia de Pico x Largura Temporal.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Perante as condições de soldagens determinadas pela variação da potencia de pico e largura temporal, a propensão entre elas é quanto maior a largura temporal e potencia de pico maior será o aumento de penetração do cordão de solda.

Tabela 9 - Medidas de profundidade.

Cordão	Profundidade [mm]
1 kW - 1 ms	0,07
1 kW - 2 ms	0,14
1 kW - 3 ms	0,17
1 kW - 4 ms	0,43
2 kW - 1 ms	0,12
2 kW - 2 ms	0,46
2 kW - 3 ms	0,71
2 kW - 4 ms	*
3 kW - 1 ms	0,22
3 kW - 2 ms	*
3 kW - 3 ms	*
3 kW - 4 ms	*
4 kW - 1 ms	0,39
4 kW - 2 ms	*
4 kW - 3 ms	*
4 kW - 4 ms	*

Fonte: Elaboração da própria autora.

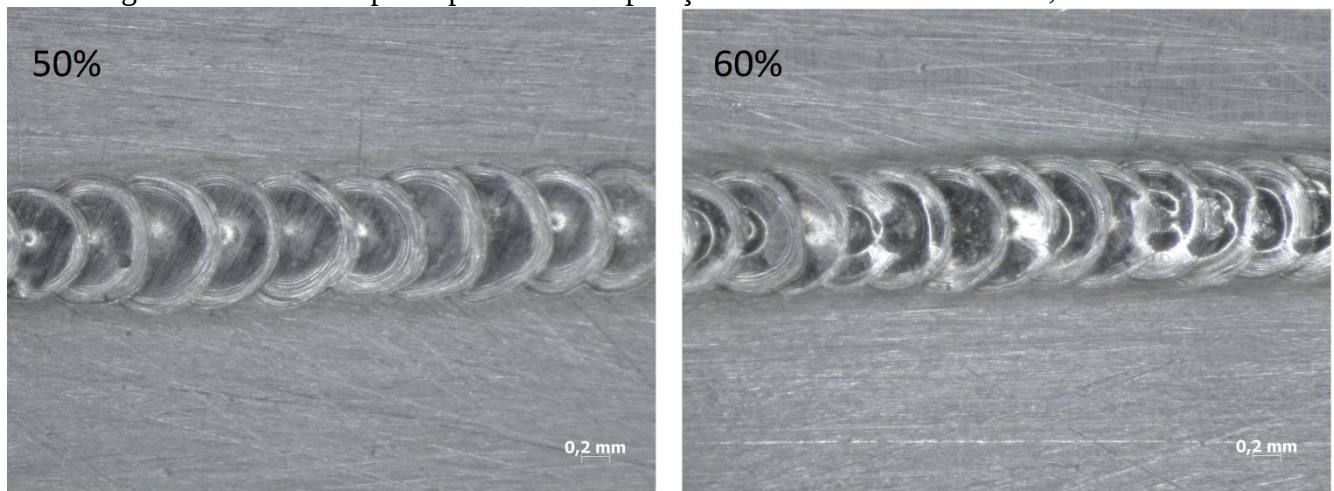
A Tabela 9 trata dos valores de das profundidades do cordão de solda, os valores de potencia de pico e largura temporal que tem como profundidade um asterisco significa que não foi possível realizar a medição de profundidade, pois a solda atravessou a chapa de 1 mm. Há aumento de dispersão entre os parâmetros quando se tem aumento de potencia de pico condicionada ao aumento de largura temporal.

Após a execução dos parâmetros foi determinado que os utilizados seriam largura temporal em 8 ms e potencia de pico de 1 KW, apresentou superfície regular e profundidade maior que 50% da espessura da chapa, permitindo assim a soldagem dos dois lados.

4.2 MICROSCOPIA OTICA

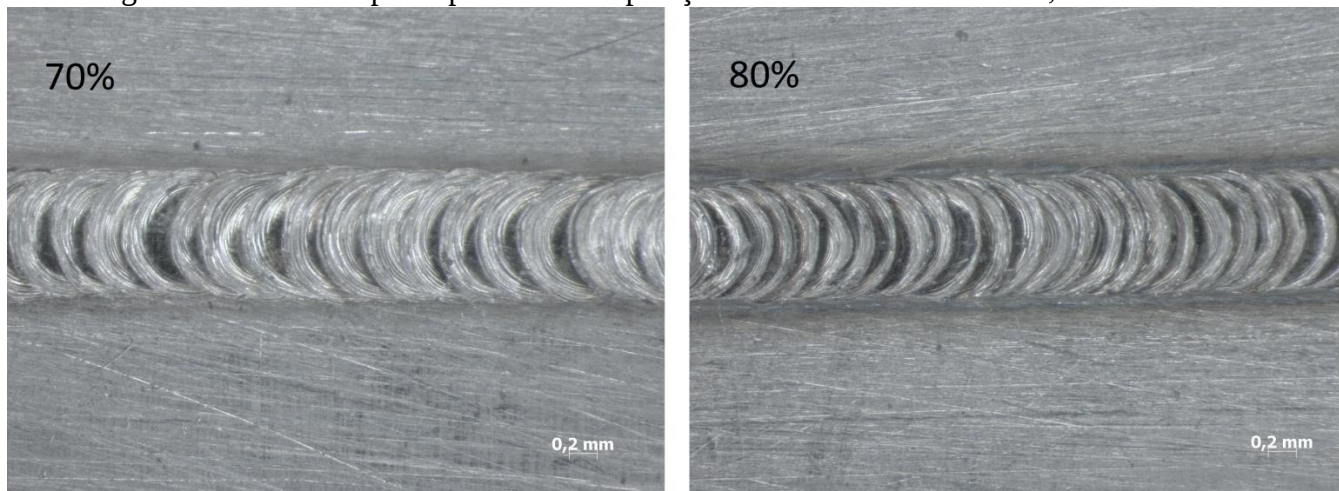
As faces das chapas foram retificadas para garantir melhor contato da solda, utilizando a potencia de pico e largura temporal afixadas respectivamente em 1 KW e 8 ms podem ser observadas superfícies homogêneas e sem respingo, de acordo com as Figuras 22, 23 e 24, que mostra a sobreposição dos cordões de acordo com o que foi proposto em materiais e métodos.

Figura 22 - Macroscópica óptica da sobreposição do cordão de solda: 50%, 60%.



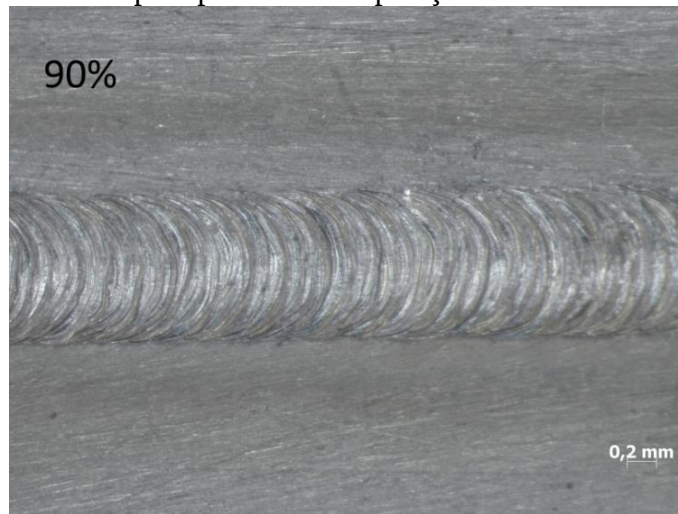
Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 23 - Macroscópica óptica da sobreposição do cordão de solda: 70%, 80%.



Fonte: Elaboração da própria autora.

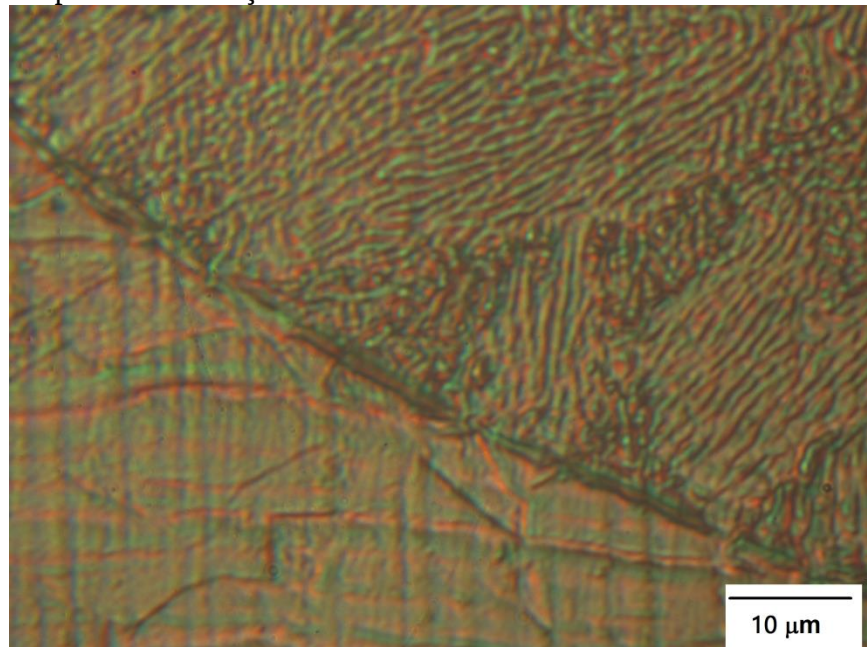
Figura 24- Macroscopia óptica da sobreposição de 90% do cordão de solda.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A seguir, são observadas as microestruturas da zona de fusão obtidas em condições diversas de soldagem de acordo com a Figura 25. Não são observadas crescimento do grão perto da região de transição entre a solda e metal base (Figura 26), na região da solda são observadas a formação de uma região celular dendrítica.

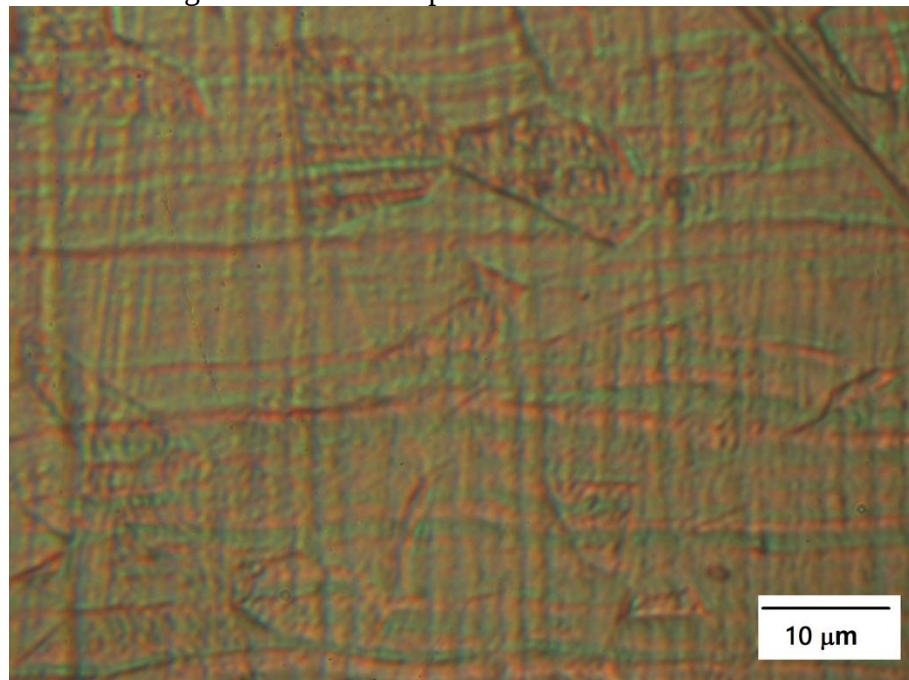
Figura 25- Microscopia ótica transição metal base e metal de solda com 50% de sobreposição.



Fonte: Elaboração da própria autora.

As imagens das Figuras 25 e 26 foram tiradas do microscópio ótico modelo Neofhot.

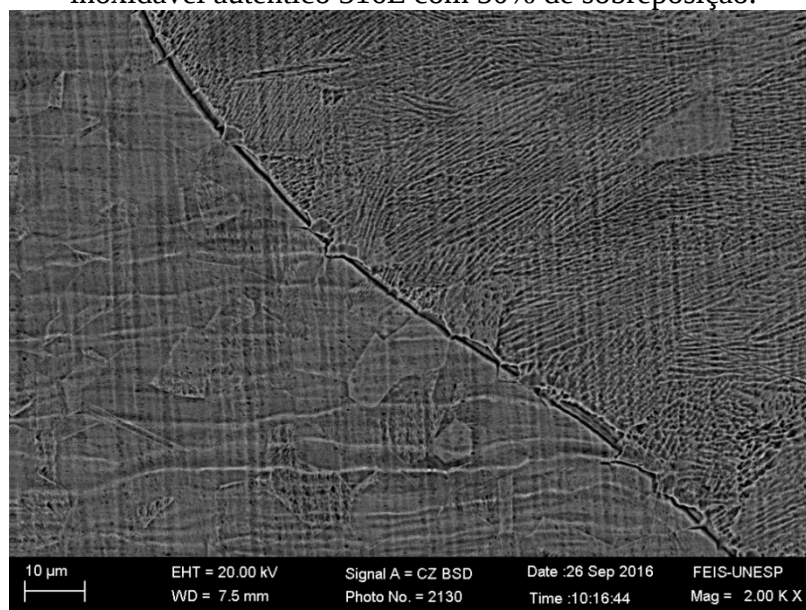
Figura 26 - Microscopia ótica metal base.



Fonte: Elaboração da própria autora.

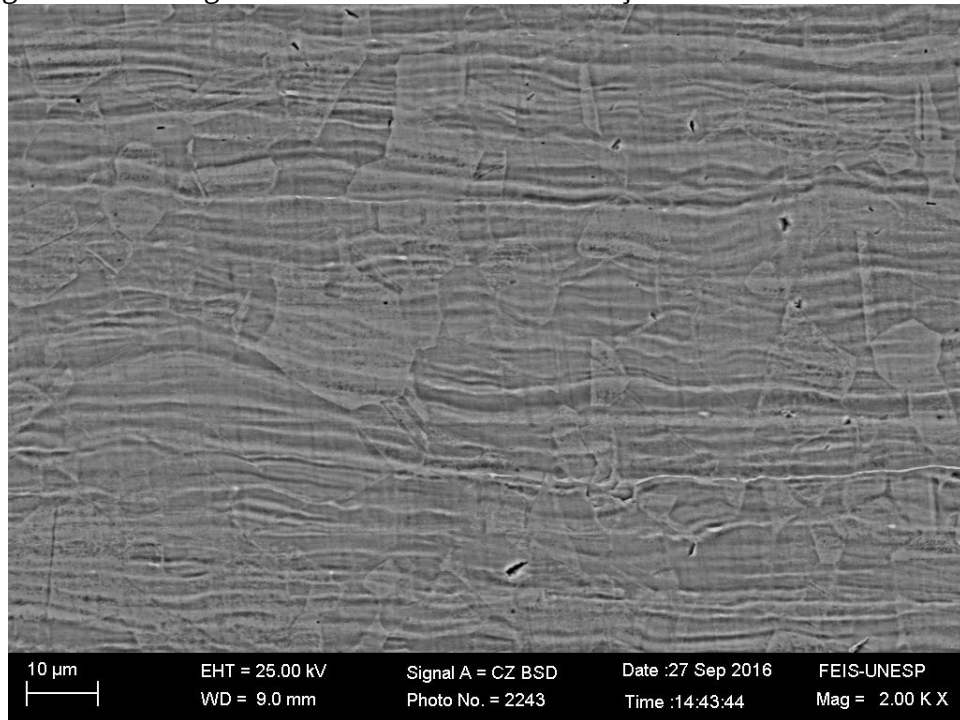
As imagens da Figuras 27 e 28 foram tiradas no Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e evidenciam a transição do metal base e metal de solda, sendo esta transição uma região pequena e a Figura 27 mostra a imagem do metal base com o mesmo aumento da Figura 28, aparentemente não houve crescimento do grão na região de transição.

Figura 27- Micrografia eletrônica da transição entre a zona fundida solda e metal base do aço inoxidável autentico 316L com 50% de sobreposição.



Fonte: Elaboração da própria autora.

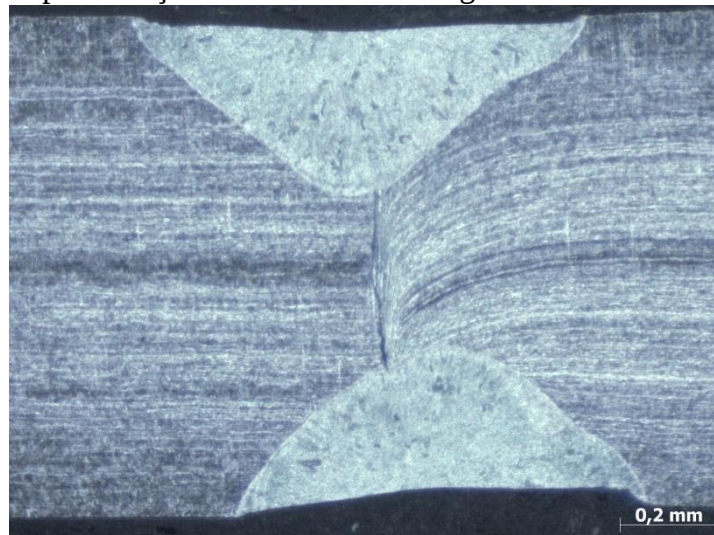
Figura 28 - Micrografia eletrônica do metal base aço inoxidável autentico 316L.



Fonte: Elaboração da própria autora.

As Figuras 29, 30, 31, 32 e 33 mostram as imagens macrográficas tiradas com o estereomicroscópio ZEISS modelo DISCOVERY V.8; foram tiradas da seção transversal das amostras embutidas após a preparação metalógrafa.

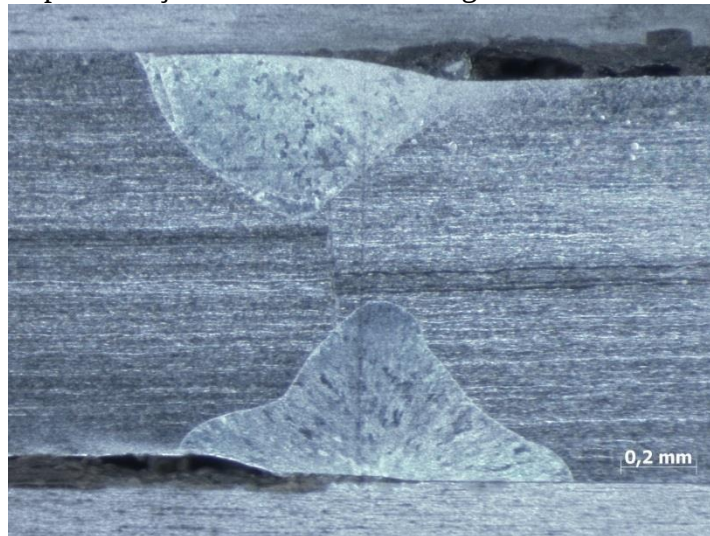
Figura 29- Macroscopia da seção transversal da soldagem com 50% de sobreposição.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Nas Figuras 29 e 30 observa – se a falta de penetração no cordão de solda devido a taxa de sobreposição.

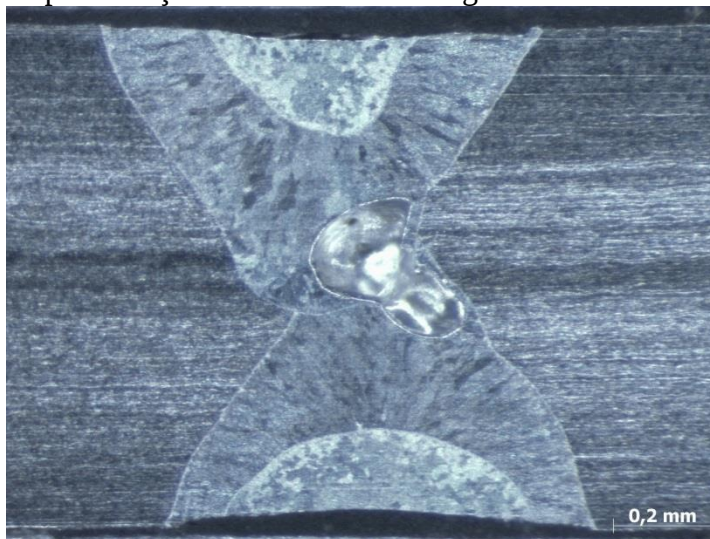
Figura 30 - Macroscopia da seção transversal da soldagem com 60% de sobreposição.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Já a Figura 31 aparece com total penetração da chapa, porem com um grande vazio.

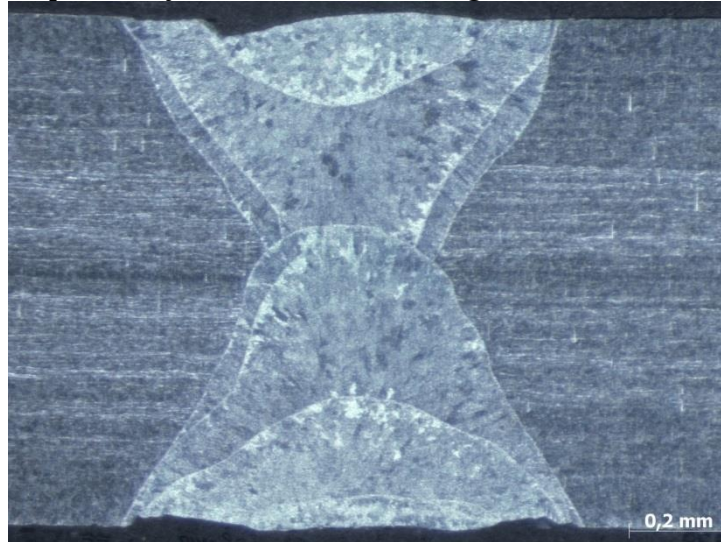
Figura 31 - Macroscopia da seção transversal da soldagem com 70% de sobreposição.



Fonte: Elaboração da própria autora.

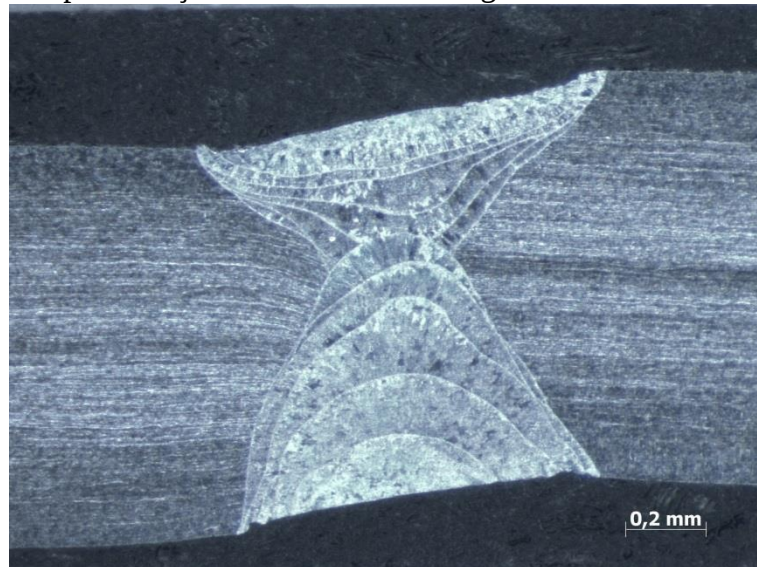
As Figuras 32 e 33 apresentam total penetração na chapa.

Figura 32 - Macroscopia da seção transversal da soldagem com 80% de sobreposição.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 33- Macroscopia da seção transversal da soldagem com 80% de sobreposição.

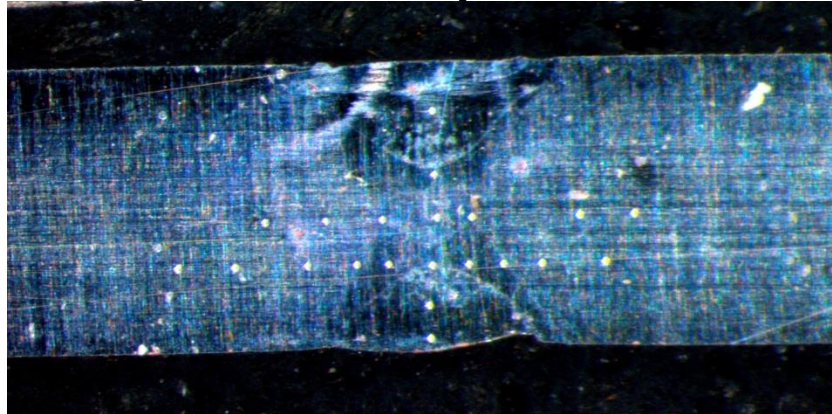


Fonte: Elaboração da própria autora.

4.3 MICRODUREZA

A Figura 34 apresenta a imagem da amostra utilizada na medição de microdureza Vickers do metal base e da zona fundida do aço inoxidável austenítico 316L obtidos para cada impressão após a análise. Foram feitas medidas a partir de 1 μm de distancia entre si, totalizando 20 penetrações do microindentador a partir da linha central, com 10 medidas para cada lado.

Figura 34 – Amostra usada para ensaio de dureza.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Os gráficos a seguir (Figura 35), mostram a microdureza Vickers relacionada aos pontos de medição para cada uma das duas regiões analisadas, sendo uma mais próxima a superfície da chapa e outra mais ao centro, para cada sobreposição analisada. Para critérios de análise o ensaio foi realizado com carga de 1 kgf. As microdurezas aferidas e representadas do lado esquerdo ao centro do cordão de solda, foram replicadas nos gráficos ao lado direito.

Figura 35 - Gráficos de Microdureza das Juntas Laser 316L com 50%, 60%, 70%, 80% e 90% de sobreposição.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A partir da análise do ponto central tem-se que seu valor médio foi inferior ao dos retirados ao se afastar do mesmo em torno de 20% com a soldagem nas sobreposições estudadas.

Na Tabela 10 mostra o resultado da média do ensaio de microdureza, onde ZF compreende a zona fundida, ZTA é a zona termicamente afetada e a zona do metal de base é MB. A transição entre o metal base e zona fundida é muito pequena, sendo assim a ZTA foi medida em cima da transição.

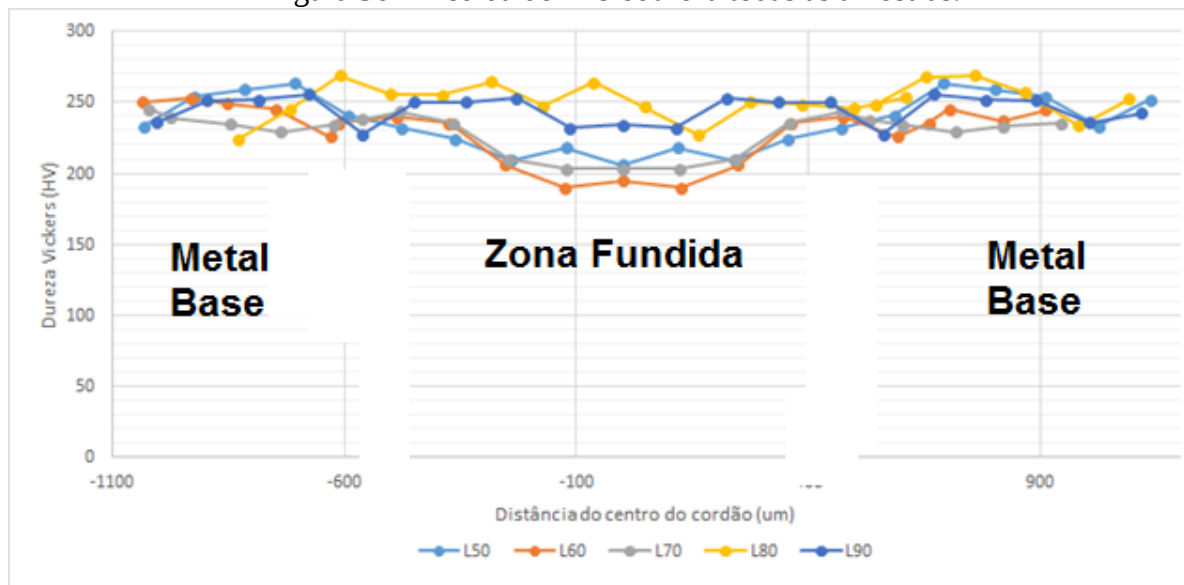
Tabela 10 - Resultado de Dureza.

	L50	L60	L70	L80	L90
MB	249±2	237±2	236±5	246±3	246±3
ZTA	249±4	244±2	244±5	249±6	247±4
ZF	212±5	195±9	206±3	247±8	241±11

Fonte: Elaboração da própria autora.

A Figura 36 mostra a média da medida de microdureza para as amostras em todas as condições. As condições onde ocorrem as maiores sobreposição como 80 e 90% possuem maior dureza na região da zona fundida e quanto menor a porcentagem das sobreposições, menor é a dureza nesta região. Analisando a zona termicamente afetada pode-se notar que nessa região a dureza é maior do que na zona fundida em todas as sobreposições estudadas no processo.

Figura 36 - Medida de microdureza todas as amostras.



Fonte: Elaboração da própria autora.

4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Através das condições de soldagem determinadas para os corpos de prova (CP's), foi feito ensaio de tração em todos os corpos de prova, em que a média dos Limites de Escoamento e Limites de Ruptura obtidos para as condições propostas, é visto em comparação com valores de uma condição sem nenhum tipo de modificação, na Tabela 11.

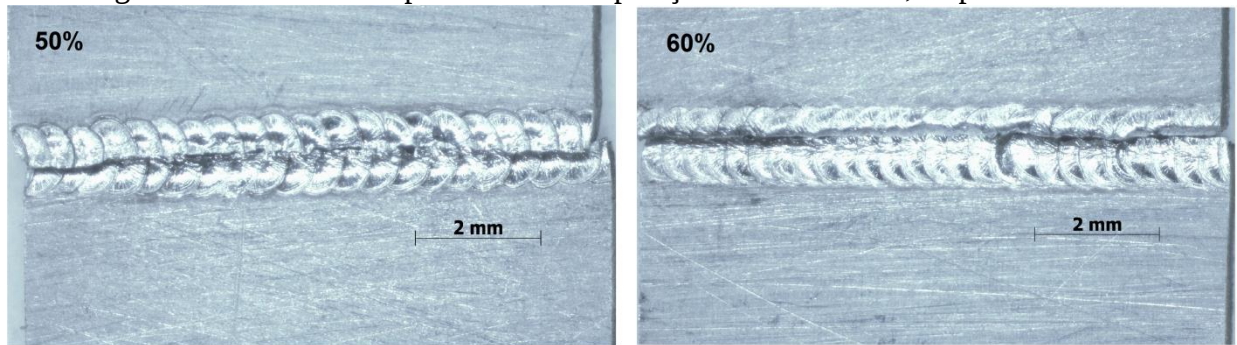
Tabela 11 - Resultado ensaio de tração.

	Sem Solda	L50	L60	L70	L80	L90
Limite de Escoamento (MPa)	419	349	347	438	434	434
Limite de Resistência (MPa)	699	582	579	730	724	724

Fonte: Elaboração da própria autora.

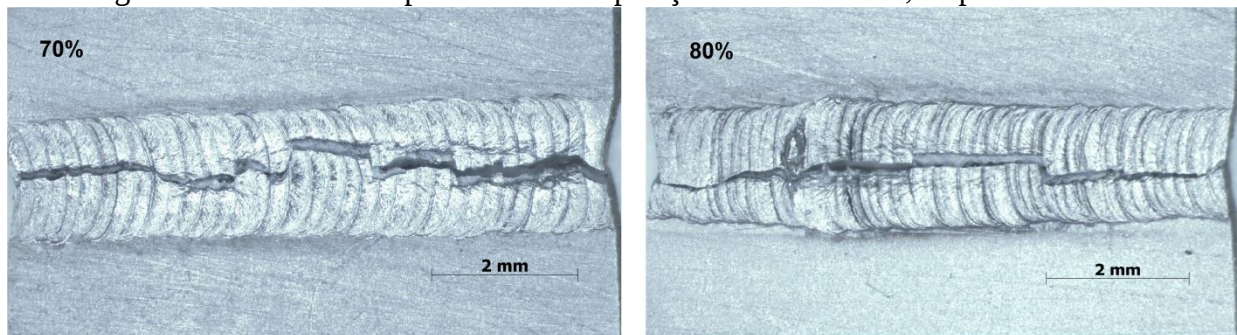
Os CP's de sobreposição 50% e 60% estão com valores de limite de escoamento e limite de ruptura abaixo da ruptura do metal base, o que explica a condição do rompimento na zona fundida. Já as condições dos CP's de 70, 80 e 90% apresentaram valores acima do limite de ruptura e escoamento do metal base, mas mesmo assim romperam-se na zona fundida, com o pode ser observado nas Figuras 37,38 e 39, por esse motivo foi feito a fractografia dos CP's.

Figura 37 - Cordões rompidos com sobreposição de 50% e 60%, respectivamente.



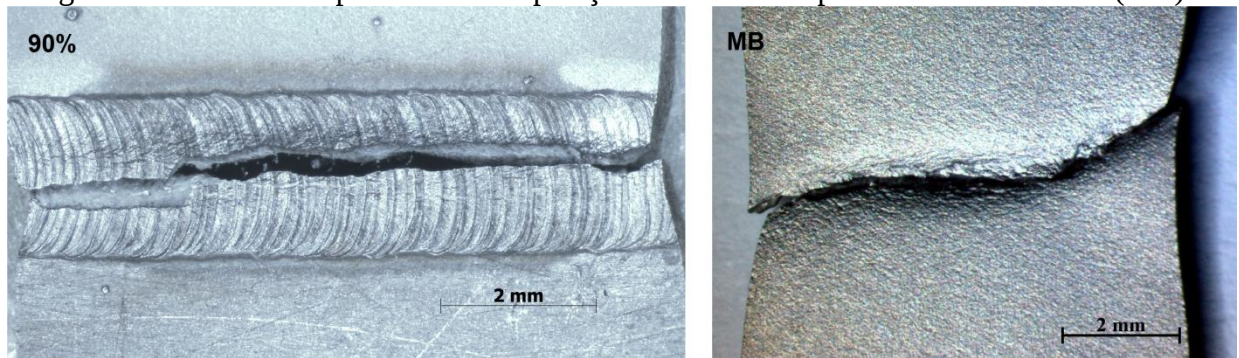
Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 38 - Cordões rompidos com sobreposição de 70% e 80%, respectivamente.



Fonte: Elaboração da própria autora.

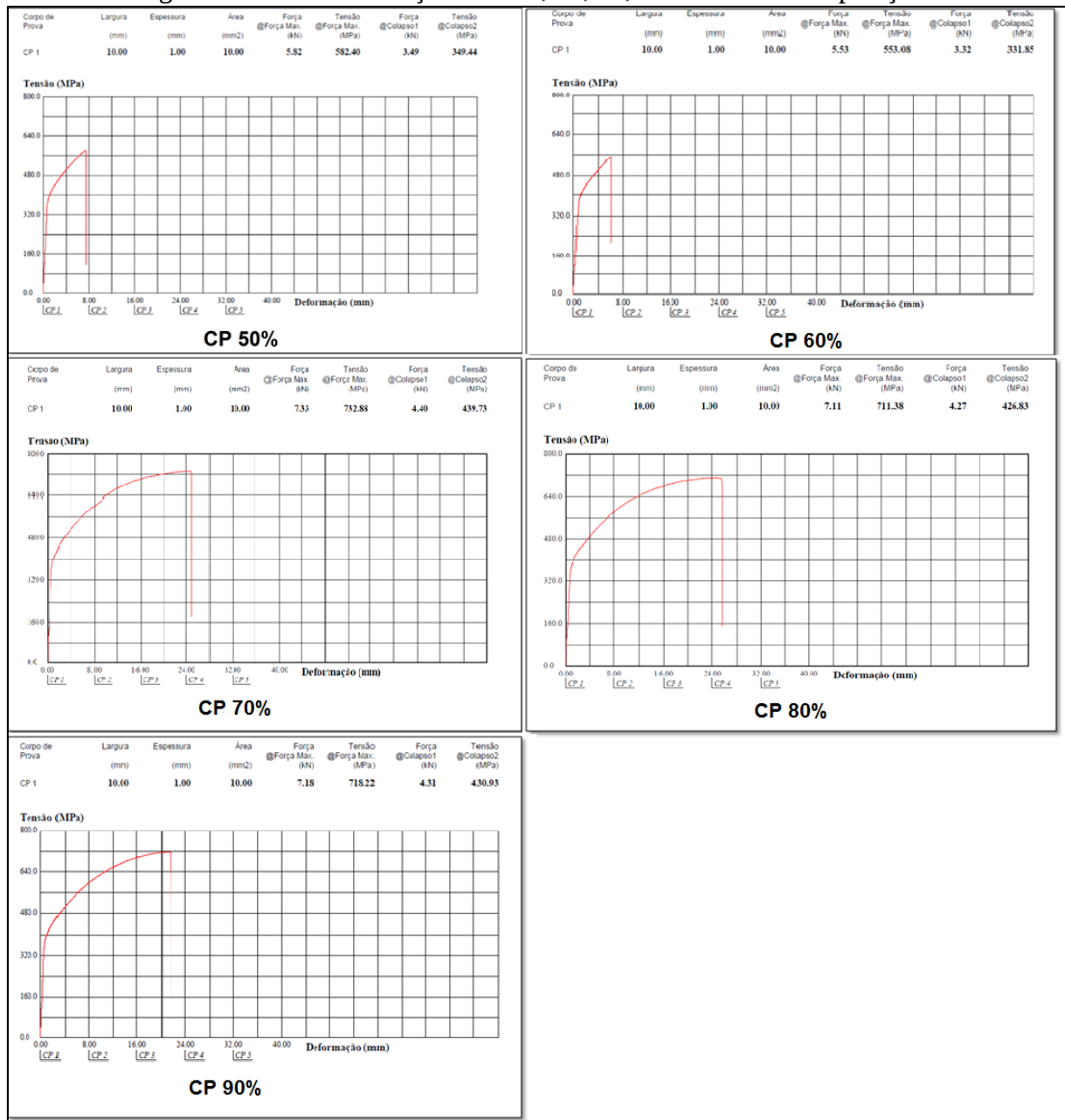
Figura 39 - Cordão rompido com sobreposição de 90% e rompimento do metal base (MB).



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 40 é apresentado os gráficos de tensão (MPa) x deformação (mm) do ensaio de tração para as sobreposições da solda a laser.

Figura 40 - Ensaio de tração com 50, 60, 70,80 e 90% de sobreposição.



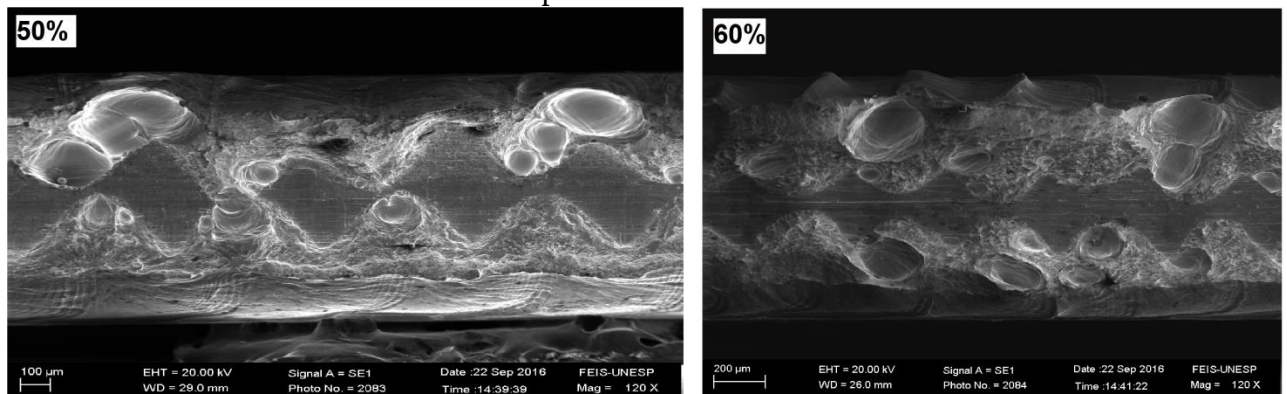
Fonte: Elaboração da própria autora.

As sobreposições de menor porcentagem, com 50% e 60% apresentaram valores de tensão de ruptura em torno de 350 MPa, sendo menores do que as de 70%, 80% e 90% de sobreposição com 430 MPa. A deformação é apresentada de forma crescente, assim, quanto maior a taxa de sobreposição maior foi a deformação obtida no ensaio, chegando próximo a 24 mm com 90% de sobreposição.

4.5 FRACTOGRAFIA

A Figura 41 que apresenta a fractografia dos CP's com sobreposição de 50% e 60% aparentemente apresentam trinca sem desvios, como pode ser observado também pela Figura 42. Também não apresentam total penetração dos cordões de solda, o que é um fator que diminui resistência mecânica do corpo de prova.

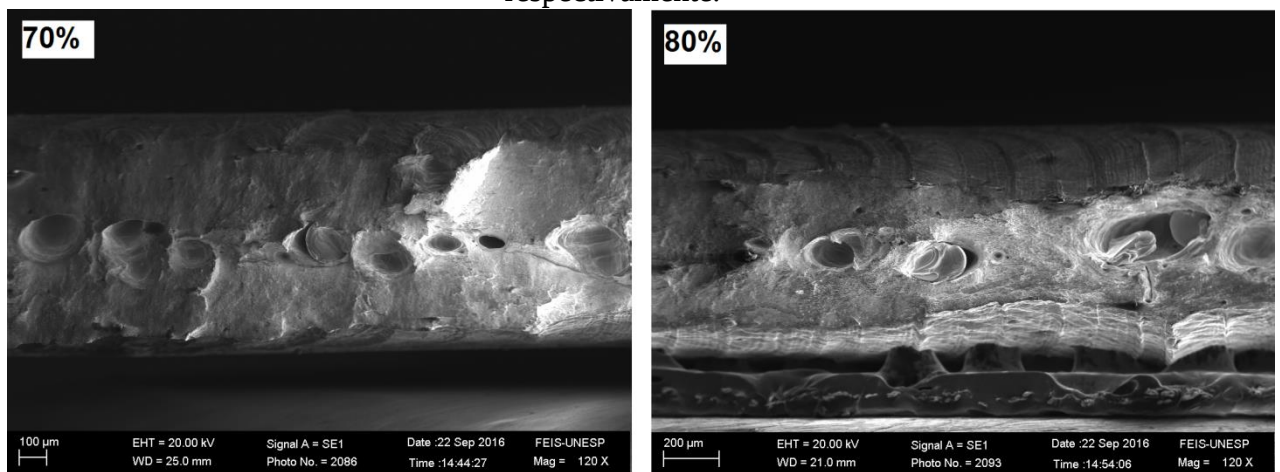
Figura 41 - Fractografias com aumento de 120x com 50 % e 60% de sobreposição, respectivamente.



Fonte: Elaboração da própria autora.

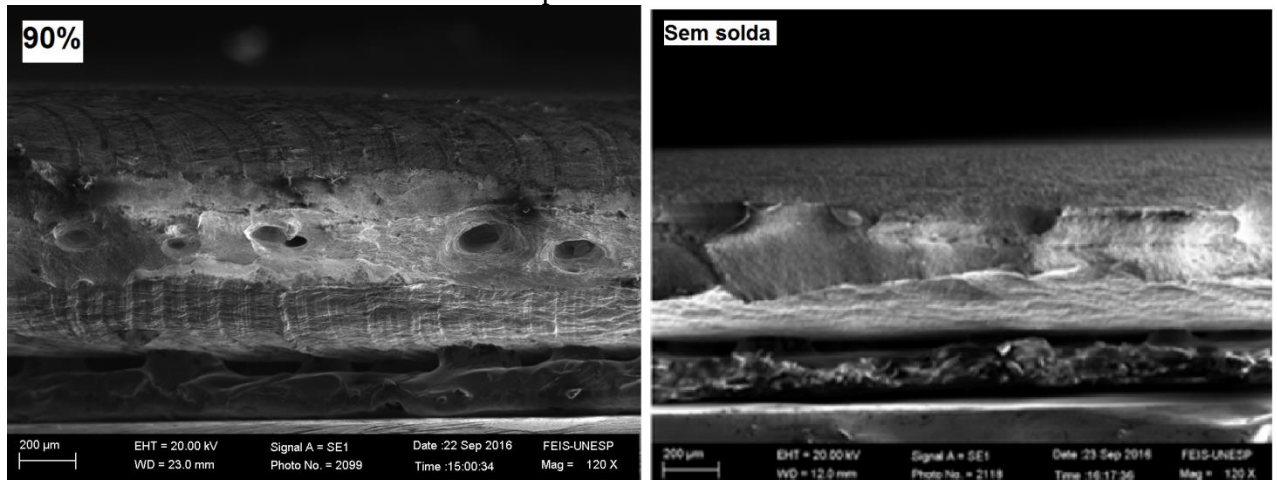
Já os CP's com 70%, 80% e 90% possuem aparentemente trinca irregular conforme pode ser observado pela fractografia (Figura 42 e 43) e também pela imagem do rompimento do cordão (Figura 37 e 48). Não demonstram falta de penetração, porém apresentação de porosidades.

Figura 42 - Fractografias com aumento de 120x com 70 % e 80% de sobreposição, respectivamente.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 43 - Fractografias com aumento de 120x com 90% de sobreposição e Metal base, respectivamente.



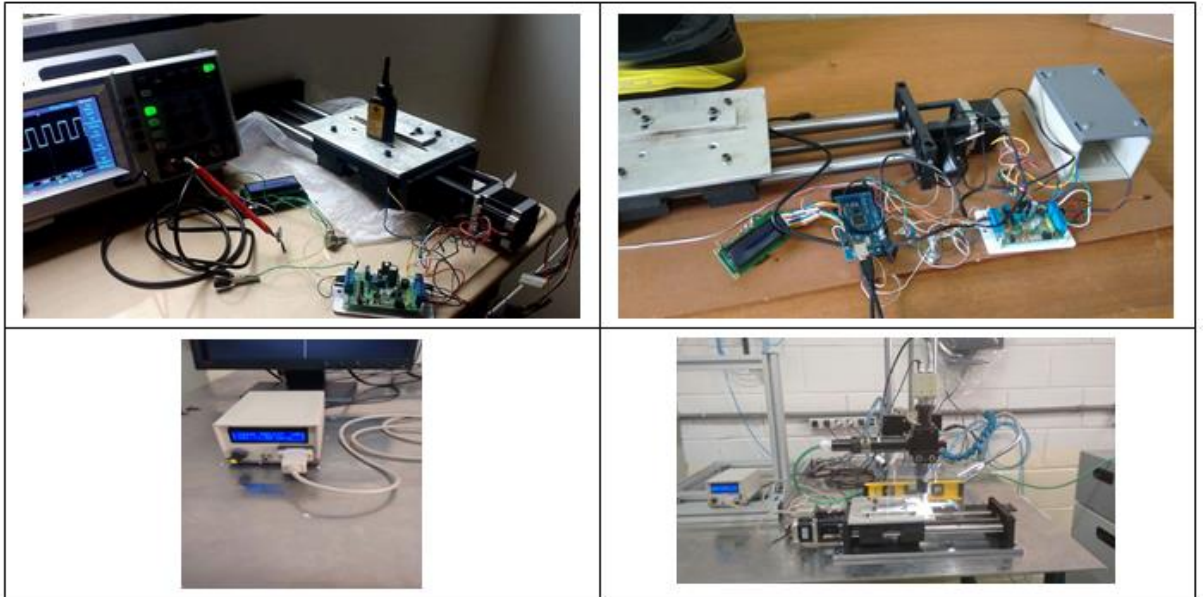
Fonte: Elaboração da própria autora.

O que pode explicar também o rompimento nos cordões são as fractografias dos cp's, onde evidenciaram porosidades que surgiram devido ao processo de soldagem, quando o cp's estava sendo ensaiados é provável que essas microcavidades se agruparam ficando ainda maiores durante o tracionamento, fazendo com que os mesmos fossem rompidos na solda. As porosidades podem ter surgido devido ao algo no processo que não foi possível ser controlado, como impurezas.

4.6 AUTOMAÇÃO DA MESA GUIA

A mesa guia foi automatizada com a opção de mudar a velocidade de rotação do motor, perante a mesa essa velocidade linear v_{pode} variar de 0,1 á 8 mm/s. A direção do movimento também pode ser alterada através do acionamento do fim de curso do fim de curso, e o motor sofre parada quando chega no fim de curso. A figura 44 mostra as fases do processo de automatização.

Figura 44 - Montagem do sistema.



Fonte: Elaboração da própria autora.

5 CONCLUSÃO

Ao analisar a microestrutura das juntas soldadas observa-se que a zona termicamente afetada é muito pequena, isso é uma característica do processo de soldagem a laser, e visualmente não foi obtido em nenhuma das amostras crescimento do grão nessa mesma região.

Ao analisar a microdureza Vickers pode-se verificar que quanto maior a porcentagem de sobreposição maior será a dureza na zona fundida e na zona termicamente afetada, sendo que a primeira apresenta um valor maior que a segunda. Esse aumento na dureza pode ser de grande utilidade para equipamentos que necessitam de uma resistência maior ao desgaste superficial, porém é uma desvantagem para aplicações em que o material deve apresentar alta ductilidade.

A resistência à tração é uma propriedade bastante importante para os projetos de equipamentos nos processos de fabricação e na sua utilização. As amostras acima de 70% apresentaram limites de ruptura, escoamento e alongamento maiores do que a do metal base, demonstrando assim um aumento na resistência.

Todos os corpos romperam-se no cordão de solda, isso pode ser explicado pela presença de entalhes nos cordões das imagens macrográficas da seção transversal, os corpos de 50 e 60 % de sobreposição houve falta de penetração, obtendo-se no ensaio de tração limites de ruptura menores que o corpo de prova sem solda. Os corpos de prova de 70, 80 e 90 %, apresentam algum tipo de entalhe, evidenciando assim que o processo de soldagem não foi perfeito, devido ao desalinhamento das chapas e má fixação.

Em virtude dos fatos mencionados, conclui-se que diminuir a sobreposição dos cordões provoca falta de fusão, ocasionando menor resistência mecânica; Quanto maior a sobreposição, maior a zona de refusão na zona fundida, aumentando assim a dureza. Mesmo com sobreposições maiores, é preciso ter maior controle sobre o processo para que não haja impurezas, desalinhamentos, por exemplo, por que faz com que a resistência mecânica na região da solda seja boa, porém frature no cordão de solda. Também é de suma importância que se faça estudos com a soldagem a laser, por ser uma tecnologia mais recente quando comparado com processos de soldagens convencionais, para que seja possível determinar alguns parâmetros do processo específico para cada material, cada processo e utilização;

REFERÊNCIAS

BERRETTA, J. R. **Solda laser em materiais dissimilares com laser de Nd:YAG pulsado**. 2005. 120 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

BERRETTA, J. R.; ROSSI, W.; NEVES, M. D. M.; ALMEIDA, I. A.; JUNIOR, N. D. V. Pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 45, p. 960-966, 2007.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. Propriedades mecânicas dos metais. In: _____. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, c2002.

COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4. ed. ver. e atual. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.

CRESPO, G. da S. **Influencia da potencia laser Nd: YAG na soldagem do aço inoxidável duplex UNS S32205**. Ilha Solteira: [s.n], 2014.

DULEY, E. E. **Laser welding**. Nova York: A Wiley-Interscience Publication, 1998.

EINSTEIN, A. **Frases de Albert Einstein**. [S. l.]: Pensador, 2016. Disponível em: <<https://pensador.uol.com.br/frase/MTQxMjEzMg/>>. Acesso em: 01 nov. 2016.

KAVAMURA, H. A. **Aplicação de solda laser em carrocerias automotivas: estudo comparativo entre a solda laser e a solda ponto por resistência**. São Paulo: [s. n.], 2007.

MARQUES, P.V. Proteção de turbinas hidráulicas contra o desgaste cavitacional. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 47-59, 2003.

MARQUEZE, C. M.; QUITES, A. M. **Descontinuidades em soldas**. Florianópolis, 1995.

MAWAKDIYE, A. A. Resposta dos metais. **Revista Metalurgia & Materiais**, São Paulo, v. 546, n. 553, p. 360, 2004.

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

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. Osasco: SENAI, 2001. 100 p.

MUNEKATA, R. M. **Soldagem em laminas finas de hastelloy c-276 por laser pulsado Nd:YAG**. Ilha Solteira: [s.n.], 2011.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços Inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades**. São Paulo: Hemus, 1994.

RIBOLLA, A.; DAMOULIS, G. L.; BATALHA, G. F. The use of Nd:YAG laser weld for large scale volume assembly of automotive body in white, COMMENT'2005 – AMPT2005 – gliwice-wisla, Polônia. **Journal of Material Processing Technology**, Lausanne, v. 164-165, p. 1120-1127.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL DO ESTADO DE SÃO PAULO- SENAI. **Soldagem**. São Paulo: SENAI, 1994. (Coleção Tecnologia).

SOUZA, C. S. **Avaliação da resistência à corrosão localizada do aço inoxidável lean duplex UNS S32204 soldado pelos processos SMAW, GMAW e FCAW**. 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

TANIGUCHI, C.; OKUMURA, T. **Engenharia e soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. Disponível em: <<http://www.tccmonografiaseartigos.com.br/dedicatoria-tcc-monografia-trabalho>>. Acesso em : 01 jan. 2017.

TEKKNO MECATRÔNICA. Site. Bauru, 2016. Disponível em: <<https://www.tekkno.com.br/>>. Acesso em : 01 jan. 2016.

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA- Unisanta. **Processo de solda laser**. Santos: [s. n., 2000?]. Disponível em: <<http://cursos.unisanta.br/mecanica/polari/soldalaser.pdf>>. Acesso em: 2 maio 2016.

VENTRELLA, V. A.; BERRETTA, J. R.; ROSSI, W. Pulsed Nd:YAG laser seam welding of AISI 316L stainless steel thin foils. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 2010, n. 14, p. 1838-1843, 2010.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. Soldagem: processos e metalurgia. São Paulo: Blucher, 1992.

ZEEMANN, A. Energia de soldagem. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, p. 14-15, 1998.

APÊNDICE A – Programação do arduino

Programação:

*The circuit:

- * LCD RS pin to digital pin 11 - 1 DADOS, 0 COMANDO
- * LCD R/W pin to digital pin 10 - 0 ESCRITA
- * LCD Enable pin to digital pin 9
- * LCD D4 pin to digital pin 5
- * LCD D5 pin to digital pin 4
- * LCD D6 pin to digital pin 3
- * LCD D7 pin to digital pin 2
- * LCD VSS pin to ground
- * LCD VCC pin to 5V

- * Potentiometer attached to analog input 0
- * center pin of the potentiometer to the analog pin
- * one side pin (either one) to ground
- * the other side pin to +5V
- * LED anode (long leg) attached to digital output 13
- * LED cathode (short leg) attached to ground
- */

```
#include <LiquidCrystal.h> // inclui a biblioteca do LCD no código.
#include <TimerOne.h>      digitalWrite(13, sinal);
```

```
LiquidCrystal lcd(11, 10, 9, 5, 4, 3, 2); // inicializa a biblioteca com os numeros dos pinos
// 11-RS, 10-WR, 9-E, 5-D4,4-D5, 3-D6, 2-D7
```

```
char motor=0;
int sensorValue=0, fcm, fco, dir;
long valor, tempo;
float media=0, vel=0;
```

```
void setup() {
  pinMode(13, OUTPUT); // inicializa o pino 13 como saída, pino onde o LED da placa esta
  ligado
  pinMode(50, INPUT); // inicializa o pino 50 como saída. Direção
  pinMode(52, INPUT); // inicializa o pino 52 como entrada. FC motor
  pinMode(53, INPUT); // inicializa o pino 53 como entrada. FC oposto
```

```
  lcd.begin(16, 2); // seta o numero de colunas e linhas do LCD utilizado
```

```
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("valor A0: ");
```

```
  lcd.setCursor(0, 1); // coloca o cursor na coluna 0, linha 1
  lcd.print("Vel.: mm/s"); // imprime uma msg no LCD
```

```
  Timer1.initialize(1000000);
```

```

    Timer1.attachInterrupt(chama);
}

void loop() {
    for(int i=0; i<100; i++)
    { sensorValue = (analogRead(A0)); // lê o valor do potenciômetro na entrada A0:
      media=media+sensorValue; }

    valor=(media+1)/100;
    tempo=1000000/(2*valor);
    media=0;

    vel = (valor*8.04)/1024;      // Interpolação: calculo da velocidade.

    lcd.setCursor(9, 0);
    lcd.print(valor);             // imprime valor da conversao no display
    lcd.print(" ");

    lcd.setCursor(5, 1);
    lcd.print(vel);               // imprime valor da velocidade no display

    fcm = digitalRead(52);
    fco = digitalRead(53);
    dir = digitalRead(50);

    if (fcm==1 && dir==1)
    { Timer1.stop();
      lcd.setCursor(14, 0);
      lcd.print("DM");}           // desliga o timer caso fim de curso do motor estiver
acionado

    if (fcm==1 && dir==0)
    { Timer1.initialize(tempo);
      lcd.setCursor(14, 0);
      lcd.print("LM");}

    if (fco==1 && dir==0)
    { Timer1.stop();
      lcd.setCursor(14, 0);
      lcd.print("DO");}           // desliga o timer caso fim de curso oposto estiver acionado

    if (fco==1 && dir==1)
    { Timer1.initialize(tempo);
      lcd.setCursor(14, 0);
      lcd.print("LO");}

} // fim do void loop()

void chama()
{

```

```
digitalWrite(13, digitalRead(13) ^ 1);  
Timer1.initialize(tempo);  
}
```