

CENTRO UNIVERSITÁRIO RITTER DOS REIS ĂNIMA EDUCAÇÃO EVERTON LUIS DA SILVA

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NO PROCESSO DE SOLDA A LASER DE SABRES DE MOTOSSERRAS

> Canoas 2023

EVERTON LUIS DA SILVA

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NO PROCESSO DE SOLDA A LASER DE SABRES DE MOTOSSERRAS

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Universitário Uniritter, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Sérgio Luiz Telles, Dr.

Canoas 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela trajetória a qual ele me conduziu, aos meus pais, por sempre priorizarem os valores, à minha esposa Licéia por ter me apoiado e incentivado nos momentos em que mais precisei, aos meus filhos Otávio e Caroline pela compreensão e estímulo, à STIHL Ferramentas Motorizadas, representada pelos Engenheiros Alexandre Bahia de Almeida e Jardel Dias Costa, por disponibilizar os recursos e equipamentos necessários para realização deste trabalho, aos profissionais e colegas Lucas Alisson Rodrigues e Paulo José Kohler, pelo apoio técnico e à UniRitter, representada pelo professor Dr. Sérgio Luiz Telles Bartex, pela orientação segura e precisa.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estudo da influência dos parâmetros de soldagem a LASER no resultado da profundidade do cordão de solda, profundidade do rebaixo da solda (*Undercut*) e dureza do cordão de solda da junta soldada entre o aço 50CrMo4 e o Stellite 6, do corpo de sabre e suas respectivas ferraduras, de motosserras STIHL, visando assim, identificar os parâmetros que ofereçam melhor performance da soldagem. Utilizando uma simples matriz de testes, com três variáveis independentes (distância focal, potência do LASER e velocidade de soldagem), foram realizados os cordões de solda. Para esse processo foi atingido valores de profundidade de cordão de solda entre 1,72 e 3,08 mm, profundidade do rebaixo da solda entre 0,21 e 1,52 mm e dureza do cordão de solda entre 286 e 647 HV3. Utilizando o método de correlação de Pearson, foi possível definir a velocidade de solda, profundidade do rebaixo da solda entre a variável de maior influência sobre a profundidade do cordão de solda, profundidade do cordão de solda e dureza do cordão de solda.

Palavras-chave: Soldagem a LASER. Stellite. 50CrMo4.

ABSTRACT

This work aims to study the influence of LASER welding parameters on the result of weld bead depth, weld undercut depth and weld bead hardness of the welded joint between the 50CrMo4 steel and the Stellite 6, of the guide bar body and its respective horseshoes, of STIHL chainsaws, thus aiming to identify the parameters that offer better welding performance. Using a simple matrix of tests, with three independent variables (focal length, LASER power and welding speed), the weld beads were produced. For this process, weld bead depth values between 1.72 and 3.08 mm, weld undercut depth between 0.21 and 1.52 mm, and weld bead hardness between 286 and 647 HV3 were achieved. Using Pearson's correlation method, it was possible to define the welding speed as the variable with the greatest influence on the depth of the weld bead, weld undercut depth and weld bead hardness.

Keywords: LASER welding. Stellite. 50CrMo4.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Variação de energia potencial para um sistema composto de dois átomos em função da distância de separação entre eles.

Figura 2.2 - Soldagem por pressão ou deformação.

Figura 2.3 - A) representação esquemática da soldagem por fusão; e B) macrografia de uma junta.

Figura 2.4 - Densidade de potência para as típicas fontes de calor de soldagem e a geometria dos cordões de solda de cada tipo Figura 2.5 – Característica do modo do feixe LASER.

Figura 2.5 - Característica do modo do feixe LASER.

Figura 2.6 - Corte transversal de uma junta soldada.

Figura 2.7 - Falta de penetração em uma junta soldada.

Figura 2.8 - Trinca na junta soldada.

Figura 2.9 - Inclusões em cordão de solda

Figura 3.1 - Imagem aérea da fábrica da STIHL Brasil.

Figura 3.2 - Esboço resumido de uma motosserra.

Figura 3.3 - Sabre obtido a partir do processo de corte à LASER.

Figura 3.4 - Ferradura obtida através do processo de corte à LASER e posteriormente conformada mecanicamente até o perfil final.

Figura 3.5 - União do corpo do sabre e das ferraduras através da soldagem à LASER.

Figura 3.6 - Sabre perda parcial da ferradura por ruptura da costura de solda.

Figura 3.7 - Esboço de um corte transversal de um rebaixo na costura de solda.

Figura 3.8 - A) Máquina de soldagem à LASER LAS005, B) Robô FANUC M20i e LASER de fibra YLS-3000C).

Figura 3.9 - Cabeçote de solda IPG P30-002416-003.

Figura 3.10 - Fluxograma do experimento.

Figura 3.11 - A) Equipamento para leitura do rebaixo da solda, B) Sensor de medição 2D LJ-7000 e C) Programa construído no Labview.

Figura 3.12 - Esboço do gráfico leitura da temperatura da raiz da costura.

Figura 3.13 - Imagem de uma secção removida da região da solda.

Figura 3.14 - Imagem do durômetro modelo Q10A.

Figura 4.1 - Corpos de prova do experimento.

Figura 4.2 - Posição de medição dos pirômetros LASER.

Figura 4.3 - Posição de medição na raiz da costura da solda.

Figura 4.4 - Representação gráfica da medição de temperatura da costura de solda.

Figura 4.5 - Resultados da medição de temperatura da raiz da costura de solda.

Figura 4.6 - Imagem ampliada em 50X do corte transversal da solda.

Figura 4.7 - Esboço do sabre soldado e o cordão de solda em vermelho.

Figura 4.8 - Esboço do gráfico após a medição da profundidade do rebaixo da solda.

Figura 4.9 - Resultados da medição da profundidade do rebaixo da solda.

Figura 4.10 - Corpos de prova que apresentaram trincas no cordão de solda.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Velocidade de Soldagem X Penetração para diferentes potências LASER.

Gráfico 2.2 - Ensaio da taxa de abrasão comparativa entre materiais conforme ASTM G65.

Gráfico 4.1 - Temperaturas da raiz da costura de solda das amostras de 1 a 12.

Gráfico 4.2 - Profundidade do cordão de solda.

Gráfico 4.3 - Comparativo dos valores de profundidade do cordão de solda por temperatura e por medição direta.

Gráfico 4.4 - Correlação entre a profundidade do cordão de solda e a distância focal. Gráfico 4.5 - Correlação entre a profundidade do cordão de solda e a potência do LASER.

Gráfico 4.6 - Correlação entre a profundidade do cordão de solda e a velocidade de soldagem.

Gráfico 4.7 - Gráfico dos resultados de profundidade do rebaixo da solda.

Gráfico 4.8 - Correlação entre a profundidade do rebaixo da solda e a distância focal. Gráfico 4.9 - Correlação entre a profundidade do rebaixo da solda e a potência do LASER.

Gráfico 4.10 - Correlação entre a profundidade do rebaixo da solda e a velocidade de soldagem.

Gráfico 4.11 - Durezas da costura de solda e ZTA.

Gráfico 4.12 - Comparação gráfica entre a dureza e a profundidade do cordão de solda.

Gráfico 4.13 - Correlação entre a dureza e a profundidade do cordão de solda.

Gráfico 4.14 - Correlação entre a dureza da solda e a distância focal.

Gráfico 4.15 - Correlação entre a dureza da solda e a potência do LASER.

Gráfico 4.16 - Correlação entre a dureza da solda e a velocidade de soldagem.

Gráfico 4.17 - Largura do cordão de solda das amostras.

Gráfico 4.18 - Correlação da largura do cordão de solda com a distância focal.

Gráfico 4.19 - Correlação da largura do cordão de solda com a potência do LASER.

Gráfico 4.20 - Correlação da largura do cordão de solda com a velocidade de soldagem.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Processos de soldagem por fusão (Soldagem – Fundamentos e Tecnologia).

Tabela 2.2 - Tipos e características do LASER para soldagem.

Tabela 2.3 - Composição química do aço 50CrMo4.

Tabela 2.4 - Propriedades físicas, mecânicas e térmicas do aço 50CrMo4.

Tabela 2.5 - Composição química da liga Stellite 6.

Tabela 3.1 - Tabela do coeficiente de correlação de Pearson.

Tabela 4.1 - Identificação das amostras e os parâmetros de cada uma.

Tabela 4.2 - Correlações entre característica avaliadas e variáveis do teste.

LISTA DE SIGLAS

- AISI American Iron and Steel Institute
- CCC Cúbico de Corpo Centrado
- CNC Comando Numérico Computadorizado
- DIN Deutsches Institut für Normung
- GTAW Gas Tungsten Arc Welding
- LASER Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- LD LASER Diodo
- MAG Metal Active Gas
- MB Material Base
- MIG Metal Inert Gas
- PTA Plasma de Arco Transferido
- SWN STIHL Werknorm
- TEM Electromagnetic Transverse Mode
- TIG Tungsten Inert Gas
- YAG Yttrium, Aluminum e Garnet
- ZMA Zona do Material de Adição
- ZTA Zona Termicamente Afetada

	14
	14
	15
	15
1 3 2 Objetivos específicos	15
	15
2 1 PROCESSOS DE LINIÃO DOS MATERIAIS	
2 3 FORMAÇÃO DE UMA JUNTA SOL DADA	
2 4 PROCESSOS DE SOL DAGEM	19
2.4.1 Processos de soldagem por pressão ou por deformação	
2.4.2 Processos de Soldagem por fusão	
2.5 SOLDA A LASER	
2.5.1 Características da soldagem à LASER	21
2.6 TIPOS DE LASER	23
2.7 PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A LASER	24
2.7.1 Potência do raio LASER	24
2.7.2 Diâmetro do raio incidente	24
2.7.3 Absorção	24
2.7.4 Velocidade de soldagem	24
2.7.5 Gás de Proteção	25
2.7.6 Modo do feixe LASER	25
2.7.7 Parâmetros do material e sua preparação	26
2.8 MATERIAIS DE PROCESSO	27
2.8.1 Soldagem de materiais dissimilares	27
2.9 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO	29
2.9.1 Zonas de uma junta soldada	29
2.9.2 Descontinuidade do cordão de solda	30
2.9.3 Ensaios não destrutivos	32
2.9.4 Ensaios destrutivos	33
2.9.4.1 Ensaio de dobragem	33
2.10 OUTRAS PESQUISAS SOBRE O TEMA	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37

3.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA	37
3.2 DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	37
3.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	38
3.4 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE SABRES	39
3.5 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	41
3.6 PARÂMETROS DO EXPERIMENTO	42
3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
3.7.1 Verificação da profundidade do rebaixo da costura de solda (Undercut)	44
3.7.2 Profundidade da costura da solda	44
3.7.3 Dureza da costura de solda e ZTA	45
RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 PREPARAÇÃO DO EXPERIMENTO	46
4.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	47
4.3 ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DA COSTURA DE SOLDA	47
4.4 ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DO REBAIXO DO CORDÃO DE SOLDA (UNDERCUT)	55
4.5 DUREZA DA COSTURA DE SOLDA E ZTA	60
4.6 LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA	64
4.7 RESUMO DOS RESULTADOS	67
CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
5.1 CONCLUSÕES DO PRESENTE TRABALHO	68
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	 3.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

1 INTRODUÇÃO

A indústria ao longo de dezenas de anos, vem passando por uma evolução constante de seus processos de fabricação, equipamentos mais otimizados e automatizados, garantem uma maior estabilidade aos processos. Empresas investem milhões de dólares por ano em pesquisa e desenvolvimento, para criar equipamentos e ferramentas com maior estabilidade e desempenho.

O LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), ou seja, amplificação de luz por emissão estimulada de radiação, foi construído pela primeira vez em 1960 pelo físico estadunidense Theodore Harold Maiman. Os principais tipos de LASER existentes são os de gás (LASER CO₂ e YAG) e o LASER de estado sólido (Diodo LASER, *Disk* LASER e *Fiber* LASER).

Atualmente o LASER é utilizado em diversas aplicações, médicas, bélicas, comunicação etc. Na indústria é muito utilizado para gravação em materiais, corte de metais, soldagem, tratamento térmico, medição de peças dentre outras aplicações.

Em um equipamento de soldagem à LASER, o feixe gerado no "Ressonador LASER", é transmitido por meio de uma fibra ótica até um cabeçote de solda (*welding head*), neste o feixe é desviado por um conjunto de espelhos e lentes e focalizado na junção entre os materiais a serem unidos. O processo de soldagem à LASER é muito utilizado principalmente para união de metais, mas para a realização de uma soldagem de boa qualidade, alguns requisitos devem ser cumpridos, como: tipo, potência e frequência do LASER, velocidade e profundidade da soldagem. Mas um dos requisitos mais importantes para que a soldagem tenha uma boa qualidade é a geometria entre as faces das peças a serem unidas.

Assim, nesse trabalho, serão realizados estudos para identificar a influência da distância do ponto focal, da potência do LASER e da velocidade de soldagem na redução das falhas de solda, gerados pela diferença de geometria das faces soldadas. O objeto de estudo será o sabre, componente de uma motosserra, a fim de reduzir as falhas de solda entre o corpo do sabre e um material de alta resistência a abração que é soldado eu uma das extremidades do mesmo.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Qual a influência dos parâmetros distância do ponto focal do feixe, potência do LASER e velocidade de soldagem, nos processos de soldagem à LASER de chapas

metálicas em equipamentos com geração LASER de estado solido e transmissão por fibra ótica?

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa se delimita à utilização de um equipamento com geração de LASER de fibra, onde a transmissão do feixe LASER é realizada por fibra ótica até um cabeçote de solda. Este cabeçote é fixado à um equipamento CNC (Comando Numérico Computadorizado) de três eixos principais que controlam a trajetória do cordão de solda. Os corpos de prova serão os sabres, chapas metálicas que tem a função de suporte para a corrente de corte em uma motosserra. Nesta pesquisa será possível variar os parâmetros de velocidade da trajetória da solda, potência do LASER e distância do ponto focal do feixe LASER. Os testes serão realizados nas dependências da Empresa STIHL utilizando os equipamentos e insumos necessários para realização deles.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos do presente trabalho foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, os quais são apresentados a seguir.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é identificar a influência dos parâmetros distância do ponto focal, potência do LASER e velocidade de soldagem do processo de soldagem, na redução das falhas de material (*gaps*) gerados no cordão de solda de chapas metálicas.

1.3.2 Objetivos específicos

Criar uma base de conhecimento sobre o assunto proposto nesta pesquisa a fim de obter as informações necessárias para propor melhorias nos processos de soldagem à LASER de chapas metálicas em geral.

Analisar a influência da variação da distância do ponto focal do feixe LASER nos processos de soldagem à LASER;

Analisar a influência da potência usada no LASER no resultado da união de materiais.

Analisar a influência da velocidade de soldagem no resultado da união dos materiais.

Estudar e propor modificações a fim de reduzir as taxas de retrabalho e sucata no processo de soldagem à LASER dos sabres de motosserras na STIHL;

1.4 JUSTIFICATIVA

Atualmente o crescimento e a sobrevivência das indústrias estão ligados a dois fatores principais, ao baixo custo, que envolve a otimização dos processos produtivos e ao prazo de entrega, visto que a concorrência entre os fabricantes está cada vez maior, portanto, quando não se tem o produto para entregar, certamente um de seus concorrentes o terá. Falando-se desses requisitos a pouco tempo atrás, certamente deveria se falar de qualidade. Atualmente, porém, devido à grande concorrência e a facilidade de acesso dos consumidores a qualquer tipo de produto de qualquer lugar do mundo, o quesito qualidade é obrigatório para quem deseja apenas estar no mercado.

Neste trabalho será abordado a formação de falhas de solda à LASER no componente sabre da motosserra, e também que tais falhas acarretam problemas funcionais na peça acabada gerando reclamações de clientes e por consequência a perda de mercado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PROCESSOS DE UNIÃO DOS MATERIAIS

Segundo Villani (2017), o processo de união dos metais é dividido em duas categorias principais, aqueles baseados na ação de forças macroscópicas como a parafusagem e a rebitagem, onde a resistência da junta é dada pela resistência ao cisalhamento dos elementos de fixação e a força de atrito entre as superfícies. E os baseados em forças microscópicas, interatômicas e intermoleculares, como a soldagem, a brasagem e a colagem, onde a união é conseguida pela aproximação dos átomos ou moléculas das peças a serem unidas.

Ainda segundo Villani (2017), dentre estes processos citados, a soldagem, por ter uma importante aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de itens de grande porte, é o processo de união dos materiais mais importantes utilizado industrialmente. Ela pode ser utilizada desde a fabricação de estruturas simples, como em componentes de maior responsabilidade técnica. Classicamente a soldagem é considerada um processo de união, porém, na atualidade, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando à recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Diferentes processos relacionados com a soldagem são usados para corte de peças metálicas e em muitos aspectos estas operações assemelham-se a operações de soldagem.

2.2 PEQUENO HISTÓRICO DA SOLDAGEM

Villani (2017) destaca que, embora a soldagem seja um processo recente, com cerca de 100 anos, a soldagem por forjamento tem sido utilizado desde épocas remotas. O ferro substituiu o cobre e o bronze por volta de 1500 AC. Produzido por redução direta, o ferro era conformado por martelamento na forma de pequenos blocos. Quando peças maiores eram necessárias, estes blocos eram soldados por forjamento, isto é, o material era aquecido e martelava-se até a soldagem.

A soldagem foi usada na idade média para a fabricação de armas e outros instrumentos cortantes. Como o ferro obtido por redução direta tem um teor de carbono muito baixo, este não pode ser endurecido por têmpera. Por outro lado, o aço com um teor maior de carbono, era um material escasso de alto custo, sendo fabricado

pela cementação de tiras finas de ferro. Assim, ferramentas eram fabricadas com ferro e com tiras de aço soldadas nos locais de corte e endurecidos por têmpera. A soldagem foi, durante este período, um importante processo na tecnologia metalúrgica, principalmente, devido à escassez e alto custo do aço e o tamanho reduzido dos blocos de ferro obtidos por redução direta.

Villani (2017) complementa que mais tarde, nos séculos XII e XII, com o desenvolvimento de tecnologia para obtenção no estado líquido de grandes quantidades de ferro fundido e com o desenvolvimento do alto forno, a fundição tornou-se um processo importante de fabricação. A soldagem por forjamento foi substituída por outros processos de união. No século XIX, com a descoberta do arco elétrico e do acetileno, e de desenvolvimento de fontes produtoras de energia elétrica, que possibilitaram o aparecimento de processos de soldagem por fusão. Atualmente, mais de 50 diferentes processos de soldagem tem alguma utilização industrial e a soldagem é o mais importante método para união permanente de metais.

2.3 FORMAÇÃO DE UMA JUNTA SOLDADA

Conforme explanado por Villani (2017), uma peça metálica pode ser considerada como formada por muitos átomos dispostos em um arranjo espacial característico (estrutura cristalina), onde no interior desta estrutura os átomos estão posicionados à uma distância ro dos átomos vizinhos, onde a energia do sistema é mínima, como mostra a figura 2.1.





FONTE: Villani, 2017.

Villani (2017) ainda complementa que nesta situação, cada átomo tem a energia mínima, sem ligação com átomos extras. Já na superfície do sólido, os átomos estão ligados a menos vizinhos, possuindo um maior nível de energia do que do átomos do seu interior. A energia pode ser reduzida quando átomos superficiais se ligam à outros. Uma ligação permanente (solda) seria formada no caso de duas peças metálicas aproximadas à uma distância extremamente pequena uma da outra. Porém, a existência de obstáculos como a rugosidade, a presença de óxidos, poeira, umidade, gordura etc. Impedem a aproximação efetiva das superfícies.

2.4 PROCESSOS DE SOLDAGEM

O processo de união dos materiais por soldagem é basicamente dividido em dois grupos, processos de soldagem por pressão ou deformação e processos de soldagem por fusão.

2.4.1 Processos de soldagem por pressão ou por deformação

Conforme Modenesi (2012), estes processos se baseiam na aplicação de pressões elevadas de forma a deformar plasticamente as superfícies metálicas permitindo a aproximação atômica a distâncias da ordem de r₀. Em geral, as peças são aquecidas localmente para facilitar a sua deformação. Esta forma de soldagem é mostrada esquematicamente na figura 2.2.



FONTE: Modenesi, 2012.

Este grupo inclui os processos de soldagem por forjamento, ultrassom, fricção, difusão, explosão e outros. Modenesi (2012) ainda complementa que nestes

processos, a união é obtida principalmente pela deformação do material confinada, preferencialmente, em uma região restrita às vizinhanças da junta. Para isto, em vários desses processos, essa região é aquecida em relação ao restante das peças. Nos processos de soldagem por resistência, isto é conseguido pela passagem de uma corrente elétrica elevada em função de uma maior resistência elétrica no contato entre as peças e/ou das conduções de extração de calor na junta.

Modenesi (2012) explica que nos processos de soldagem por fricção, o calor é gerado pelo atrito entre as superfícies das peças colocadas em movimento relativo e a deformação final pela aplicação, imediatamente a interrupção do movimento entre as peças, de uma força de compressão. Nos processos de soldagem por deformação, em geral, as temperaturas atingidas pelo material são inferiores àquelas atingidas na soldagem por fusão. Desta forma, as alterações de estrutura e propriedades mais significativas ocorrem na soldagem por fusão.

2.4.2 Processos de Soldagem por fusão

Villani (2017) explica que esses processos consistem na aplicação localizada de calor na região de união para a sua fusão é do metal de adição, quando utilizado, produzindo a ligação pela solidificação do metal fundido, mostrado na figura 2.3.



Figura 2.3 – A) representação esquemática da soldagem por fusão; e B) macrografia de uma junta.

FONTE: Villani, 2017.

Villani (2017) complementa que os processos de soldagem por fusão podem ser separados em subgrupos, por exemplo, de acordo com a fonte de energia usada para fundir as peças. São exemplos de fonte de calor: aquecimento por resistência da escória líquida, arco elétrico, feixe de elétrons, feixe de luz e chama oxi-acetilênica. A tabela 2.1 mostra alguns processos de soldagem por fusão.

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/Mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 50 mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.
Soldagem ao Arco Submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática/mecaniz. ou semi- automática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO ₂	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semi- automático	Soldagem de aços carbono com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + O ₂ , Argônio + CO ₂ , CO ₂	Automática/mecaniz. ou semi- automática. O arame é sólido	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição
Soldagem a Plasma	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constrito por um bocal	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou misturas destes	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações
Soldagem por Feixe Eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta Tensão. Peça +	Vácuo (»10 ⁻⁴ mm Hg)	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a Laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Como acima	Como acima. Corte de materiais não metálicos
Soldagem a Gás	Chama oxi- acetilênica		Gás (CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O)	Manual. Arame adicionado separadamente	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

Tabela 2.1 - Processos de soldagem por fusão (Soldagem – Fundamentos e Tecnologia

FONTE: Villani, 2017.

2.5 SOLDA A LASER

2.5.1 Características da soldagem à LASER

Katayama (2013) explica que desde que o feixe LASER foi reconhecido pela primeira vez, muitos LASERs característicos como o LASER CO2, o LASER YAG, o LASER de Diodo, o LASER de Disco e o LASER de Fibra têm sido muito utilizados na indústria em diferentes processos como corte, gravação, soldagem, brasagem, modificação de superfície, endurecimento por transformação, revestimento e recozimento.

Katayama (2013) complementa que a soldagem é o método de união mais versátil e realista aplicável à construção de produtos em todos os campos industriais. Um LASER é uma fonte de calor de alta densidade de potência. Portanto, a soldagem a LASER é reconhecida como um processo avançado para unir materiais, com um feixe de LASER de alta densidade de energia e alta potência. A Figura 2.4 ilustra o comparativo de densidade de potência de outras fontes de calor utilizadas nos processos de soldagem.



Figura 2.4 - Densidade de potência para as típicas fontes de calor de soldagem e a geometria dos cordões de solda de cada tipo

FONTE: Katayama, 2013

Katayama (2013) ainda explica que a densidade de potência de um feixe de LASER, que é equivalente à de um feixe de elétrons, é muito maior do que a do arco ou do plasma. Consequentemente, um cordão de solda estreito e profundo é formado durante a soldagem com um feixe de LASER ou elétron de alta densidade de potência, e uma solda de penetração profunda e estreita pode ser efetivamente produzida. Geralmente, a velocidade de deslocamento da soldagem a LASER é maior do que a da soldagem por arco elétrico e à plasma.

Katayama (2013) complementa que entre todos os processos de soldagem, a soldagem a LASER pode produzir uma variedade de juntas de metais ou plásticos, variando de placas muito finas de cerca de 0,01 mm de espessura, a placas grossas de cerca de 50 mm. A solda à LASER ganhou grande popularidade como uma promissora tecnologia de junção com alta qualidade, alta precisão, alto desempenho, alta velocidade, boa flexibilidade e baixa distorção. Este processo também pode ser facilmente robotizado, com mão de obra reduzida, automação total e sistematização nas linhas de produção. Consequentemente, as aplicações de soldagem a LASER estão aumentando junto com o desenvolvimento de novos aparelhos a LASER e processos de junção. Para aplicar adequadamente LASERs pulsados ou de onda contínua à soldagem, é importante conhecer as especificações e a capacidade dos aparelhos de LASER, os fatores que afetam a penetração da solda, os defeitos de soldagem e os mecanismos e comportamento da soldagem, bem como avaliar a soldabilidade de materiais e as propriedades mecânicas de juntas soldadas.

2.6 TIPOS DE LASER

De acordo com Katayama (2013), os LASERs de CO2, de comprimento de onda de 10,6 µm, tem feixe LASER de alta qualidade e fácil obtenção de potencias mais altas, podendo atingir até 50 kW. N indústria metalmecânica é comum a utilização dos LASERs CO2 com potencias de 1 a 15 kW. Um inconveniente problema para este tipo de LASER é que a condução até o cabeçote de solda é realizada por espelhos e não por uma fibra ótica.

Sobre LASER YAG, Katayama (2013) explica que este tipo de LASER tem comprimento de onda de 1,06 µm, pode ser conduzido por fibra ótica até o cabeçote de solda, e operam em modo contínuo ou pulsado. É muito utilizado para soldagem de componentes elétricos, tubos, tanques etc. Uma desvantagem do LASER YAG é a baixa eficiência elétrica de menos de 4%.

Segundo Katayama (2013), os LASERs YAG de estado sólido bombeados por LASER-diodo (LD), com potencias de 6 a 10 kW, foram criados para substituir os LASERs de CO2 e o YAG. Mas com o desenvolvimento dos LASERs de fibra e de disco de alta potência, alta eficiência elétrica (até 30%) e alta qualidade do feixe, o YAG LD perdeu espaço no mercado. A tabela 2.2 resume os tipos e características dos principais LASERs utilizados para soldagem.

Tipos de laser	Característica do laser
Laser CO ₂	Comprimento de onda: 10.6 µm; raio infra-vermelho
	Meio Laser: Mistura CO ₂ -N ₂ -He
	Potência média: 50 kW (máximo), (normal): 1-15 kW
Laser YAG	Comprimento de onda: 1.06 µm; raio infra-vermelho
	Meio Laser: Mistura Nd ³⁺ : Y ₃ Al ₅ O ₁₂
	Potência média: 10 kW (máximo), (normal): 50 W - 7 kW
	Eficiência: 1-4%
Laser Diodo	Comprimento de onda: 0.8-1.1 µm; raio infra-vermelho
(LD)	Meio Laser: InGaAsP, etc. (sólido)
	Potência média: 10 kW (máximo)
	Eficiência: 20-60%
LD bombeado	Comprimento de onda: 1 µm; raio infra-vermelho
por laser de	Meio Laser: Nd^{3+} : Y ₃ Al ₅ O ₁₂ (solido)
estado solido	Potência média: 13.5 kW (máximo)
Laser de disco	Comprimento de onda: 1.03 µm; raio infra-vermelho
	Meio Laser: Yb ³⁺ : YAG ou YVO4 (sólido)
	Potência média: 16 kW (máximo)
	Eficiência: 15-25%
Laser de fibra	Comprimento de onda: 1.07 µm; raio infra-vermelho
	Meio Laser: Yb ³⁺ : SiO ₂ (sólido)
	Potência média: 100 kW (máximo)
	Eficiência: 20-30%

Tabela 2.2 - Tipos e características do LASER para soldagem.

FONTE: Katayama, 2013

2.7 PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A LASER

2.7.1 Potência do raio LASER

Conforme descrito em Infosolda (2012), a penetração é diretamente relacionada com a densidade de potência, a qual está relacionada com a potência e o diâmetro do raio. Para se medir a energia de saída da cavidade ressonante, usa-se calorímetros de corpos negros.

2.7.2 Diâmetro do raio incidente

Ainda em Infosolda (2012) o diâmetro do raio incidente é o parâmetro mais importante pois determina a densidade de energia, porém muito difícil de medir-se para altas potências de LASER. Consideremos uma distribuição gaussiana do feixe pois é o modo mais vantajoso TEM00, para uma determinação precisa, faz-se medições experimentais.

2.7.3 Absorção

A absorção é a que determina a eficiência do feixe de luz incidente na peça, qualquer cálculo da energia transferida para a soldagem LASER é baseada na energia absorvida pela peça, para superfícies polidas determinou que absorção é proporcional a raiz quadrada da resistividade elétrica. Outros fatores também influenciam, como a temperatura, qualidade da superfície, o gás de proteção, o que dificulta muito a determinação experimental, para ter-se uma ideia, a absorção para aços fica em 90% no estado fundido, Infosolda (2012).

2.7.4 Velocidade de soldagem

Para uma dada potência, um decréscimo na velocidade de soldagem, origina um aumento da penetração. Elevadas velocidades podem originar insuficientes penetrações, enquanto baixas velocidades conduzem a fusões excessivas do metal, provocando vaporização e perda de material com a consequente formação de defeitos, o gráfico 2.1 mostra a influência da velocidade para diferentes potências de LASER, Infosolda (2012).



Gráfico 2.1 - Velocidade de Soldagem X Penetração para diferentes potências LASER

2.7.5 Gás de Proteção

O gás de proteção serve para remover o plasma formado na fusão (ou vaporização) do material. Caso não seja feita esta remoção, o plasma absorve e desvia o raio LASER, sendo necessário remover o plasma formado. O tipo de gás utilizado e seus diferentes potenciais de ionização, proporcionarão diferenças na interação feixe-matéria, alterando a transferência da energia. Nos casos de soldagem de materiais reativos como Ti, ou para soldagem onde partes da poça de fusão fiquem expostas sem proteção como soldagem de raiz, utiliza-se os mesmos mecanismos conhecidos nos processos MIG/MAG e TIG para proteções adicionais. No processo LASER, para diferenciar do outro gás utilizado, este recebe o nome de gás de assistência. A composição e a vazão do gás influenciam na penetração. A Posição Focal, é considerada como o máximo ponto de convergência do feixe, considera-se como um ponto ótimo 1 mm abaixo do nível da superfície da peça, mas pode variar dependendo da espessura a ser soldada. O Pulso, muito empregado na soldagem, é usado principalmente para aumentar a penetração, os parâmetros de pulso são a duração, geralmente em milissegundo (ms), e a frequência de pulso em Hertz (Hz), Infosolda (2012).

2.7.6 Modo do feixe LASER

Para melhor determinar o diâmetro incidente, é necessário conhecer as características e estrutura do modo. Na cavidade ressonante existem o modo axial e

transversal, sendo que as ondas nos axiais circulam exatamente ao longo do eixo dos espelhos, nos transversos, as ondas giram circularmente a este eixo, refletindo indiretamente entre os espelhos. No modo axial não há preocupação, pois estão todos no centro, já no transverso, tem muitas variáveis, para determinar este modo convencionou como TEMmn (modo transverso eletromagnético), e a identificação dos dois dígitos "m" e "n" de como essa energia se distribui na figura 2.5 tem-se como exemplo temos o TEM₀₀, com uma distribuição gaussiana, com a melhor qualidade de raio, Infosolda (2012).



FONTE: Infosolda, 2012

2.7.7 Parâmetros do material e sua preparação

Conforme descrito em Infosolda (2012), a localização da peça a soldar na direção perpendicular ao feixe é extremamente importante pois a focalização do feixe faz com que este tenha sua densidade ótima em uma dada distância. Fora dela, o feixe já não é tão concentrado e consequentemente, para a mesma potência, apresentará maior dimensão de sangria e menor penetração. A configuração das juntas a ser soldadas e as tolerâncias dimensionais da preparação assumem fundamental importância neste processo, uma vez que, como o feixe é extremamente colimado, qualquer falha na preparação da junta a soldar fará com que o feixe passe pela falha sem interagir com a peça. O material a ser soldado apresenta diferentes propriedades e entre elas a absortividade do material é extremamente importante pois dará uma indicação para determinar quanto de radiação será refletida ou absorvida pelo material e com isto qual a potência de feixe necessária e se será pulsado ou não.

2.8 MATERIAIS DE PROCESSO

2.8.1 Soldagem de materiais dissimilares

Conforme explica Pereira (2020), a soldagem de materiais dissimilares consiste na união de materiais com composição e propriedades distintas, sendo frequentemente empregue na união de aços inoxidáveis a outros tipos de aços. Apesar das dificuldades inerentes à união de diferentes materiais, a junta soldada apresenta um conjunto de propriedades mecânicas que não comprometem as exigências impostas pelas indústrias, permitindo assim uma redução de custos uma vez que é possível recorrer a materiais de base mais baratos.

O processo de soldagem à LASER neste projeto realiza a junção de dois materiais dissimilares. Um deles é aço carbono DIN-50CrMo4 temperado e revenido com dureza entre 37 e 43 HRC e o outro é a Liga de Stellite 6.

2.8.1.1 Aço DIN-50CrMo4

Conforme descrito em Matweb (2023), o aço DIN-50CrMo4 é um aço liga especial com composição química e propriedades mecânicas similares ao aço AISI 4150, é um material ferroso, tem alta resistência mecânica, tenacidade e temperabilidade, tem boa soldabilidade, é muito utilizado em componentes automotivos e aeronáuticos. Sua estrutura cristalina é cúbica de corpo centrado (CCC), conhecida como estrutura cristalina de ferro alfa (α -Fe). O A composição química do aço 50CrMo4 é mostrada na tabela 2.3.

Elemento Quìmico	Percentual
Carbono (C)	0.46 - 0.54%
Cromo (Cr)	0.90 - 1.2%
Ferro (Fe)	96.69 - 97.99% (balanço)
Manganês (Mn)	0.50 - 0.80%
Molibidênio (Mo)	0.15 - 0.30%
Fósforo, (P)	<= 0.035%
Silicio (Si)	<= 0.40%
Enxofre (S)	<= 0.035%

Tabela 2.3 – Composição química do aço 50CrMo4.

FONTE: Matweb, 2023

Matweb (2023) ainda descreve as propriedades físicas, mecânicas e térmicas do aço 50CrMo4, conforme mostrado na tabela 2.4.

Propriedades	Valor		
Densidade	7,80 g/cm		
Módulo de elasticidade	210.000 N/mm ²		
Módulo de cisalhamento	80.000 N/mm²		
Capacidade térmica específica	0,460 - 0,480 J/g-°C		
Condutividade térmica	40,0 - 45,0 W/m-K		
Temperatura de transformação	736°C		

Tabela 2.4 – Propriedades físicas, mecânicas e térmicas do aço 50CrMo4.

FONTE: Matweb, 2023

2.8.1.2 Stellite 6

Conforme Lin (2020), a Liga de Stellite 6 é um material não ferroso de alta dureza podendo chegar até 43 HRC, com boa resistência à abrasão e à corrosão mesmo em altas temperaturas. É comumente usada como liga de revestimento duro em ferramentas de corte, vedações de bombas e pás de motores aeronáuticos. O gráfico 2.2 mostra um comparativo de resistência à abrasão comparado com outros materiais em teste com temperatura acima dos 350°C.



Gráfico 2.2 - Ensaio da taxa de abrasão comparativa entre materiais conforme ASTM G65.

FONTE: Rijeza, 2023

Lin (2020) complementa que o Stellite 6 é uma liga a base de Cobalto (Co) e Cromo (Cr), e outros elementos em menor proporção como: Carbono (C), Silício (Si), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Ferro (Fe), Fosforo (P), Enxofre (S) e Tungstênio (W). A tabela 2.5 mostra os percentuais dos elementos químicos na liga. A liga de Stellite 6 consiste em dendritos (α -Co), (Matriz rica em Cobalto), com uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e cercada por uma estrutura lamelar rica em Cromo.

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·											
	С	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Мо	Ni	W	Co
from	0.90	0.20	0.50	-	-	28.00	-	-	1.25	3.50	-
to	1.40	2.00	2.00	0.04	0.03	32.00	3.00	1.50	3.00	5.50	balance

Tabela 2.5 - Composição química da liga Stellite 6

2.9 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO

2.9.1 Zonas de uma junta soldada

Pereira (2020) explica que o calor gerado pelos processos de soldagem provoca alterações ao nível da microestrutura do material, sendo que a severidade destas alterações está dependente da quantidade de energia que é fornecida sob a forma de calor aos materiais de base assim como a forma como ocorre a sua repartição. Estes dois últimos fatores dependem, principalmente, da entrega térmica que é utilizada durante o processo de soldagem. Esta é responsável pelo aquecimento dos materiais, levando à formação de quatro regiões distintas numa secção da junta soldada. Na figura 2.6 é passível de serem distinguidas estas regiões, através da análise macrográfica de um corte transversal de uma junta soldada.

- 1. Zona do Material de Adição (ZMA);
- 2. Linha de fusão;
- 3. Zona Termicamente Afetada (ZTA);
- 4. Material de Base (MB).

FONTE: STIHL,2021



FONTE: Pereira, 2020

2.9.2 Descontinuidade do cordão de solda

Conforme a explicação de Pereira (2020), nenhum material de construção nem nenhuma estrutura de engenharia é isenta de imperfeições. Assim, nas juntas soldadas, é comum observarem-se descontinuidades que se definem como interrupções na estrutura do cordão de solda que, dependendo de vários fatores, tais como sua localização, dimensões etc., podem comprometer o correto desempenho da peça soldada. Se for esse o caso, a descontinuidade passa a ser denominada defeito, sendo obrigatório corrigi-lo ou eliminá-lo.

Miller (2013) complementa que as descontinuidades consistem na interrupção da estrutura típica de um material, sendo um exemplo disso a falta de homogeneidade em propriedades mecânicas, metalúrgicas e físicas da junta soldada ou do material. Dependendo do grau de severidade considera-se como um defeito, com isso é preciso rejeitar a peça. Vale mencionar que as descontinuidades são divididas em três grupos, as planares, as geométricas e as volumétricas.

Villani (2017) explica que as descontinuidades planares tem como característica principal o efeito de entalhe na peça, além disso, pode ocorrer o afloramento à superfície ou não, causando concentração de tensão. Os exemplos mais comuns desse tipo de descontinuidade são a falta de fusão, a falta de penetração e as trincas. A figura 2.7 mostra a falta de penetração em uma junta soldada.



Figura 2.7 – Falta de penetração em uma junta soldada

FONTE: Jacob, 2020

Groover (2017) afirma que as descontinuidades geométricas apresentam tensões elevadas em sua ponta, além disso, pode-se gerar falhas catastróficas na junta soldada. Tal evento tende a ocorrer ao longo ou depois do resfriamento do material, sendo classificado em dois grupos: a) As trincas a quente: aparecem durante ou após a soldagem. b) As trincas a frio: ocorrem após o processo ou ainda dias após a realização da soldagem. A figura 2.8 mostra uma trinca na junta soldada.



Figura 2.8 – Trinca na junta soldada

FONTE: Jacob, 2020

Conforme Odebreccht (2012) as descontinuidades volumétricas são aquelas em que se tem a interrupção física do material devido ao aparecimento de trincas, inclusões, entre outros. Sua ocorrência se dá em três dimensões, além disso, recomenda-se reparar a peça quando as descontinuidades atingem um dado tamanho ou ainda quando há extensões acumuladas entre esses elementos. A figura 2.9 mostra inclusões em cordões de solda.



FONTE: Wainer, 2004

2.9.3 Ensaios não destrutivos

Conforme explica Silva (2017), ensaios não destrutivos consistem em técnicas para inspecionar máquinas e equipamentos sem lhes causar danos. Por meio desses testes consegue-se detectar falta de homogeneidade ou falhas por meio de princípios físicos e ainda testar peças semiacabadas, ou acabadas para avaliar sua qualidade sem impactar o uso posterior dos itens inspecionados. Nesse cenário emerge um conceito relevante, os defeitos, que são definidos como sendo descontinuidades que apresentam localização, dimensões, tipo e natureza que podem inutilizar os materiais caso estes não satisfaçam os requisitos mínimos estipulados. Leite (2017) explica que a descontinuidade, por sua vez, consiste na interrupção da microestrutura característica da peça, impactando sua homogeneidade e suas propriedades metalúrgicas, mecânicas ou físicas. Entre os testes mais comuns podem-se mencionar correntes parasitas, emissão acústica, radiografia, partículas magnéticas, estanqueidade, líquido penetrante e ultrassom, Vicente (2019).

Conforme explica Groover (2017), os ensaios visuais são considerados como sendo uma das mais antigas atividades de inspeção, sendo este o primeiro tipo de ensaio empregado para avaliar falhas ou anomalias em componentes. Esse tipo de ensaio se direciona diretamente a outros tipos de uma vez que por meio da visão o ser humano consegue observar e interpretar outros ensaios. Com isso, através da inspeção visual consegue-se detectar corrosão, cavidades, trincas, entre outros problemas que afetam a integridade de máquinas, equipamentos e seus componentes.

2.9.4 Ensaios destrutivos

Conforme explanação de Pereira (2020), os ensaios destrutivos são realizados sobre corpos de prova produzidos em conformidade com a norma associada ao procedimento de soldagem. Estes testes são conduzidos com o objetivo de qualificar o procedimento de soldagem e o meio de soldagem e, eventualmente, realizar o controle de qualidade dos materiais, recorrendo a ensaios químicos, metalográficos ou mecânicos. Idealmente, realizar estes testes na peça seria a melhor forma de garantir a qualidade da junta soldada, porém, uma vez que a capacidade de uma peça realizar a sua função é destruída com a realização destes ensaios, o custo e a dificuldade de realizar uma cópia da peça, torna esta situação impraticável e, por isso, é desejável que os corpos de prova sejam produzidos com o maior rigor possível de modo a estabelecer uma relação com a peça. Tal como referido anteriormente, é necessário realizar a qualificação do procedimento de soldagem e, por isso, é fundamental que se consiga compreender os resultados obtidos nos ensaios. Este tipo de ensaios, para além de provocarem a destruição da peça, apenas fornecem resultados relativos a uma determinada zona da peça, não refletindo também a qualidade de todas as peças de um lote.

2.9.4.1 Ensaio de dobragem

Pereira (2020) explana que este ensaio consiste em submeter um corpo de prova, de secção retangular, a uma deformação plástica por efeito de dobragem, sem alteração do sentido de aplicação da força até ser atingido o ângulo de dobragem especificado, com o objetivo de avaliar a ductilidade de um determinado material. Permite fazer a qualificação do meio e do procedimento de soldagem. Para a análise de juntas soldadas, do tipo topo a topo, são geralmente realizados ensaios de dobragem longitudinais de forma a deformar igualmente e simultaneamente o material de base, a ZTA e a ZMA.

2.10 OUTRAS PESQUISAS SOBRE O TEMA

Santos (2015) estudou o processo de revestimento por LASER com a liga de cobalto Stellite 6 sobre o aço inoxidável superduplex, comercialmente conhecido com Zeron 100, com foco nas mudanças causadas pelo ciclo térmico na zona termicamente afetada. Para isso, foi utilizado uma liga de cobalto (Stellite 6) em pó um LASER com potência de 4kW e argônio como gás de proteção. Os resultados mostraram que a eficiência na deposição do equipamento foi baixa havendo necessidades de ajuste na posição do bocal alimentador de pó. Obteve-se uma microestrutura dendrítica bem refinada e o revestimento deve ser aplicado analisando-se caso a caso, pois foi identificada muita porosidade na união.

Já Lima, et al (1998) estudaram a aplicação de revestimentos a base de cobalto (Stellite) por soldagem e por aspersão térmica. O material base selecionado como substrato foi um aço inoxidável AISI 304. Os materiais de adição foram um arame Stellite-6-Stoody (3,2 mm de diâmetro) para o revestimento por soldagem e um pó CO-106-2 para aspersão térmica. Os resultados mostraram que as amostras revestidas por aspersão térmica (PTA) com espessuras menores que 1 mm apresentaram um elevado valor de diluição. O processo de aspersão térmica por plasma de arco transferido (PTA) pode proporcionar um menor nível de diluição quando comparado ao processo de soldagem GTAW na deposição de revestimentos a base de cobalto, observada uma certa otimização do processo para a espessura desejada do revestimento. Os testes também mostraram que os valores de micro dureza dos revestimentos obtidos pelo processo de soldagem GTAW foram cerca de 30 % maiores, em média, que os revestimentos aspergidos pelo processo PTA, provavelmente em função das maiores espessuras dos revestimentos soldados.

Veiga, et. al (2021) estudaram a determinação dos parâmetros de processamento a LASER para deposição de revestimentos de Stellite 6 livres de descontinuidades e com geometria adequada sobre aço inoxidável austenítico. Nesse estudo os revestimentos foram depositados com uma fonte de LASER de diodo, equipada com um cabeçote coaxial contínuo, utilizando diferentes potências do feixe e velocidades de varredura. Os ensaios de deposição foram realizados em uma máquina com controle de comando numérico (CNC) com 5 eixos PRECO, que utiliza uma fonte LASER de diodo da fabricante LASERLINE modelo LDF6000-60VGP e cabeçote de deposição Fraunhofer Coax 8. Como resultado do experimento, todas as

condições de deposição resultaram em cordões contínuos e sem ocorrência de desplacamento do substrato. Os resultados dos ensaios de líquido penetrante. Indicações mais notáveis foram observadas para os revestimentos depositados com potência de 4200 W e velocidades de 1200 e 1600 mm/min, ou seja, as condições com maior energia.

Já Castro et. al (2018) estudaram as características das justas soldadas no processo de soldagem com arco elétrico, juntamente com os tipos de ensaios destrutivos e não destrutivos para avaliação da qualidade da solda. O trabalho descreveu no detalhe como são realizados os ensaios não destrutivos como: líquido penetrante, partículas magnéticas, ultrassom e radiográfico. E os ensaios destrutivos como o de dobramento e tração. Como resultado os autores explicaram que diversos testes são utilizados para obtenção das características e qualidade das juntas soldadas, existem ensaios complexos e menos complexos tanto de execução quanto de interpretação nos resultados os quais devem ser utilizados de acordo com as necessidades especificadas nos projetos.

Por sua vez, Pereira (2020) estudou quatro qualificações de procedimentos de soldagem conjuntas topo a topo de diferentes espessuras e combinações de materiais. Os testes realizados para a qualificação das juntas soldadas foram realizados conforme norma EM ISSO 15614-1. Foram realizados ensaios destrutivos e não destrutivos de forma a assegurar que as juntas soldadas não apresentam defeitos. Os materiais utilizados nos testes foram os aços inoxidáveis AISI 3045L, AISI 415 e o AISI 316L. Como resultado o autor realizou diversos testes e ensaios metalográficos onde foi possível analisar o comportamento térmico nas juntas soldadas, também o permitiu vivenciar as várias tarefas que um inspetor de soldagem desempenho diariamente.

Já Gimenes Jr. e Ramalho (2012) apresentaram nesse artigo algumas informações básicas sobre o processo de soldagem a LASER. Eles descreveram um pouco sobre a origem do LASER, os tipos de LASER e os equipamentos normalmente utilizados para este processo. Explanaram sobre fonte de alimentação do LASER, meio ativo e cavidade ressonante. Também descreveram um pouco sobre o LASER rubi e o LASER YAG, assim como o LASER CO2. Também explicaram um pouco sobre os consumíveis utilizado nos processos de soldagem em geral, também sobre o princípio de funcionamento do processo de soldagem a LASER, os parâmetros controlados no processo e os parâmetros da fonte LASER. Explicaram um pouco sobre o modo do feixe LASER, sobre gás de proteção e sobre os parâmetros do material e sua preparação. Apresentaram técnicas de aplicação e os aspectos econômicos da soldagem a LASER. Também mostraram algumas vantagens e limitações do processo de soldagem a LASER em geral.

Kavamura (2007) estudou os conceitos básicos a respeito de solda LASER, apresentou conceitos atuais de aplicação de solda LASER para construção de carrocerias, comparou através do método de elementos finitos os modelos de resistência mecânica da junção da solda entre os processos e solda LASER e solda ponto por resistência elétrica. O objetivo do estudo foi obter informações para modificar um assoalho de um veículo de passageiro com solda realizada pelo processo de solda ponto por resistência elétrica para o processo de solda LASER. Os testes foram realizados com chapas de espessura entre 0,8 mm e 1,2 mm. Diversos parâmetros foram variados para obtenção de corpos de prova, soldagem a LASER a geometria foi levemente modificada utilizando o conceito tubular para possibilitar a redução da espessura e propiciar a soldagem. Como resultado do estudo da comparação entre o processo de solda a LASER e o processo de solda ponto por resistência elétrica apresentaram o mesmo desempenho e rigidez, porém com uma redução de massa no assoalho devido a alteração de geometria no processo de solda LASER.

Já Máximo (2015) estuda experimentos de soldagem de chapas de Tântalo e Monel 400 com 100 µm de espessura. Ele realizou soldas em um LASER de Nd:YAG operando em modo pulsado e em um LASER de Fibra operando em modo contínuo. Para obtenção dos resultados foram analisadas amostras através de microscopia ótica e foram realizados ensaio de micro dureza Vickers. As amostras que apresentaram melhores resultados foram submetidas a ensaios de tração e a ensaios de corrosão. Como resultado do estudo a soldagem a LASER apresenta muitos benefícios em relação a outros processos convencionais para chapas finas. A soldagem no modo pulsado apresentou maior relação de aspecto se comparado a soldagem em modo contínuo. A soldagem em modo contínuo apresentou uma velocidade de soldagem muito superior ao modo pulsado. Os resultados indicaram que a soldagem no modo pulsado apresenta maior aplicabilidade para chapas finas, devido à necessidade um controle preciso sobre a intensidade aplicada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A Empresa STIHL foi fundada em 1926 na Alemanha pelo engenheiro mecânico Andreas STIHL. Com o objetivo de facilitar a vida das pessoas que utilizavam ferramentas manuais como machados e serras para o corte de madeira, ele criou a motosserra. A empresa cresceu rapidamente e logo se tornou a marca mais vendida no mundo em seu segmento. A STIHL inaugurou sua fábrica do Brasil em São Leopoldo no ano de 1975 onde atualmente conta com o apoio de cerca de 3.700 funcionários na fabricação anual de mais de um milhão de motores. Faz parte do portfólio de produtos da empresa motosserras, roçadeiras, podadores, lavadoras de alta pressão, sopradores, pulverizadores, cortadores de grama, perfuradores de solo, ferramentas multifuncionais e outros. A figura 3.1 mostra uma foto aérea da STIHL Brasil.





FONTE: Google, 2023

3.2 DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

Conforme já mencionado no início deste trabalho, o estudo será realizado no sabre, que é uma chapa de aço carbono DIN - 50CrMo4, cujo as propriedades físicas, mecânicas e térmicas estão descritas no capítulo 2.8.1.1. O sabre é um componente do conjunto de corte de uma motosserra e tem a função de suporte e guia para a corrente de corte. Como as exigências mecânicas dessa peça são elevadas devido atrito gerado pela corrente de corte, em uma das etapas de fabricação é adicionado a ela, através do processo de soldagem à LASER, um componente chamado

Horseshoe, traduzido para o português como ferradura. Esta peça é fabricada de uma liga metálica conhecida como Stellite 6, cujo as propriedades estão descritas no capítulo 2.8.1.2. A ferradura tem a função de reduzir o desgaste por abrasão gerado pelo atrito da alta rotação da corrente de corte no sabre, aumentando assim a vida útil desta ferramenta; A figura 3.2 mostra a imagem de uma motosserra.



Figura 3.2 - Esboço resumido de uma motosserra

FONTE: STIHL, 2023

3.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

No processo de soldagem à LASER em geral, é comum a presença de alguns desvios na costura da solda, esses desvios dependendo da intensidade podem ser considerados defeitos ou não. Os defeitos mais comuns na costura da solda são:

<u>Crack</u> – são trincas ou rachaduras, causadas pela força de encolhimento da costura antes de ser completamente solidificada. Excesso de energia para soldagem e falta de pré-aquecimento podem gerar este defeito;

Estoma - são porosidades na costura, a poça fundida é profunda e a taxa de resfriamento é muito rápida, dificultando a saída dos gases formando poros;

<u>Undercut</u> – são rebaixos na costura de solda causados pela má integração "gap" entre os materiais;

<u>Spatter</u> – são respingos do material fundido causados devido as superfícies estarem sujas ou oleosas.

3.4 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE SABRES

Para entendermos melhor os defeitos de solda no processo de soldagem à LASER dos sabres, é importante conhecermos melhor um pouco do processo de fabricação desta peça.

O corpo do sabre é produzido a partir de uma chapa retangular de espessura 4,60 mm, larguras entre 82 mm e 106 mm e comprimentos entre 370 mm e 840 mm, de acordo com o modelo do sabre. O perfil do sabre é obtido através do processo de corte à LASER, como ilustra a figura 3.3.



Figura 3.3 – Sabre obtido a partir do processo de corte à LASER.

FONTE: Autor, 2023

O *Horseshoe* ou ferradura é produzido a partir de uma chapa retangular de 140 mm de largura, 3.000 mm de comprimento e 1,80 mm de espessura, onde desta chapa, é obtida aproximadamente 720 ferraduras através do processo de corte à LASER. Cada ferradura é cortada com o perfil levemente alongado e posteriormente é conformado mecanicamente até a obtenção do perfil final de solda, conforme ilustra a figura 3.4.



Figura 3.4 – Ferradura obtida através do processo de corte à LASER e posteriormente conformada mecanicamente até o perfil final.

FONTE: Autor, 2023

A união do corpo do sabre e da ferradura é realizada através do processo de soldagem à LASER, onde para cada corpo do sabre é soldado duas ferraduras, conforme mostra a figura 3.5.



Figura 3.5 A e B– União do corpo do sabre e das ferraduras através da soldagem à LASER.

FONTE: Autor, 2023

Na soldagem à LASER do sabre o defeito mais comum é o *Undercut*, rebaixo da costura de solda, esta falha na solda é gerada principalmente pela diferença entre o perfil da ponta do corpo do sabre e o perfil da ferradura. Pequenos "gaps" ao longo do perfil causam os rebaixos na costura da solda. Esses rebaixos quando ultrapassam 1/2 da profundidade da costura de solda, podem causar danos severos ao sabre, como a ruptura da costura de solda e perda total ou parcial da ferradura inutilizando a ferramenta. A figura 3.6 mostra um sabre que após algumas horas de uso teve a que ruptura da costura de solda e perda parcial da ferradura. Por segurança, as normas internas da STIHL (Norma STIHL - SWN44180) estabelecem um limite máximo para a profundidade do rebaixo de 1/3 da profundidade da costura de solda, ou seja, rebaixo menor que 0,60 mm.



Figura 3.6 – Sabre perda parcial da ferradura por ruptura da costura de solda.

FONTE: Autor, 2023

A figura 3.7 ilustra um esboço de uma costura de solda com a profundidade do rebaixo máximo de 0,6 mm.



Figura 3.7 – Esboço de um corte transversal de um rebaixo na costura de solda.

3.5 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O equipamento onde foi realizado os experimentos para este estudo é uma máquina especial de soldam à LASER construído para soldagem de sabres, denominada LAS005. Ela está equipada com um CNC (Comando Numérico Computadorizado) Siemens da série 840D de 8 eixos, sendo 3 deles (x, y e z) para movimentação da trajetória do cabeçote de solda e os demais eixos para movimentação dos mecanismos de transporte e fixação das peças. A figura 3.8 mostra a máquina LAS005 e seus principais módulos. A carga e descarga dos sabres é realizado por um robô Fanuc modelo M20i e este equipamento também utiliza um LASER de Fibra modelo YLS-3000 de 3 kW de potência, LASER infravermelho com comprimento de onda de 1,07 µm da marca IPG Photonics e condução do LASER por fibra ótica de 200 µm.

Figura 3.8 - A) Máquina de soldagem à LASER LAS005, B) Robô Fanuc M20i e LASER de fibra YLS-3000C)



FONTE: Autor (2023)

O cabeçote de solda utilizado no equipamento é o modelo P30-002416-003 da série FLW D50 da marca IPG Photonics. Este cabeçote possui colimador de 100 mm e distância focal de 250 mm. A figura 3.9 ilustra o cabeçote de solda.



Figura 3.9 – Cabeçote de solda IPG P30-002416-003.

FONTE: IPG Photonics, 2015

3.6 PARÂMETROS DO EXPERIMENTO

O método de pesquisa deste trabalho é experimental, onde foram definidas as variáveis de distância focal, potência do LASER e velocidade de soldagem, que tem maior influência no resultado da qualidade da soldagem. A figura 3.10 apresenta um fluxograma de como será distribuída a combinação das variáveis do experimento.



Figura 3.10 – Fluxograma do experimento.

FONTE: Autor, 2023

3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para análise dos resultados da qualidade da soldagem do sabre, foi avaliado a profundidade do rebaixo da costura da solda, a profundidade da costura da solda e as durezas da costura e da ZTA.

Para verificar a influência de cada variável do testada no processo, nos resultados das características avaliadas nos testes práticos, usou-se o método de correlação linear de Pearson.

O coeficiente de Pearson, também é uma medida estatística que avalia a relação linear entre duas variáveis contínuas. Ele mede a intensidade e a direção da associação linear entre as variáveis, variando de -1 a +1. O valor +1 indica uma correlação perfeita e positiva, o que significa que as duas variáveis têm uma relação linear positiva forte, ou seja, à medida que uma variável aumenta, a outra também aumenta de forma proporcional. O valor -1 indica uma correlação perfeita e negativa, o que significa que as duas variáveis forte, ou seja, à medida que uma variável aumenta, a outra também aumenta de forma proporcional. O valor -1 indica uma correlação perfeita e negativa, o que significa que as duas variáveis têm uma relação linear negativa forte, ou seja, à medida que uma variável aumenta, a outra diminui de forma proporcional. E o valor 0 indica ausência de correlação linear, ou seja, as duas variáveis não têm relação linear entre si. O valor de Pearson é determinado pela equação 3.1.

$$r = \frac{\sum_{1=1}^{n} (Xi - Xm\acute{e}dio)(Yi \acute{e}dio)}{(n-1)SxSy}$$
(3.1)

A tabela 3.1 ilustra a intensidade da associação linear do valor de r.

r	Definição
0,00 a 0,19	Correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

Tabela 3.1 – Tabela do coeficiente de correlação de Pearson

FONTE: Autor, 2023

3.7.1 Verificação da profundidade do rebaixo da costura de solda (Undercut)

Conforme descrito no item 3.4 a resistência da costura da solda de um sabre é comprometida quando a profundidade ultrapassa 1/2 da profundidade total da costura. A norma interna STIHL (SWN44180) especifica a profundidade máxima do rebaixo de 0,6 mm, ou seja, 1/3 da profundidade da costura. A verificação dessa profundidade foi verificada em equipamento de medição especial integrada à máquina de solda à LASER LAS005. Este equipamento utiliza um perfilômetro LASER 2D LJ-7000 da marca KEYENCE. A figura 3.11 ilustra respectivamente o equipamento especial de medição, o perfilômetro 2D e a apresentação dos resultados da leitura do perfilômetro construído no software Labview da desenvolvedora UNITES SYSTEMS.

Figura 3.11 – A) Equipamento para leitura do rebaixo da solda, B) Sensor de medição 2D LJ-7000 e C) Programa construído no Labview



FONTE: Autor, 2023

3.7.2 Profundidade da costura da solda

A profundidade da costura da solda foi obtida através de uma medição indireta realizada por um sistema de medição da temperatura da raiz da costura de solda. Quando ela ultrapassa uma profundidade maior que a espessura da ferradura soldada na extremidade do sabre, e a temperatura da raiz da costura deve ser entre 400°C e 700°C, como está esboçado na figura 3.12, assim o sabre tem uma costura de solda suficientemente resistente.

Figura 3.12 - Esboço do gráfico leitura da temperatura da raiz da costura



FONTE: Autor, 2023

As durezas da costura de solda e ZTA (zona termicamente afetada), foram verificadas através de ensaio destrutivo, onde foi retirado uma pequena secção transversal da região de solda e realizado a verificação das micro durezas na costura da solda e na ZTA, conforme ilustra a figura 3.13.



Figura 3.13 - Imagem de uma secção removida da região da solda

Conforme norma interna STIHL (SWN44180), a especificação da dureza da costura de solda é menor que 600 HV3 e a dureza da ZTA é entre 350 e 600 HV3. Ambas as durezas foram verificadas em durômetro digital modelo Q10A da marca Qness, conforme mostra a imagem 3.14, após o processo de revenimento da solda à 460°C por 16 minutos, conforme especifica a SWN44180.



Figura 3.14 – Imagem do durômetro modelo Q10A.

FONTE: Autor, 2023

FONTE: Autor, 2023

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho busca analisar a combinação dos seguintes parâmetros de soldagem: Distância do ponto focal, potência e velocidade do feixe LASER, que proporcionam juntas soldadas com menor profundidade do rebaixo do cordão de solda, maior profundidade da costura da solda e durezas da costura da solda e ZTA adequadas conforme especificado em norma interna STIHL (SWN44180).

4.1 PREPARAÇÃO DO EXPERIMENTO

Os valores dos parâmetros definidos para este experimento são: Distância focal de 0 mm, -2 mm e -4 mm, ou seja, o valor zero representa o ponto focal na superfície da peça e os valores negativos abaixo da superfície da peça. Potência do LASER de 2,2 e 3,0 kW e velocidade de soldagem de 3,5 e 5,0 m/min. A identificação do número do teste e a combinação dos parâmetros são mostrados na tabela 4.1.

Distância do foco (mm) Potência (kW) Velocidade (m,	/min)
Teste 1 -4,0 2,2 5,0	
Teste 2 -4,0 2,2 3,5	
Teste 3 -4,0 3,0 3,5	
Teste 4 -4,0 3,0 5,0	
Teste 5 -2,0 3,0 5,0	
Teste 6 -2,0 3,0 3,5	
Teste 7 -2,0 2,2 3,5	
Teste 8 -2,0 2,2 5,0	
Teste 9 0,0 2,2 5,0	
Teste 10 0,0 2,2 3,5	
Teste 11 0,0 3,0 3,5	
Teste 12 0,0 3,0 5,0	

Tabela 4.1 – Identificação das amostras e os parâmetros de cada uma.

FONTE: Autor, 2023

Todas as amostras foram fabricadas o mesmo modelo de sabre, as mesmas condições de processo e no mesmo dia, com o objetivo de minimizar as variáveis externas que possam influenciar no resultado das amostras.

Após a soldagem todas as peças foram revenidas à 460°C por no mínimo 16 minutos conforme especificado em norma interna STIHL.

4.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A normativa pede que sejam utilizadas 3 amostras com mesmas condições, o que não foi possível seguir devido a disponibilidade no número de corpos de prova, tendo em vista que foram realizadas apenas uma réplica de cada uma das 12 peças conforme apresentado na figura 4.1.





FONTE: Autor, 2023

4.3 ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DA COSTURA DE SOLDA

A primeira análise realizada após o processo de soldagem das amostras foi a verificação da profundidade da costura da solda. Ela é obtida através de uma medição indireta realizada por um sistema de medição da temperatura da raiz da costura de solda. O sistema que mede essa temperatura é constituído por 4 pirômetros LASER que realizam a leitura de temperatura de toda extensão da solda conforme demostrado na figura 4.2.



Figura 4.2 – Posição de medição dos pirômetros LASER.

FONTE: Autor, 2023

A figura 4.3 mostra o ponto exato de medição da temperatura na raiz da costura da solda durante a soldagem





FONTE: Autor, 2023

A figura 4.4 esboça o gráfico do sistema de medição da temperatura da raiz da costura de solda após a realização da medição de uma peça. Neste gráfico as linhas verticais representam os pontos extremos da região de medição e as linhas horizontais representam os limites de temperatura aceitáveis, de 400°C até 700°C, valores que garantem uma costura de solda suficientemente resistente. A linha de cor azul clara do gráfico representa a última medição realizada pelo sistema, a região de

cor cinza representa os limites entre a medição de menor temperatura e a medição de maior temperatura, já a linha de cor vermelha representa um valor médio da região de cor cinza.





FONTE: Autor, 2023

A figura 4.5 demonstra os gráficos de temperatura da raiz da costura da solda resultantes da medição pelo sistema de pirometria durante a realização do experimento. As imagens estão identificadas com a numeração de 1 a 12 conforme número do teste identificados na tabela 4.1.



Figura 4.5 – Resultados da medição de temperatura da raiz da costura de solda

FONTE: Autor, 2023

O gráfico 4.1 apresenta os resultados das temperaturas da raiz da costura da solda. As linhas de cor vermelha indicam os limites de temperatura, a linha tracejada na cor azul indica menor temperatura registrada na amostra. Já a linha tracejada na cor laranja indica a maior temperatura registrada. Por sua vez, a linha na cor verde indica a temperatura média de registrada para cada amostra.



Gráfico 4.1 – Temperaturas da raiz da costura de solda das amostras de 1 a 12



Como pode-se observar no gráfico 4.1, a amostra do ensaio número 1 apresentou temperatura média abaixo do limite inferior de especificação de 400°C. Já as amostras dos ensaios de número 2, 3, 5, 6, 7, 10, 11 e 12 apresentaram temperaturas médias acima do limite superior de especificação de 700°C. E somente as amostras dos ensaios 4, 8 e 9 não apresentaram temperaturas fora dos limites de especificação.

Sobre a amostra de número 1, este resultado de temperatura abaixo do especificado é resultado da combinação das variáveis utilizadas, pois neste teste foi utilizado a distância focal mínima de -4 mm, potência do LASER mínima de 2,2 kW e velocidade de soldagem máxima de 5,0 m/min. De todas as combinações de varáveis do experimento, esta culmina para uma menor potência efetiva da solda, resultando em uma costura de solda com menor profundidade. Em relação as amostras que apresentaram pontos de temperatura acima do limite, as amostras 2, 3, 6, 7, 10 e 11 foram fabricadas com a velocidade mínima de 3,5 m/min e as amostras 3, 5, 6, 11 e 12 com a potência máxima do LASER de 3,0 kW. Ambas as condições de soldagem proporcionam maior potência efetiva da solda, resultando em uma costura de solda

Observando a linha verde da temperatura média, podemos observar que as amostras de número 3, 6 e 11, apresentaram pontos médios acima do limite superior de especificação. Isso se justifica, pois, essas amostras foram fabricadas com velocidade mínima do experimento de 3,5 m/min e a potência máxima 3,0 kW. A combinação dessas duas variáveis proporciona maior potência efetiva da solda resultando em uma costura de solda de maior profundidade.

Outra forma de obtenção dos valores de profundidade do cordão de solda é através de um teste destrutivo, onde é cortado uma seção transversal da região soldada da peça em análise e após preparado o corpo de prova é analisado microscopicamente, conforme mostrado na figura 4.6.



Figura 4.6 - imagem ampliada em 50X do corte transversal da solda

FONTE: Autor, 2023

Os resultados da análise de profundidade do cordão de solda conforme o método mostrado na figura 4.6 estão representados no gráfico 4.2. Onde os valores de profundidade obtido nas amostras estão representados pelas barras de cor azul. A profundidade mínima aceitável para que o cordão de solda atinja toda a espessura da ferradura é de 1,8 mm, representado pela linha de cor vermelha e a linha de cor laranja indica a profundidade máxima aceitável para o cordão de solda, que é 2,3, ou seja, a metade da espessura do corpo do sabre.



Gráfico 4.2 – Profundidade do cordão de solda

Como pode ser observado no gráfico 4.2, a mostra do ensaio número 1 apresentou a profundidade do cordão de solda menor que o mínimo aceitável de 1,8 mm. Já as amostras dos ensaios de número 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10 e 11 apresentaram a profundidade maior que o máximo aceitável de 2,3 mm para o cordão de solda. E somente as amostras dos ensaios número 8, 9 e 12 ficaram com a profundidade dentro dos limites aceitáveis.

Assim como na análise de profundidade do cordão de solda obtida indiretamente por medição de temperatura da raiz do cordão, a medição da profundidade obtida diretamente pela análise microscópica do corpo de prova, mostra um comportamento muito similar da profundidade. Esta comparação é mostrada no gráfico 4.3.



Gráfico 4.3 – Comparativo dos valores de profundidade do cordão de solda por temperatura e por medição direta

FONTE: Autor, 2023

No gráfico 4.3, a linha de cor verde representa as medições de temperatura média da raiz do cordão do cordão de solda das amostras obtida no sistema de pirometria da máquina de solda. Já a linha de cor laranja representa as medições de comprimento do cordão de solda obtidas microscopicamente.

Abaixo estão apresentados alguns gráficos de dispersão mostrando a correlação entre a profundidade do cordão de solda e os parâmetros estudados utilizando o método de correlação de Pearson descrito no item 3.7.

Observando o gráfico de dispersão 4.4, verifica-se a correlação entre a profundidade do cordão de solda e a distância focal.



Gráfico 4.4 – Correlação entre a profundidade do cordão de solda e a distância focal

O valor da correlação linear é r = 0,143 o que significa uma correlação positiva muito fraca entre os resultados de profundidade do cordão de solda e a variável distância focal.

Já o gráfico de dispersão 4.5, podemos ver a correlação entre a profundidade do cordão de solda e a potência do LASER.



Gráfico 4.5 – Correlação entre a profundidade do cordão de solda e a potência do LASER

O valor da correlação linear é r = 0,563 o que significa uma correlação positiva moderada entre os resultados de profundidade do cordão de solda e a variável potência do LASER.

O próximo gráfico de dispersão 4.6, mostra a correlação entre a profundidade do cordão de solda e a velocidade.



Gráfico 4.6 – Correlação entre a profundidade do cordão de solda e a velocidade de soldagem

FONTE: Autor, 2023

FONTE: Autor, 2023

O valor da correlação linear é r = - 0,765 o que significa uma correlação negativa forte entre os resultados de profundidade do cordão de solda e a variável velocidade de soldagem.

Como pode-se observar nos gráficos 4.4, 4.5 e 4.6, a profundidade do cordão de solda tem uma correlação positiva muito fraca com a distância focal, uma correlação positiva moderada com a potência do LASER e uma correlação negativa forte com a velocidade de soldagem. Em outras palavras, a profundidade do cordão de solda foi pouco influenciada pela alteração da distância focal, porém tende-se a aumentar com o aumento da potência do LASER e é diminuída significativamente com o aumento da velocidade de soldagem.

4.4 ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DO REBAIXO DO CORDÃO DE SOLDA (UNDERCUT)

Após o processo de soldagem, todas as peças passaram pela análise dimensional em equipamento especial de medição com perfilômetro 2D, modelo LJ-7000 da marca KEYENCE. O sistema de medição faz uma varredura em toda extensão do cordão de solda, comprimento de 206 mm, neste comprimento é coletado 1838 pontos, à uma velocidade de 26,7 mm/s resultando numa taxa de coleta de 238 pontos por segundo. O sistema reprova a peça que apresentar um ou mais pontos com a profundidade do rebaixo maior que 0,6 mm, conforme especificação normativa STIHL (SWN44180). A figura 4.7 esboça um desenho com as duas peças soldadas e a região do cordão de solda.





FONTE: Autor, 2023

A figura 4.8 esboça o gráfico do sistema de medição após a realização da medição de uma peça. Neste gráfico a linha vermelha representa a varredura de pontos da profundidade do rebaixo do cordão de solda, a linha branca é o histórico das últimas medições, podendo armazenar as últimas 25 medições. Já a linha amarela é o limite máximo do rebaixo do cordão de solda. Os valores do gráfico estão no quadrante negativo por se tratar de uma medida de profundidade.



Figura 4.8 – Esboço do gráfico após a medição da profundidade do rebaixo da solda.

A figura 4.9 demonstra os gráficos do sistema de medição da profundidade do rebaixo da solda durante a realização do experimento. As imagens estão identificadas com a numeração de 1 a 12 conforme número do teste identificados na tabela 4.1.



Figura 4.9 - Resultados da medição da profundidade do rebaixo da solda

FONTE: Autor, 2023

O gráfico 4.7 apresenta através das barras, os resultados da profundidade máxima do rebaixo do cordão de solda das 12 amostras do experimento. Já a linha de cor vermelha é o limite de especificação de 0,6 mm.



Gráfico 4.7 – Gráfico dos resultados de profundidade do rebaixo da solda

Após a análise dimensional das amostras, é possível notar no gráfico 4.7 que as amostras 3, 6 e 11 apresentaram profundidade do rebaixo do cordão de solda maior que 0,6 mm, conforme especificação normativa. Essas amostras foram fabricadas com velocidade mínima do experimento de 3,5 m/min e a potência máxima 3,0 kW. A combinação dessas duas variáveis proporciona maior potência efetiva da solda. Esta potência efetiva em nível muito alto, e intensificada pela posição focal de 0 e -2 mm, conforme realizado nas amostras 6 e 11, danificou o cordão de solda aumentando significativamente a profundidade do rebaixo da solda.

Abaixo estão apresentados alguns gráficos de dispersão mostrando a correlação entre a profundidade do rebaixo da solda e os parâmetros estudados utilizando o método de correlação de Pearson descrito no item 3.7.

Observando o gráfico de dispersão 4.8, verificamos a correlação entre a profundidade do rebaixo da solda e a distância focal.

FONTE: Autor, 2023



Gráfico 4.8 - Correlação entre a profundidade do rebaixo da solda e a distância focal

FONTE: Autor, 2023

O valor da correlação linear é r = -0,282 o que significa uma correlação negativa fraca entre os resultados de profundidade do rebaixo da solda e a variável distância focal.

Já o gráfico de dispersão 4.8, mostra a correlação entre a profundidade do rebaixo da solda e a potência do LASER.



Gráfico 4.9 - Correlação entre a profundidade do rebaixo da solda e a potência do LASER

FONTE: Autor, 2023

O valor da correlação linear é r = 0,488 o que significa uma correlação positiva moderada entre os resultados de profundidade do rebaixo da solda e a variável potência do LASER.

E o gráfico de dispersão 4.8, mostra a correlação entre a profundidade do rebaixo da solda e a velocidade de soldagem.



Gráfico 4.10 - Correlação entre a profundidade do rebaixo da solda e a velocidade de soldagem

O valor da correlação linear é r = -0,532 o que significa uma correlação negativa moderada entre os resultados de profundidade do rebaixo da solda e a variável velocidade de soldagem.

Como pode-se observar nos gráficos 4.8, 4.9 e 4.10, a profundidade do rebaixo da solda tem uma correlação fraca com a distância focal, uma correlação positiva moderada com a potência do LASER e uma correlação negativa moderada com a velocidade de soldagem. Em outras palavras, a profundidade do rebaixo da solda não foi influenciada significativamente pela alteração da distância focal, porém tende-se a aumentar com o aumento da potência do LASER e é diminuída com o aumento da velocidade de soldagem.

FONTE: Autor, 2023

4.5 DUREZA DA COSTURA DE SOLDA E ZTA

A verificação das durezas do cordão de solda e da ZTA (zona termicamente afetada), estão apresentados no gráfico 4.11, onde a linha de cor verde representa a dureza da costura da solda, a linha de cor azul representa as durezas da ZTA, a linha de cor laranja representa o limite inferior mínimo de dureza da ZTA e a linha de cor vermelha representa o limite superior de dureza tanto para a costura da solda quanto para a ZTA. Já o limite inferior de dureza da costura de solda não está representado pois é zero.



FONTE: Autor, 2023

Após a análise das amostras, é possível observar que as amostras de número 2, 3, 4, 6, 7 e 11 apresentaram a dureza acima de 600 HV3, limite superior de especificação. Para ZTA, todas as amostras apresentaram a dureza uniforme e muito próximo do valor nominal da especificação.

Fazendo uma breve análise das durezas da costura de solda que ficaram acima de 600 HV3, é possível notar que todas as amostras foram produzidas, ou com a potência do LASER em 3,0 kW, ou com a velocidade de soldagem de 3,5 m/min, ou no caso das amostras de número 3 e 11, com as duas condições juntas. Em outras palavras, essas amostras são as que tiveram os maiores resultados de profundidade do cordão de solda. No gráfico 4.12 podemos observar um comportamento semelhante entre a linha que representa a dureza do cordão de solda e a linha que representa a profundidade do cordão de solda.



Gráfico 4.12 – Comparação gráfica entre a dureza e a profundidade do cordão de solda.

FONTE: Autor, 2023

Também podemos observar uma correlação entre dureza e profundidade do cordão de solda através do gráfico de dispersão 4.13.



Gráfico 4.13 – Correlação entre a dureza e a profundidade do cordão de solda.



O valor da correlação linear é r = 0,706 o que significa uma correlação positiva de moderada à forte entre os resultados de dureza e profundidade da solda.

Em geral quando se realiza um processo de soldagem à LASER utilizando os parâmetros de soldagem inadequados para uma determinada condição de processo, podemos causar alguns defeitos na junta soldada, o mais comum são as trincas, que podem aparecer basicamente por dois fatores principais:

<u>Tensões térmicas</u>: Durante o processo de soldagem, o metal fundido se expande e contrai à medida que esfria. Se o cordão de solda for muito profundo, a diferença nas temperaturas entre o metal fundido e o metal base pode gerar tensões térmicas significativas. Essas tensões podem levar à formação de trincas no cordão de solda ou nas regiões adjacentes.

<u>Sobrecarga de calor</u>: Quando um cordão de solda muito profundo é depositado, é aplicada uma quantidade excessiva de calor na região de soldagem. Isso pode resultar em um aumento na temperatura do metal base próximo à zona de fusão, o que pode causar o enfraquecimento do material e a formação de trincas.

Algumas das amostras do experimento apresentaram trincas internas ou externas no cordão de solda, conforme está mostrado na figura 4.10.



Figura 4.10 – Corpos de prova que apresentaram trincas no cordão de solda.

FONTE: Autor, 2023

Como podemos observar, as amostras dos ensaios de número 3, 6, 7 e 11 apresentaram trincas na costura da solda. Se observarmos novamente o gráfico 4.6 mostrado anteriormente, essas amostras apresentam valores de dureza da costura da solda e profundidade do cordão de solda maiores que a maioria das amostras.

Abaixo estão apresentados alguns gráficos de dispersão mostrando a correlação entre a dureza da solda e os parâmetros estudados utilizando o método de correlação de Pearson descrito no item 3.7.

Observando o gráfico de dispersão 4.14, verificamos a correlação entre a dureza da solda e a distância focal.



FONTE: Autor, 2023

O valor da correlação linear é r = 0,396 o que significa uma correlação positiva fraca entre o resultado de dureza da solda e a variável distancia focal.

Observando o gráfico de dispersão 4.15, verificamos a correlação entre a dureza da solda e a potência do LASER.



Gráfico 4.15 – Correlação entre a dureza da solda e a potência do LASER.



O valor da correlação linear é r = 0,209 o que significa uma correlação positiva fraca entre o resultado de dureza da solda e a variável potência do LASER.

Observando o gráfico de dispersão 4.16, verificamos a correlação entre a dureza da solda e a velocidade de soldagem.



Gráfico 4.16 - Correlação entre a dureza da solda e a velocidade de soldagem.

O valor da correlação linear é r = -0,611 o que significa uma correlação negativa moderada entre o resultado de dureza da solda e a variável velocidade de soldagem.

Como podemos observar nos gráficos 4.14, 4.15 e 4.16, a dureza do cordão de solda tem uma correlação fraca com a distância focal e com a potência do LASER, e uma correlação negativa moderada com a velocidade de soldagem. Em outras palavras, a dureza do cordão de solda não foi influenciada pela alteração da distância focal nem potência do LASER, mas foi reduzida com o aumento da velocidade de soldagem.

4.6 LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA

Outra característica que foi possível avaliar após realização do experimento foi a largura do cordão de solda. Está característica pode ser importante para redução das falhas de soldagem, mais especificamente o *undercut*.

O gráfico 4.17 apresenta os valores de largura do cordão de solda das amostras do experimento.





Abaixo estão apresentados alguns gráficos de dispersão mostrando a correlação entre a largura do cordão de solda e os parâmetros estudados utilizando o método de correlação de Pearson descrito no item 3.7.

Observando o gráfico de dispersão 4.18, verificamos a correlação entre a largura do cordão de solda e distância focal.



Gráfico 4.18 - Correlação da largura do cordão de solda com a distância focal

FONTE: Autor, 2023

O valor da correlação linear é r = -0,047 o que significa uma correlação negativa bem fraca entre o resultado de largura do cordão de solda e a variável distância focal.

Já o gráfico 4.19, mostra a correlação entre a largura do cordão de solda e potência do LASER.



Gráfico 4.19 - Correlação da largura do cordão de solda com a potência do LASER



O valor da correlação linear é r = -0,345 o que significa uma correlação negativa fraca entre o resultado de largura do cordão de solda e a variável potência do LASER.

E o gráfico 4.20, mostra a correlação entre a largura do cordão de solda e a velocidade de soldagem.



Gráfico 4.20 - Correlação da largura do cordão de solda com a velocidade de soldagem



O valor da correlação linear é r = -0,123 o que significa uma correlação negativa bem fraca entre o resultado de largura do cordão de solda e a variável velocidade de soldagem.

Como podemos observar nos gráficos 4.18, 4.19 e 4.20, a largura do cordão de solda tem uma correlação negativa fraca com a distância focal, potência do LASER e

velocidade de soldagem. Em outras palavras, a largura do cordão de solda não foi influenciada significativamente pelas variáveis dos testes.

4.7 RESUMO DOS RESULTADOS

Segue abaixo a tabela 4.2 que ilustra de outra forma, as correlações entre todas as características avaliadas e as variáveis do experimento.

	Distância focal	Potência do laser	Velocidade de soldagem
Profundidade do cordão de solda	Positiva bem fraca	Positiva moderada	Negativa forte
Profundidade da falha de solda	Negativa fraca	Positiva moderada	Negativa moderada
Dureza da costura da solda	Positiva fraca	Positiva fraca	Negativa moderada
Largura do cordão de solda	Negativa bem fraca	Negativa fraca	Negativa bem fraca

Tabela 4.2 - Correlações entre característica avaliadas e variáveis do teste

FONTE: Autor, 2023

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES DO PRESENTE TRABALHO

Constantemente são propostas novas alternativas aos processos produtivos em geral com o objetivo de redução de custo, aumento da lucratividade e competitividade. Trabalhos como este servem de base técnica para implementação de melhorias buscando a otimização e a excelência dos processos.

Este estudo tem uma contribuição importante na otimização do processo de soldagem à LASER de sabres de motosserras e em outros processos de soldagem à LASER que utilizam materiais e características similares.

Os experimentos realizados para obtenção dos resultados mostraram a influência dos principais parâmetros estudados, no resultado da soldagem à LASER do Sabre.

Dos 12 testes realizados no experimento, apenas 3 apresentaram os resultados de profundidade do cordão de solda conforme as especificações do produto. Aplicando o método de correlação de Pearson, concluímos que a profundidade do cordão de solda tem uma correlação forte com a velocidade de soldagem. Ou seja, a profundidade aumentou com a redução da velocidade. A potência do LASER também tem uma correlação com a profundidade do cordão de solda, porém menor que a velocidade. Já a distância focal tem uma correlação muito fraca com a profundidade do cordão de solda.

Para a profundidade do rebaixo da solda (falha de solda), dos 12 testes realizados, 9 deles apresentaram a profundidade do rebaixo dentro das especificações de produto. A profundidade do rebaixo da solda tem uma correlação moderada com a potência do LASER e com a velocidade de soldagem, e uma correlação baixa com a distância focal.

Já para a dureza do cordão de solda, dos 12 testes realizados, 6 deles apresentaram dureza dentro da especificação de produto. Pelo método de Pearson, somente a velocidade de soldagem apresentou correlação significativa com a dureza do cordão de solda.

E para a largura do cordão de solda, não existe especificação de produto, porém esta característica foi avaliada para conhecer o comportamento das variáveis de soldagem sobre ela. O resultado é que nenhuma das variáveis estudada teve uma correlação significativa sobre a largura do cordão de solda. Após a análise dos dados podemos concluir que potência do LASER e a velocidade de soldagem são os parâmetros que têm maior influência sobre os resultados da solda, principalmente sobre a profundidade do rebaixo da solda. Para redução da taxa de rejeição de peças no processo de soldagem de sabre, a combinação ideal desses dois parâmetros precisa ser revista.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para continuação deste trabalho no processo produtivo de sabres, poderia ser realizado um DOE (*Design of Experiments*) para identificar os valores ideais de trabalho das variáveis aqui estudadas.

E para ouros trabalhos, poderia ser realizado um estudo da influência do alinhamento do cordão de solda em união de peças. Com o objetivo de reduzir as taxas de falhas de solda causadas por essa variável.

REFERÊNCIAS

VILLANI, P. et al. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 4. ed. São Paulo: GEN LTC, 2017.

GEARY, D.; MILLER, R. Soldagem. Porto Alegre, 2013.

VICENTE, A. Detecção de dano em juntas soldadas por análise de vibrações, correntes induzidas e ultrassons. Lisboa, 2019.

SILVA, V. et al. **Aplicação de ensaios não destrutivos no processo de fabricação de bases metálicas dos elevadores cremalheira.** Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, 2017.

JACOB, F. 6 Defeitos comuns em soldas de eletrodo revestido e como evitálos. 2020.

GROOVER, M. P. Introdução aos Processos de Fabricação. São Paulo: GEN LTC, 2017.

SCHNAID, F.; ODEBRECCHT, E. Ensaios de Campo: e Suas Aplicações à Engenharia de Fundações. 2. ed. São Paulo, 2012

LEITE, D. U. et al. Ensaios para determinação de resistência em juntas soldadas. 2017.

GEARY, D.; MILLER, R. Soldagem. Porto Alegre, 2013.

WAINER, et al. Soldagem: Processos e Metalurgia. 4.ed. São Paulo, 2004.

KATAYAMA, S. Handbook of LASER Welding Technologies: E.U.A., 2013.

LIN, Z.; et al. **Deposition of Stellite 6 alloy on steel substrates using wire and arc additive manufacturing.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020.

PEREIRA, B. Inspeção de juntas soldadas. Portugal, 2020.

CASTRO, N.; et al. **Ensaios para determinação de resistência em juntas soldadas**. Belo Horizonte, 2018.

KAVAMURA, H. Aplicação de solda LASER em carrocerias automotivas, estudo comparativo entre a solda LASER e a solda por resistência. São Paulo, 2007.

MODENESI, P.; et al. Introdução à metalurgia da soldagem. Belo Horizonte, 2012.

GIMENES-JR, L.; RAMALHO J. P. **Soldagem LASER**. São Paulo: INFOSOLDA Website, 2012.

TIGRE-JR, A.; FOLHA, M. Análise de juntas soldadas por processos de soldagem TIG e eletrodo revestido através de técnicas de inspeção não destrutivas. São Mateus, 2020.

RUGA, L. Solda a LASER em tambores de embreagem. Porto Alegre, 2020.

SANTOS, G. Avaliação da soldagem com LASER empregando pó no revestimento de aço inoxidável Superduplex com liga de cobalto Stellite 6. Rio de Janeiro, 2015.

LIMA, C. et al. Estudo comparativo das propriedades de revestimentos a base de cobalto (Stellite) aplicados por soldagem e por aspersão térmica. Fortaleza, 1998.

VEIGA, M, et al. Deposição a LASER de Superliga à Base de Cobalto sobre Aço Inoxidável Austenítico. SCIELO Website, 2021.

MAXIMO, A. Comparação entre a soldagem de chapas finas de Tântalo e Monel 400 com LASER pulsado de ND:YAG e com LASER contínuo de fibra. São Paulo, 2015.

WEBSITE. 50CrMo4 Steel. Steel Data Website, 2023.

WEBSITE. 50CrMo4 EN 10083-3. Matweb Website, 2023.

WEBSITE. Stellite 6. Rijeza Website, 2023.