



**ALENIKISON MONTEIRO DOS SANTOS, LARISSA MATHIELO MORO,
GUILHERME SOUZA DE BORTOLI**

**ANÁLISE DO PROCESSO PRODUTIVO E PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A LASER EM
COMPARAÇÃO AO PROCESSO POR ELETRODO REVESTIDO**

ARACRUZ

2024

Alenikison Monteiro dos Santos, Larissa Mathielo Moro, Guilherme Souza de Bortoli

**ANÁLISE DO PROCESSO PRODUTIVO E PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A LASER EM
COMPARAÇÃO AO PROCESSO POR ELETRODO REVESTIDO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Faculdades
integradas de Aracruz como requisito
parcial a obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Orientador(a): Prof. Guilherme Induzzi
Rosalem

ARACRUZ

2024

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todas as pessoas, familiares e amigos, que nos ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, mesmo que indiretamente, com o apoio e paciência.

Ao nosso orientador, Prof. Guilherme Induzzi Rosalem e Prof. Patrik Borges do Nascimento Leal, pela dedicação e paciência nos atendimentos. A todos os professores pelas dicas e orientações prestadas ao grupo, que mesmo não sendo nossos orientadores, disponibilizaram um pouco de seu tempo para nos atender, o que nos levou ao desenvolvimento de muitas ideias. Agradecemos também ao Vagner pela disposição de seu tempo em nos auxiliar com conceitos técnicos e a disponibilização do laboratório para a realização deste trabalho e agradecemos à empresa Corte em Laser Aracruz, na pessoa de seu proprietário, Sr. José, pelo apoio e parceria durante a realização deste trabalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é realizar a comparação dos processos produtivos e propriedades mecânicas entre a mais nova técnica de soldagem a laser e uma das técnicas mais utilizadas em meio industrial, soldagem por eletrodo revestido. A revisão bibliográfica desse trabalho visa apresentar as características dos diversos tipos de soldagens disponíveis no mercado, apresentando as suas propriedades e aplicações, juntamente apresenta de forma detalhada as principais propriedades que define uma solda de qualidade, como também as técnicas e ensaio utilizados para a medição de tais características.

Palavras-chave: Soldagem, Solda a Laser, Propriedades mecânicas, Ensaio mecânicos.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Definição do processo de soldagem a laser

Figura 2 - Processo de soldagem a arco elétrico

Figura 3 - Processo de soldagem TIG

Figura 4 - Esquema ilustrativo do ensaio de tração

Figura 5 - Esquema ilustrativo do ensaio de dureza por penetração Brinell

Figura 6 – Preparo do corpo de prova

Figura 7 – Preparo dos chanfros

Figura 8 – Chanfro da solda em V, 60°

Figura 9 – Aplicação da soldagem por eletrodo

Figura 10 – Aplicação da soldagem a laser

Figura 11 – Corte dos corpos de prova

Figura 12 – Corpos de prova

Figura 13 – Fluxo, Inspeção por líquido penetrante

Figura 14 – Máquina EMIC – GR044

Figura 15 – Instalação dos corpos de prova na máquina de tração

Figura 16 – Líquido penetrante na soldagem a laser

Figura 17 – Líquido penetrante na soldagem por eletrodo

Figura 18 – Resultado do corpo de prova (Eletrodo) após ensaio de tração

Figura 19 – Resultado do corpo de prova (Laser) após ensaio de tração

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação da deformação em relação a Força – Eletrodo 1

Gráfico 2 - Variação da deformação em relação a Força – Eletrodo 2

Gráfico 3 - Variação da deformação em relação a Força – Eletrodo 3

Gráfico 4 - Variação da deformação em relação a Força – Laser 1

Gráfico 5 - Variação da deformação em relação a Força – Laser 2

Gráfico 6 - Variação da deformação em relação a Força – Laser 3

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de tração – Eletrodo Revestido.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de tração – Laser

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ZTA - Zona Termicamente Afetada.

TIG - *Tungsten Inert Gas*.

MIG - *Metal Inert Gas*.

MAG - *Metal Active Gas*.

LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

PoD - *Probability of Detection*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS.....	11
2.1	Objetivo Geral	11
2.2	Objetivos Específicos.....	11
3	REVISÃO DA LITERATURA	12
3.1	Técnicas de Soldagem	12
3.1.1	Solda a Laser.....	12
3.1.2	Solda por Eletrodo revestido.....	14
3.1.3	Solda MIG e MAG.....	15
3.1.4	Solda TIG.....	16
3.2	Tipos de Ensaio	17
3.2.1	Ensaio de tração	18
3.2.2	Inspeção por líquido penetrante.....	19
3.2.3	Ensaio de dureza	19
3.3	Tensões residuais.....	20
3.3.1	Fadiga	21
3.3.2	Fratura frágil.....	21
3.3.3	Trincas	22
3.3.4	Corrosão	23
3.3.5	Instabilidade dimensional.....	23
3.4	Trabalhos Publicados.....	23
4	METODOLOGIA	26
4.1	Preparo do corpo de prova	26
4.2	Realização das soldas	27
4.3	Corte de peça	28
4.4	Realização dos ensaios não destrutivos.....	28
4.5	Realização do ensaio destrutivo	29
4.5.1	Ensaio de tração	29
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO	31
5.1	Inspeção das peças soldadas.....	31
5.1.1	Inspeção soldagem a laser	31
5.1.2	Inspeção soldagem por eletrodo Revestido.....	32

5.1.3	Análise Comparativa.....	32
5.2	Realização dPropriedades Mecânicas - Ensaio de Tração	33
5.3	Aplicações em Cenários Distintos.....	37
5.4	Limitações e Considerações Futuras.....	38
6	REFERÊNCIAS	39
7	Glossário.....	41

1 INTRODUÇÃO

Novos processos e produtos são continuamente estudados e aplicados na indústria, o que causa impacto evidente no processo produtivo, na economia e na proteção ao meio ambiente (CARVALHO, 2012). Atualmente as técnicas de soldagem desempenham um papel crucial em meio as indústrias, oferecendo diversas contribuições significativas para a fabricação e manutenção de uma ampla variedade de produtos e materiais metálicos e poliméricos.

Segundo Villena (2021, pg.1), “a deterioração das propriedades mecânicas em componentes soldados por processos de soldagem convencionais geralmente é atribuída a um alto *input* de calor, que produz alterações na microestrutura, tensões residuais, distorções e imperfeições no cordão de solda. Isso leva à busca por soluções que sejam produtivamente eficientes e aproveitem a alta resistência dos aços.” Como por exemplo a laser.

Com a implementação da soldagem a laser no mercado, ela vem ganhando destaque em meio as diversas variedades de técnicas, isso se dá pelo fato de tal técnica resguardar em muitas das vezes a integridade do material mesmo após a aplicação de uma alta temperatura em sua estrutura, característica a qual as demais técnicas como a solda por eletrodo revestido não trazem como propriedade.

Consequentemente, à medida que essa tecnologia ganha cada vez mais relevância em suas aplicações, a qualidade das juntas soldadas a laser vem se tornando uma preocupação entre especialistas, devido ao fato de ser uma técnica pouco utilizada, portanto, pouco estudada e validada quanto ao seu nível de eficácia em certos meios, gerando um certo nível de incerteza quanto as suas aplicações.

Logo, com a intenção de garantir a integridade estrutural e o desempenho dos produtos fabricados com juntas soldadas a laser, é essencial a realização de ensaios de resistência específicas para essa técnica. Portanto, busca-se com esse tema, explorar a importância e a eficiência dos ensaios de resistência em juntas soldadas a laser e compará-la com as propriedades do eletrodo revestido. Investigando como esses ensaios desempenham um papel vital na avaliação da qualidade das juntas soldadas, na identificação de possíveis defeitos e na garantia da segurança em diversas aplicações da indústria moderna.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar as propriedades mecânicas de um cordão de solda a laser em comparação ao cordão de solda por eletrodo revestido, a fim de comparar as suas propriedades dentre uma aplicação específica.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar as soldagens a laser e eletrodo revestido nos corpos de prova.
- Analisar a qualidade da solda através do ensaio visual e inspeção por líquidos penetrante.
- Analisar as propriedades mecânicas das duas soldas através dos ensaios de tração.
- Comparar os resultados obtidos entre cada um dos processos de soldagem com o auxílio de ferramentas de comparações estatísticas.
- Com base nos resultados obtidos, direcionar a aplicação mais adequada para cada técnica de soldagem.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão abordadas as principais definições sobre os diferentes tipos de solda presentes no mercado e os principais conceitos para definição de uma boa junta soldada, juntamente com os diversos métodos de ensaio para possíveis mensuração desses parâmetros.

3.1 Técnicas de Soldagem

Segundo Villani (2017), a fusão de metais é classificada em duas categorias principais. A primeira envolve a aplicação de forças macroscópicas, como aquelas utilizadas em processos como parafusagem e rebitagem, onde nesses métodos, a resistência da junta resulta da resistência ao cisalhamento dos elementos de fixação e da força de atrito entre as superfícies. A segunda categoria se baseia em forças microscópicas, interatômicas e intermoleculares, como ocorre em processos de soldagem, brasagem e colagem. Nessas abordagens, a união é alcançada por meio da aproximação dos átomos ou moléculas das peças a serem unidas.

Villani (2017) complementa que entre os processos mencionados, a soldagem destaca-se como um dos principais método para a união de materiais na esfera industrial, sendo amplamente empregada desde a indústria microeletrônica até a fabricação de grandes estruturas. Embora a soldagem seja tradicionalmente considerada um processo de união, na contemporaneidade, diversos processos de soldagem, ou suas variantes, são empregados para a deposição de material sobre uma superfície, com o intuito de recuperar peças desgastadas ou criar revestimentos com propriedades especiais. Diferentes processos associados à soldagem também são utilizados para o corte de peças metálicas, apresentando semelhanças significativas com operações de soldagem em diversos aspectos.

3.1.1 Solda a Laser

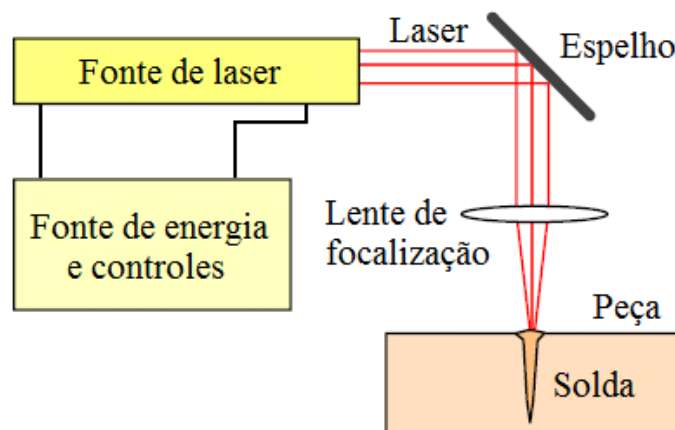
Segundo Einstein (1917), citado por KLEPPNER (2005), após a teoria da relatividade, Einstein, publicou uma pesquisa descrevendo o terceiro processo de

integração da matéria, a emissão estimulada de radiação e assim forneceu os princípios teóricos para um novo tipo de luz. Posteriormente, Gold chamou-o de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação), e o processo ficou conhecido pela sigla LASER.

Segundo Katayama (2013), desde o reconhecimento inicial do feixe LASER, diversos tipos característicos de LASERs, como o LASER CO₂, o LASER YAG, o LASER de Diodo, o LASER de Disco e o LASER de Fibra, têm desempenhado papéis significativos na indústria, sendo amplamente empregados em diversos processos, tais como corte, gravação, soldagem, brasagem, modificação de superfície, endurecimento por transformação, revestimento e recozimento.

Katayama (2013) acrescenta que a soldagem é o método mais versátil e pragmático para a união de materiais na construção de produtos em diversos setores industriais. Um LASER representa uma fonte de calor com alta densidade de potência. Dessa forma, a soldagem a LASER é reconhecida como um processo avançado para a junção de materiais, utilizando um feixe de LASER com elevada densidade de energia e potência. A Figura 1 apresenta de forma clara a definição do processo de soldagem a laser, dês de sua fonte de energia ao feixe de luz a ser concentrado no material a ser soldado.

Figura 1 - Definição do processo de soldagem a laser.



Fonte: fornecida pela UFMG – Paulo Modenesi.

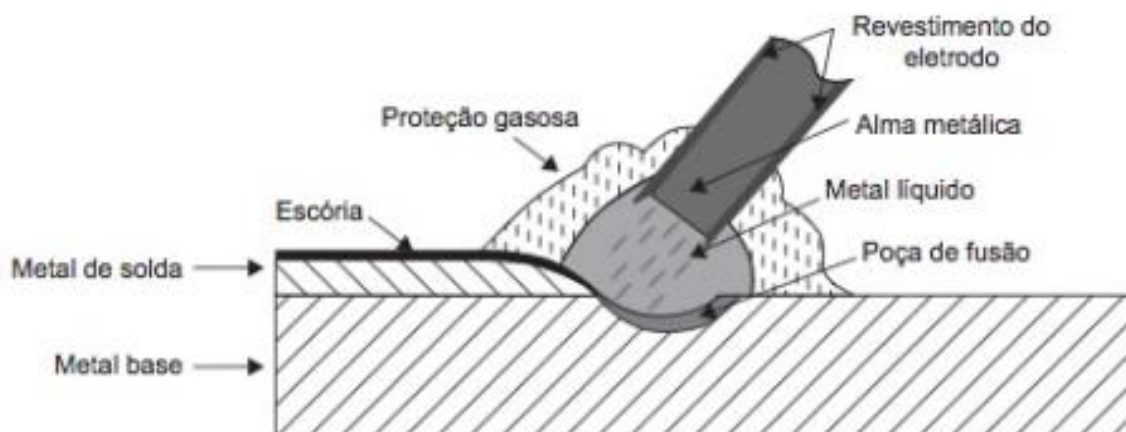
Katayama (2013) destaca que, dentre todos os métodos de soldagem, a soldagem a LASER tem a capacidade de ser aplicada tanto em juntas metálicas quanto em juntas poliméricas, abrangendo desde placas extremamente finas, com aproximadamente 0,01 mm de espessura, até placas mais espessas, chegando a cerca de 50 mm. A soldagem a LASER alcançou considerável popularidade como uma solda caracterizada por sua alta qualidade, precisão, desempenho, velocidade, flexibilidade e baixa distorção.

3.1.2 Solda por Eletrodo revestido

Segundo Dos Santos (2015), a técnica de soldagem por eletrodo revestido fundamenta-se na utilização de uma fonte geradora de energia responsável por fornecer elétrons a um material metálico. Quando esses elétrons se encontram com o metal de base, que possui polaridades diferentes, ocorre uma atração mútua e ionização, resultando na formação do arco elétrico. Esse arco elétrico, por sua vez, é essencial para que a energia gerada possa fundir o metal de adição ao metal de base.

Dos Santos (2015) explica que o arco de soldagem é gerado quando uma corrente elétrica flui entre uma barra de metal, que desempenha o papel de metal de adição (ou eletrodo), podendo corresponder ao polo negativo (cátodo), e o metal de base, que pode corresponder ao polo positivo (ânodo).

Figura 2 - Processo de soldagem a arco elétrico



Fonte: Dos Santos (2015)

Dos Santos (2015) complementa que para a geração do arco elétrico, é imperativo que o eletrodo entre em contato com o metal de base a fim de fechar o circuito. Uma vez que os elétrons percorrem o eletrodo em direção à peça, o arco elétrico é iniciado. Ao afastar o eletrodo da peça, o arco elétrico entra em contato com os gases resultantes da queima do revestimento do eletrodo, formando assim o plasma. Devido à temperatura extremamente elevada do plasma, a alma do eletrodo é fundida, dando início ao processo de transferência metálica do cordão de solda.

Finalmente, Dos Santos (2015) conclui destacando que o cordão de solda produzido pela técnica de soldagem por eletrodo revestido apresenta numerosos defeitos em sua estrutura, frequentemente originados pela instabilidade do arco elétrico. Essa instabilidade dificulta o controle preciso do cordão de solda. Foi observado que o uso de um eletrodo com cal tem o efeito de gerar uma quantidade significativa de gases durante a queima do revestimento. Essa emissão gasosa melhora a região, conferindo estabilidade ao arco elétrico. Isso, por sua vez, impede que impurezas como oxigênio, hidrogênio e nitrogênio penetrem na poça de fusão, evitando assim a formação de descontinuidades e defeitos no processo de soldagem.

3.1.3 Solda MIG e MAG

Segundo SILVA (2005), O processo MIG/MAG foi inicialmente patenteado nos Estados Unidos em 1949, sendo primeiramente empregado para a soldagem de alumínio em uma atmosfera protetora de hélio. No entanto, sua implementação em escala industrial só ocorreu na década de 1960. Uma característica de destaque do processo MIG/MAG é a sua notável produtividade, que decorre da sua natureza semiautomática e da elevada densidade de corrente associada. Isso resulta em taxas de deposição elevadas, um significativo fator de trabalho, flexibilidade e facilidade de automatização, tudo isso mantendo os padrões de qualidade exigidos em diversas aplicações.

Dos Santos (2015), traz o conceito fundamental por trás da sigla MIG (Metal Inerte Gás) reside na indicação de que a proteção durante o processo é realizada mediante o uso de um gás inerte, sendo o hélio, argônio ou uma combinação dos dois frequentemente empregados. Por outro lado, a sigla MAG (Metal Ativo Gás)

compartilha a mesma fonte de energia do processo MIG, mas se diferencia na proteção gasosa, que é efetuada com gases ativos capazes de reagir com a poça de fusão, como é o caso do dióxido de carbono (CO_2) puro ou a mistura argônio x CO_2 . Vale ressaltar que a escolha do metal de adição no processo é distinta, uma vez que o eletrodo deve ser selecionado de acordo com o metal de base e a aplicação específica da solda.

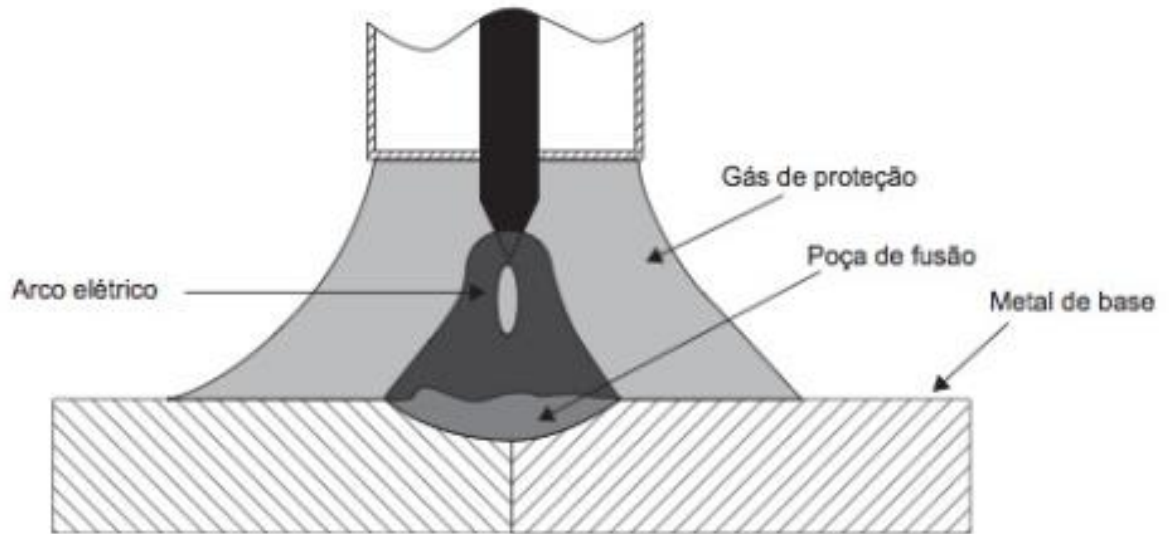
A soldagem MIG/MAG utiliza a energia do arco elétrico como fonte de calor, conduzida pelo próprio eletrodo (arame) nu, sem revestimento, que é alimentado de maneira contínua até alcançar o metal de base. O calor gerado durante essa reação funde a extremidade do eletrodo (arame) e deposita-se em uma poça, formando assim a solda com o metal fundido, na superfície do metal de base (peça). Esse processo pode ser classificado como automático quando o deslocamento da tocha é realizado mecanicamente por um equipamento, ou semiautomático quando o operador (soldador) é responsável pelo deslocamento da tocha (Dos Santos, 2015).

Devido ao processo empregar um tipo de gás como proteção da poça de fusão e utilizar um eletrodo nu (sem revestimento), a formação de escória é mantida em níveis mínimos. Contudo, quando são empregados eletrodos banhados com cobre, existe a possibilidade de ocorrer a formação de uma fase vítrea, que pode ser considerada como escória. Caso a limpeza não seja realizada de maneira eficiente, essa fase vítrea pode resultar em inclusões, as quais não conduzem eletricidade e têm o potencial de causar falhas no processo (Dos Santos, 2015).

3.1.4 Solda TIG

A soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (Gas Tungsten Arc Welding - GTAW) é um processo no qual a união de peças metálicas é realizada pelo aquecimento e fusão destas por meio de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e as peças a serem unidas. Para proteger a poça de fusão e o arco contra a contaminação atmosférica, utiliza-se uma coluna de gás inerte ou uma mistura de gases inertes. A soldagem pode ser executada com ou sem o uso de metal de adição, e, quando empregado, o metal de adição é depositado diretamente na poça de fusão, MARQUES (2017).

Figura 3 - Processo de soldagem TIG.



Fonte: Dos Santos (2015)

Uma característica crucial desse processo reside no notável controle da energia transferida para a peça. Esse controle é possível devido à gestão independente da fonte de calor e da adição de metal de enchimento, assemelhando-se ao que é observado na soldagem oxiacetilênica. Essa particularidade faz com que o processo seja altamente adequado para a soldagem de peças com pequena espessura. Além disso, quando combinado com uma eficiente proteção contra contaminação, ele viabiliza a soldagem de materiais que apresentam desafios consideráveis, proporcionando resultados excelentes (MARQUES, 2017).

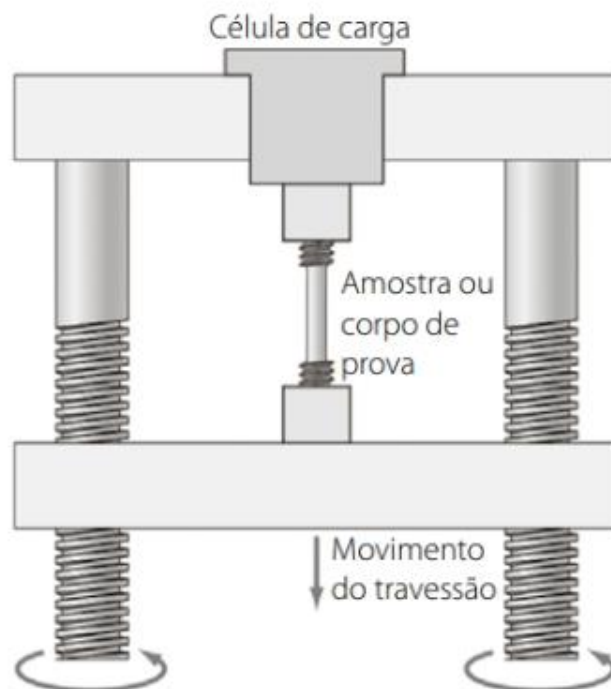
3.2 Tipos de Ensaio

Os ensaios mecânicos originaram-se da necessidade de compreender o comportamento dos materiais e estruturas utilizados em diversas aplicações. Esses ensaios são essenciais para avaliar uma variedade de fatores, com o propósito de identificar as características dos materiais submetidos a testes. Eles têm como objetivo adquirir conhecimento sobre as propriedades mecânicas desses materiais em condições controladas, de modo a reproduzir os esforços aos quais esses materiais são submetidos nas condições reais de serviço (MENDES, 2018).

3.2.1 Ensaio de tração

No ensaio de tração, conforme esquema ilustrado na Figura 4, o corpo de prova é submetido a uma força de tração uniaxial, promovendo o seu alongamento até a ruptura, a uma velocidade constante e em curto espaço de tempo (MENDES, 2018).

Figura 4 – Esquema ilustrativo do ensaio de tração



Fonte: Dos Santos (2015)

A fim de obter informações sobre as propriedades do material após o ensaio de tração, é imprescindível medir o diâmetro da parte efetiva do corpo de prova em dois pontos e calcular a média dessas medidas. Adicionalmente, é necessário realizar incisões superficiais ao longo do comprimento efetivo do corpo de prova (MENDES, 2018).

Antes de iniciar o ensaio, é necessário preparar a máquina. Para minimizar possíveis erros de leitura durante a execução, a máquina deve ser aquecida, se necessário,

testada e zerada. O corpo de prova deve ser fixado à máquina por meio das cabeças, assegurando que o esforço seja aplicado o mais axialmente possível, ou seja, ao longo do eixo longitudinal. A velocidade de execução do ensaio deve seguir as normas estabelecidas, levando em consideração a capacidade da máquina, a fim de garantir a precisão dos resultados (MENDES, 2018).

3.2.2 Ensaio de Inspeção por líquido penetrante

Segundo Andreucci (2017) citado por MENDES (2018), O ensaio por líquidos penetrantes é um método concebido principalmente para identificar descontinuidades superficiais, mesmo que estas estejam visíveis na superfície do material. Sua aplicação teve início antes da Primeira Guerra Mundial, sendo inicialmente adotado pela indústria ferroviária para inspecionar eixos em situações em que a detecção de falhas não era possível por meio de ensaio visual.

Segundo Garcia, Spim e Santos (2000), O ensaio por líquidos penetrantes baseia-se na introdução de líquidos em descontinuidades superficiais, como trincas, poros, dobras, entre outros, através da capilaridade. Este método é aplicável a todos os materiais sólidos, desde que não apresentem superfície excessivamente áspera e não sejam porosos.

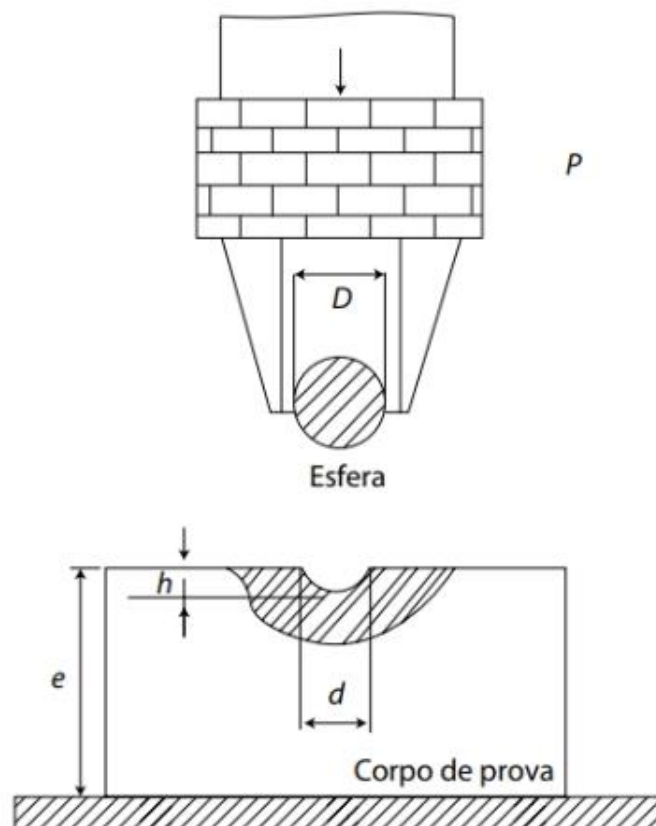
A eficácia na detecção de trincas por meio desse método está intrinsecamente ligada à acuidade visual do inspetor, uma vez que a observação das indicações reveladas pelo ensaio por líquidos penetrantes depende crucialmente da capacidade de visão. A acuidade visual do inspetor, seja com ou sem correção, deve passar por verificações regulares (MENDES, 2018).

3.2.3 Ensaio de dureza

Segundo MENDES (2018), a técnica de medição de dureza por penetração Brinell foi introduzida por J. A. Brinell em 1900. O procedimento envolve, essencialmente, a compressão lenta de uma esfera com diâmetro D [mm] e uma carga

P [N] sobre uma superfície plana, ou seja, um corpo de prova que está polido e limpo, ao longo de um intervalo de tempo t , como representado na Figura 5.

Figura 5 – Esquema ilustrativo do ensaio de dureza por penetração Brinell



Fonte: MENDES (2018)

3.3 Tensões residuais

Segundo MANSUR (2011), as tensões residuais referem-se às forças internas presentes em um material ou componente estrutural na ausência de cargas externas ou variações de temperatura. Essas tensões residuais são incorporadas ao material como resultado de processos como soldagem, que podem causar deformações próximas à superfície do material. Os efeitos das tensões residuais podem ser tanto

benéficos quanto prejudiciais, dependendo, principalmente, da magnitude, direção e distribuição dessas tensões em relação às cargas aplicadas no componente ou na estrutura.

MANSUR (2011) acrescenta que o processo de soldagem introduz tensões residuais devido à geometria resultante da fusão do material soldado e ao seu resfriamento heterogêneo. Além das alterações microestruturais e na composição química do material na ZTA (zona termicamente afetada) causadas pelo calor durante a soldagem, também ocorre o efeito da descontinuidade dos passes e a formação de bolhas e vazios, o que pode contribuir para a nucleação de trincas, reduzindo a resistência à fadiga.

3.3.1 Fadiga

A existência de tensões residuais de compressão na superfície de um componente constitui um fator que diminui a probabilidade de iniciação de trincas de fadiga. Em componentes soldados, as tensões residuais de tração podem impactar adversamente o desempenho à fadiga, embora os resultados relativos a esse efeito não sejam conclusivos. Isso pode ser atribuído, possivelmente, a dois fatores: (a) sob a ação de cargas variáveis, é provável que as tensões residuais de soldagem sejam, pelo menos parcialmente, aliviadas; e (b) as irregularidades superficiais, como reforço e escamas, têm um efeito preponderante na redução da resistência à fadiga (MARQUES, 2017).

3.3.2 Fratura frágil

Estruturas soldadas apresentam uma suscetibilidade significativa à falha por fratura frágil, influenciada por vários fatores, incluindo:

- A natureza monolítica de uma estrutura soldada, que não possui interfaces (como nas estruturas rebitadas) capazes de interromper a propagação de uma trinca de fratura frágil.

- Alterações estruturais na região da solda, frequentemente caracterizadas por um aumento no tamanho de grão em comparação com o metal de base. Em materiais de estrutura cristalina CCC, esse aumento pode diminuir a tenacidade do material.
- A presença de diversas descontinuidades na região da solda, como trincas e inclusões de escória, que podem atuar como concentradores de tensão e pontos de iniciação da fratura.
- A existência de elevadas tensões residuais de tração na região da solda.

A fratura frágil é favorecida por baixas temperaturas, altas taxas de deformação, espessura significativa do componente, presença de concentradores de tensão ou de uma microestrutura de baixa tenacidade. Vários desses fatores podem coexistir em uma estrutura soldada. Em tais casos, uma trinca pode se propagar sob tensões inferiores ao limite de escoamento, praticamente sem deformação plástica. Nessas situações, as tensões residuais associadas à solda podem ser suficientemente elevadas ou somar-se às tensões externas, levando à fratura frágil. Como medida preventiva, em muitos casos, componentes soldados devem passar por tratamentos térmicos para aliviar tensões residuais e/ou refinar a estrutura na região da solda (MARQUES, 2017).

3.3.3 Trincas

A formação de trincas é uma ocorrência comum em soldas, e essas trincas geralmente estão associadas a dois fatores principais: tensões mecânicas de tração e a incapacidade temporária do material em acomodar essas tensões por meio de deformação plástica (fragilização). A região da solda e as áreas adjacentes a ela podem se tornar frágeis devido a diversos motivos, tais como a formação de filmes líquidos nos contornos de grão, o crescimento de grãos, a presença de hidrogênio dissolvido no material, a precipitação, entre outros, que podem ocorrer durante e após o processo de soldagem (MARQUES, 2017).

3.3.4 Corrosão

Na presença de um ambiente corrosivo, trincas de corrosão podem se desenvolver de maneira acelerada, especialmente devido à existência de tensões de tração. Em aços estruturais ao carbono ou de baixa liga, por exemplo, esse fenômeno pode ser desencadeado pelo contato com hidróxidos ou sulfeto de hidrogênio. Já em aço inoxidável austenítico, a presença de íons de cloro (Cl^-) em uma solução em contato com o aço é uma causa comum desse tipo de corrosão. Nas estruturas soldadas, as tensões residuais frequentemente são suficientes para promover o desenvolvimento de corrosão sob tensão, dependendo das características do material e do ambiente (MARQUES, 2017).

3.3.5 Instabilidade dimensional

Quando um componente soldado é submetido a operações de usinagem ou a qualquer outro processo de remoção de material, o equilíbrio das forças associadas às tensões residuais é perturbado. Para restabelecer esse equilíbrio, o componente sofre pequenas distorções, resultando em uma redistribuição das tensões residuais. Embora esse processo possa ser empregado para medir as tensões residuais, ele também pode apresentar desafios durante operações de usinagem de precisão em componentes que possuem esse tipo de tensão, (MARQUES, 2017).

3.4 Trabalhos publicados

Para conclusão da fundamentação teórica, destaca-se a importância de explorar e referenciar estudos afins como parte integral do método científico. Reconhecendo e incorporando adequadamente pesquisas anteriores que compartilham semelhanças temáticas ou metodológicas, a fim enriquece o trabalho e fornece uma base sólida para o avanço do mesmo.

Soldagem a Laser De Ligas De Titânio

O artigo “Soldagem a Laser de Ligas de Titânio” traz como princípio como a atmosfera de proteção, a velocidade de soldagem e a largura do pulso impactam na solda a laser. A investigação abrange aspectos como a microestrutura resultante, a configuração da solda formada e a dureza do material. Examinando os efeitos da formação de compostos de titânio, incluindo suas implicações, como a geração de fissuras e o aumento da zona afetada pelo calor. Adicionalmente, realizando a análise da influência da velocidade de soldagem na quantidade de material perdido durante o processo, (SILVA, 2007).

Estudo Comparativo de Metais de Solda de Aço de Alta Resistência Obtidos pelos Processos Eletrodo Revestido e Arame Tubular para Aplicação em Equipamentos de Amarração Offshore

O artigo técnico, conduziu uma análise comparativa entre os métodos de soldagem por eletrodo revestido e arame tubular, avaliando as propriedades mecânicas e microestruturais dos metais de solda de aço de alta resistência em diferentes condições, incluindo o estado após a soldagem e com tratamento térmico de alívio de tensões. Os resultados revelaram que os procedimentos empregados tanto no arame tubular quanto nos eletrodos revestidos resultaram em níveis satisfatórios de resistência mecânica, com exceção do alongamento percentual do arame tubular no estado após a soldagem. No entanto, observou-se que, para o arame tubular, a tenacidade ao impacto é inferior à do eletrodo revestido. Além disso, constatou-se que o processo de arame tubular proporcionou uma produtividade aproximadamente duas vezes superior ao processo de eletrodo revestido. Assim, a vantagem intrínseca do processo de arame tubular deve ser ponderada considerando o conjunto das propriedades mecânicas obtidas, orientando a seleção apropriada do método de soldagem, especialmente em aplicações que envolvam equipamentos operando sob condições de fadiga (FARNEZE, 2009).

A importância da inspeção de defeitos de soldagem por fusão através de ensaios não destrutivos e da metodologia

O trabalho em questão estuda a necessidade de investigar a confiabilidade de ensaios não destrutivos utilizados na detecção de defeitos em soldagens. O trabalho traz como primeiro tópico uma revisão da literatura abordando conceitos relacionados à soldagem e suas aplicações. Em seguida, foi conduzido um levantamento dos principais defeitos inerentes aos processos de soldagem por fusão. O estudo conduzido permitiu concluir que a utilização de curvas PoD (*Probability of Detection*) nos ensaios representa uma abordagem metodológica simples, proporcionando maior confiabilidade aos resultados. Essa metodologia permite uma precisão aprimorada na identificação de defeitos, assegurando que um defeito identificado esteja efetivamente presente na peça inspecionada. Isso se deve ao fato de que a curva PoD é gerada com base nas dimensões de um defeito, contribuindo para a robustez e precisão do processo de inspeção, (GARCIA, 2017).

4 METODOLOGIA

Para realização deste trabalho foi desempenhado algumas etapas de modo a alcançar os objetivos definidos. Segue abaixo a sequência das etapas:

4.1. Preparo do corpo de prova

Para o início dos testes e ensaios a serem aplicados no trabalho, o primeiro passo executado foi o preparo dos corpos de prova, sendo o mesmo composta por chapas de aço carbono 1020 com espessura de 4 mm e dimensões 120 mm x 240 mm, a qual foram soldadas para formar chapas de 240 mm x 240 mm, sendo três chapas para cada tipo de soldagem.

Figura 6 – Preparo do corpo de prova



Fonte: Próprio

Figura 7 – Preparo dos chanfros

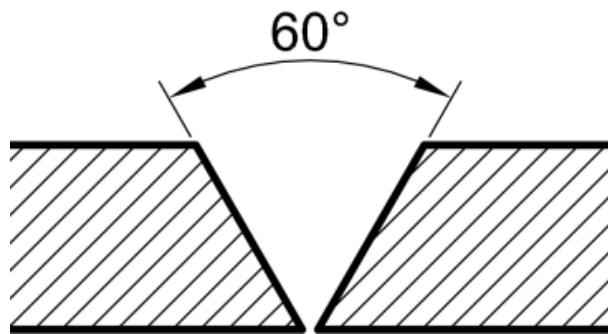


Fonte: Próprio

Ainda no preparo do corpo de prova, o autor JESUS COSTA (2016), traz como princípio a importância da aplicação de chanfros no corpo a ser soldado, reforçando que um chanfro bem definido é de grande importância para garantir a integridade das estruturas soldadas, uma vez que a maioria destes materiais quando submetidos a soldagem tornam-se suscetíveis ao surgimento de deformações e trincas.

Baseando-se no pressuposto, foi realizado nas chapas de aço carbono 1020, chanfros com ângulo de 60° (ângulo entre as pontas), para que a solda preenchesse completamente o material.

Figura 8 – Chanfro da solda em V, 60°



Fonte: Autoria Própria

4.2. Realização das soldas

Após o preparo do corpo de prova, foi realizado os processos de soldagem, MENDES (2008), diz que para a para a realização de técnicas como a soldagem é essencial que os materiais estejam em condições controladas, de modo a reproduzir os esforços aos quais esses materiais são submetidos nas condições reais de serviço.

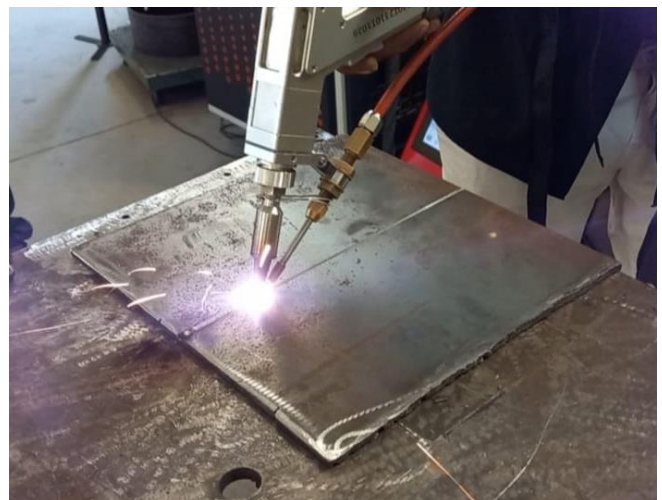
Portanto, com o auxílio das chapas padronizadas e um ambiente sem grandes influências externas, foram aplicados ambos os métodos de soldagem.

Figura 9 – Aplicação da soldagem por eletrodo



Fonte: Próprio

Figura10 – Aplicação da soldagem a laser



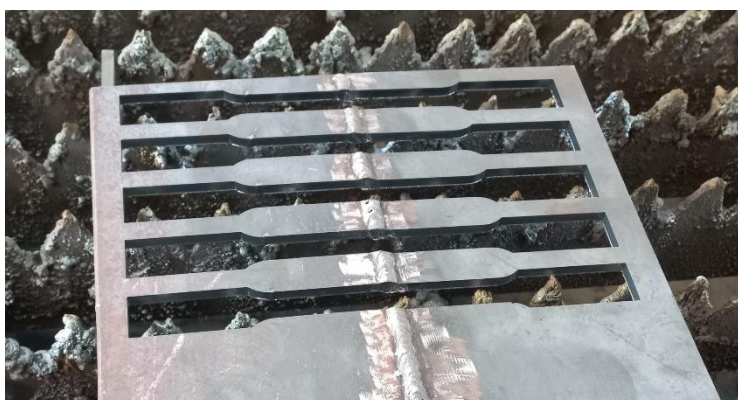
Fonte: Próprio

4.3. Corte da peça

Segundo PASSARI (2011), a realização de experimentos em triplicata é recomendada nos laboratórios de ensino porque é um compromisso aceitável entre a precisão e o trabalho, onde em muitas das vezes o valor médio da triplicata é a melhor estimativa dentre os diversos métodos que visam a estimativa do erro experimental em uma determinação.

Visando alcançar o mínimo do erro experimental possível, foi aplicado o corte das peças soldadas, utilizando o processo de corte a laser, de modo a produzir os corpos de prova para a aplicação dos ensaios, sendo cada chapa dividida em cinco tiras de 60 mm x 240 mm com a solda no sentido transversal, onde elas foram utilizadas para a realização dos ensaios.

Figura 11 – Corte dos corpos de prova



Fonte: Próprio

Figura 12 – Corpos de prova

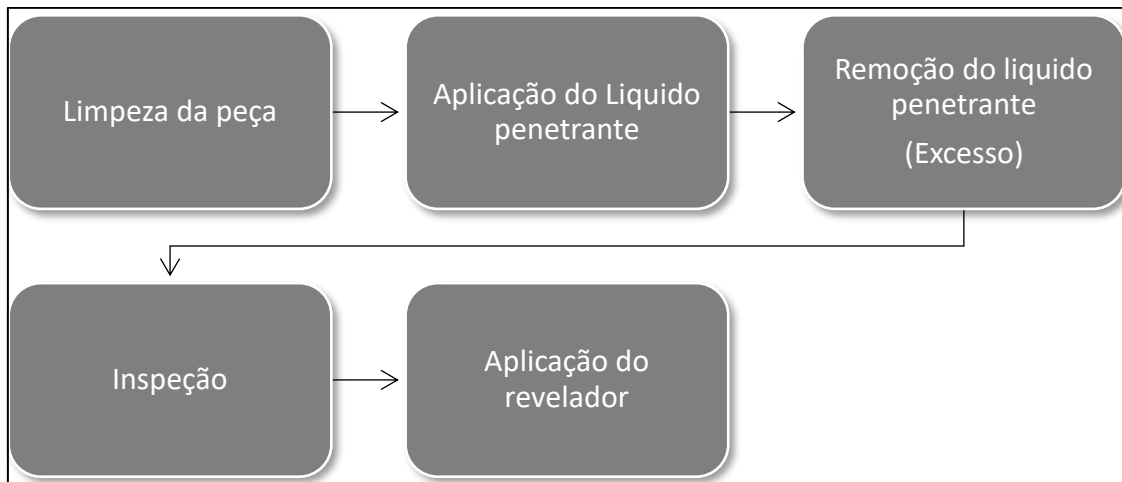


Fonte: Próprio

4.4. Realização dos Ensaios não destrutivos

Em sequência, utilizando a técnica comentada por Andreucci (2017) e citado por MENDES (2018), foi realizado as inspeções visuais e inspeções por líquidos penetrantes nas chapas soldadas, tendo como procedimento para aplicação do método o fluxograma abaixo

Figura 13 – Fluxo, Inspeção por líquido penetrante



Fonte: Autoria Própria

4.5. Realização do ensaio destrutivo

O principal objetivo desse ensaio foi verificar as propriedades dos materiais ensaiados. Podendo também medir a capacidade do produto de suportar determinados esforços.

4.5.1. Ensaio de Tração

Para a realização do ensaio de tração, foi utilizado a máquina EMIC – GR044 com uma capacidade máxima de 600kN.

Figura 14 – Máquina EMIC – GR044 -



Fonte: Próprio

Para início do ensaio, foi fixado o corpo de prova á máquina por suas cabeças, juntamente com a sua configuração de velocidade estimada conforme a capacidade da máquina sendo 2mm/min.

Figura 15 – Instalação dos corpos de prova na máquina de tração



Fonte: Próprio

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO

Neste capítulo, será discutido os resultados obtidos pelos ensaios de soldagem a laser e eletrodo revestido. O objetivo principal deste trabalho é analisar as propriedades mecânicas desses dois processos de soldagem e comparar suas aplicações em um mesmo cenário.

5.1 Inspeções das peças soldadas

Os resultados dos ensaios por líquido penetrante revelaram diferenças significativas entre as soldas a laser e por eletrodo revestido.

5.1.1 Inspeção Soldagem a Laser

Os ensaios por líquido penetrante nas soldas a laser não revelaram descontinuidades significativas. Isso sugere que o processo de soldagem a laser produziu soldas de alta qualidade com poucas descontinuidades superficiais.

Figura 16 – Líquido penetrante na soldagem a laser



Fonte: Próprio

5.1.2 Inspeção Soldagem por Eletrodo Revestido

Por outro lado, os ensaios por líquido penetrante nas soldas por eletrodo revestido revelaram diversas discontinuidades. Isso pode ser atribuído às características inerentes a esse processo de soldagem, que pode produzir uma variedade de discontinuidades, como porosidade, inclusões de escória e trincas.

Figura 17 – Líquido penetrante na soldagem por eletrodo



Fonte: Próprio

5.1.3 Análise Comparativa

A análise comparativa dos resultados dos ensaios por líquido penetrante sugere que a soldagem a laser pode produzir soldas de maior qualidade em termos de discontinuidades superficiais e estética do material soldado em comparação com a soldagem por eletrodo revestido. No entanto, é importante destacar que a presença de discontinuidades não é o único fator que determina a qualidade de uma solda.

5.2 Propriedades Mecânicas – Ensaio de Tração

Os ensaios de tração realizados nos corpos de prova revelaram diferenças significativas nas propriedades mecânicas das soldas produzidas pelos dois processos. Por exemplo, as soldas a laser mostraram uma maior resistência à tração em comparação as soldas por eletrodo revestido. Isso pode ser atribuído à menor zona termicamente afetada (ZTA) na soldagem a laser, o que resulta em uma menor alteração nas propriedades do material base.

Parâmetros aplicados:

Material utilizado: Aço carbono 1020

Dimensões da peça: Espessura de 4mm 60 mm x 240 mm

Dimensões do chanfro: 60° (ângulo entre as pontas).

Largura do passe/cordão: 240mm

Equipamento utilizado para o ensaio: EMIC – GR044

Velocidade de tração do equipamento: 2mm/min

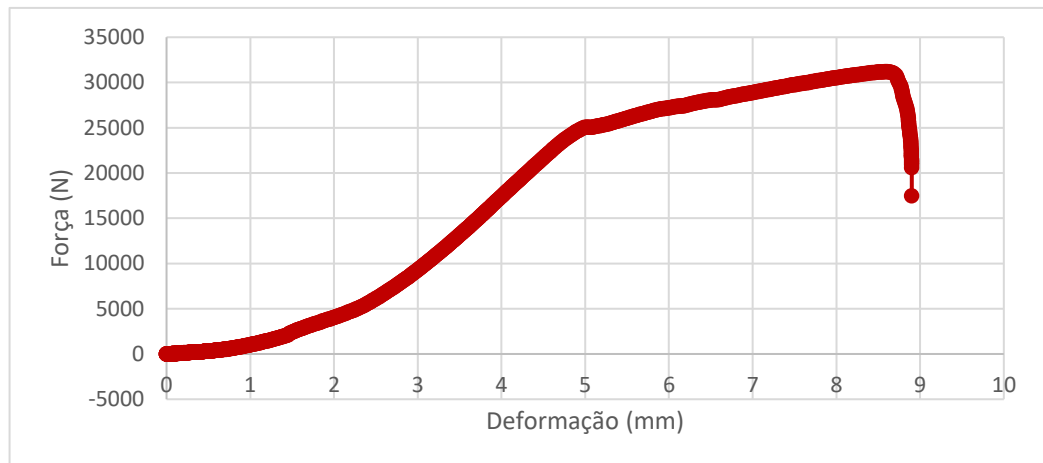
Como pode ser observado na tabela de resultados dos ensaios de tração, é possível identificar a força máxima suportada pelo material até sua ruptura. Além dessa informação, também é possível analisar a deformação sofrida pelo corpo de prova após ser submetido a essa força:

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de tração – Eletrodo Revestido

Nº do Ensaio	Ponto Máximo (Força aplicada)	Deformação do corpo de prova
Ensaio 1	31.207 N	8,7mm
Ensaio 2	34.728 N	11,3mm
Ensaio 3	23.616 N	6,6mm

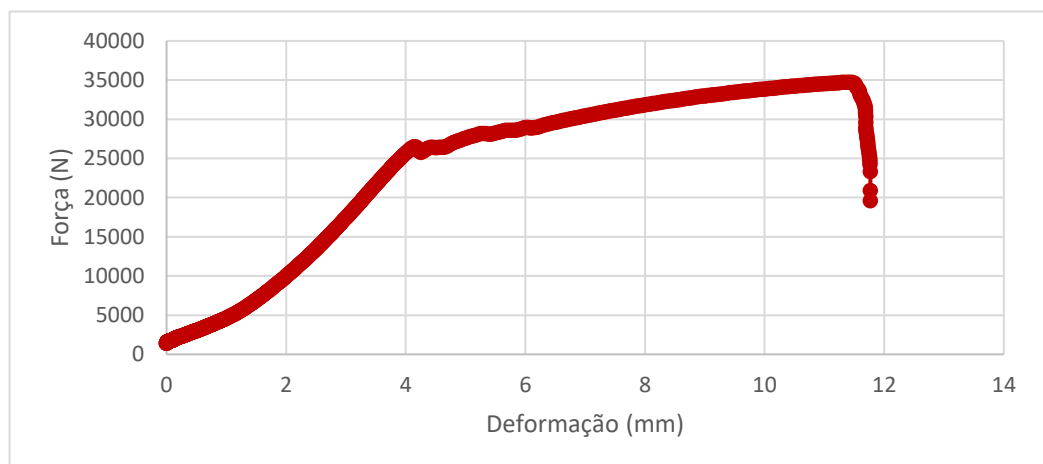
Fonte: Próprio

Gráfico 1 – Variação da deformação em relação a Força - Eletrodo 1



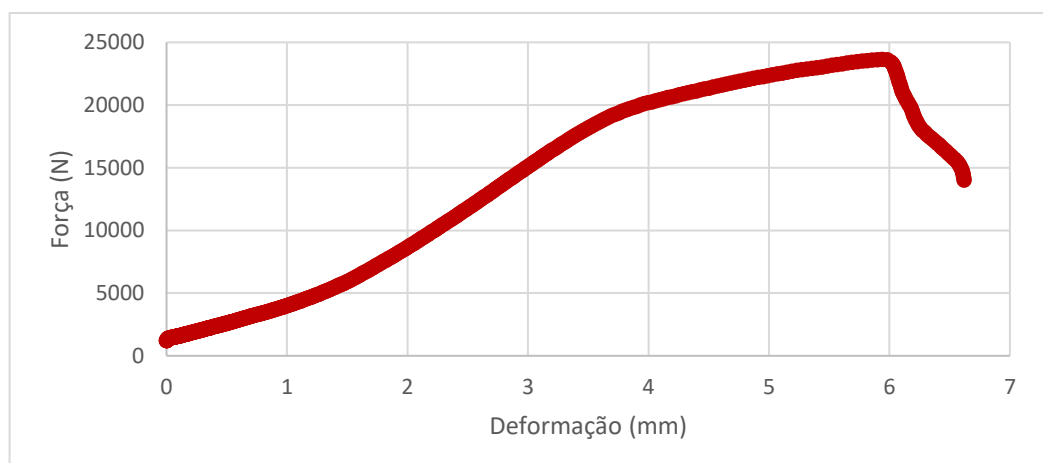
Fonte: Próprio

Gráfico 2 – Variação da deformação em relação a Força - Eletrodo 2



Fonte: Próprio

Gráfico 3 – Variação da deformação em relação a Força - Eletrodo 3



Fonte: Próprio

Figura 18 – Resultado dos corpos de prova (Eletrodo) após ensaio de tração



Fonte: Próprio

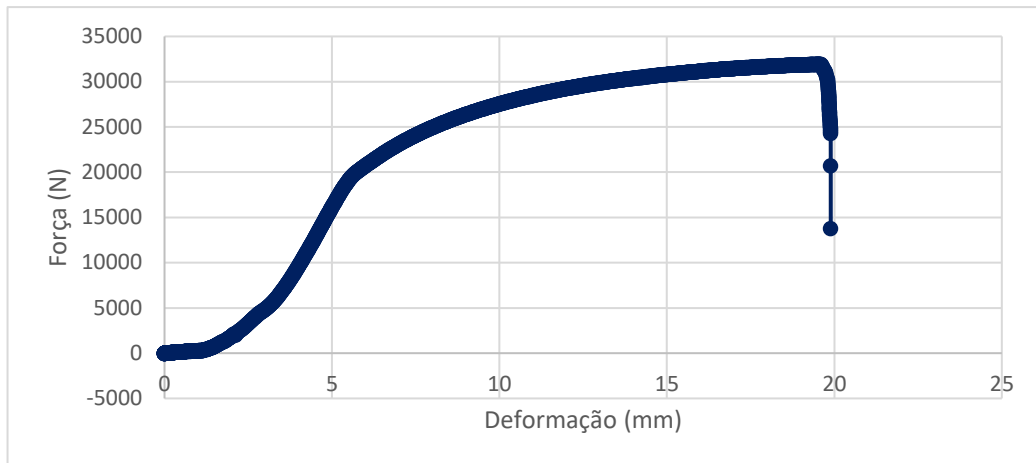
A seguir, apresentam-se os mesmos cenários do ensaio de tração realizado nos corpos de prova soldados por eletrodo revestido, agora aplicados aos corpos de prova submetidos à soldagem a laser.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de tração – Laser

Nº do Ensaio	Ponto Máximo (Força aplicada)	Deformação do corpo de prova
Ensaio 1	31.924 N	18,3 mm
Ensaio 2	31.228 N	27,7mm
Ensaio 3	36.309 N	14,3mm

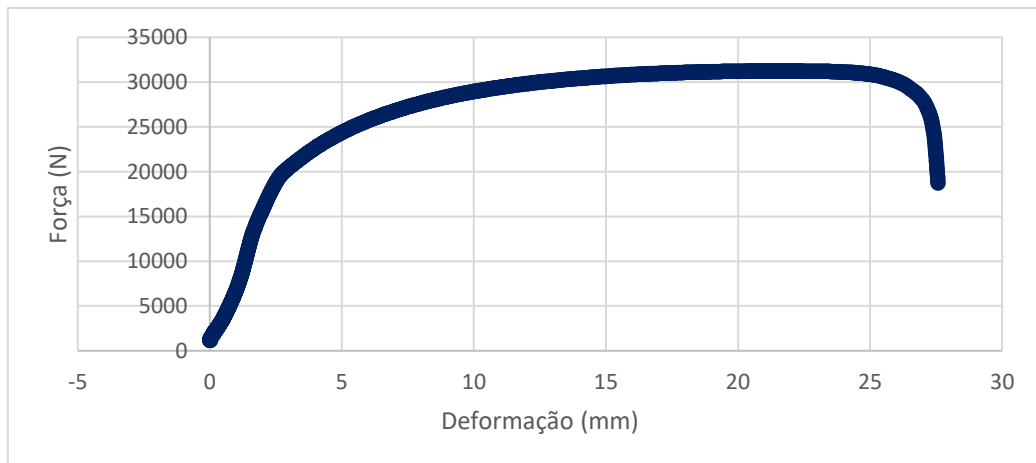
Fonte: Próprio

Gráfico 4 – Variação da deformação em relação a Força – Laser 1



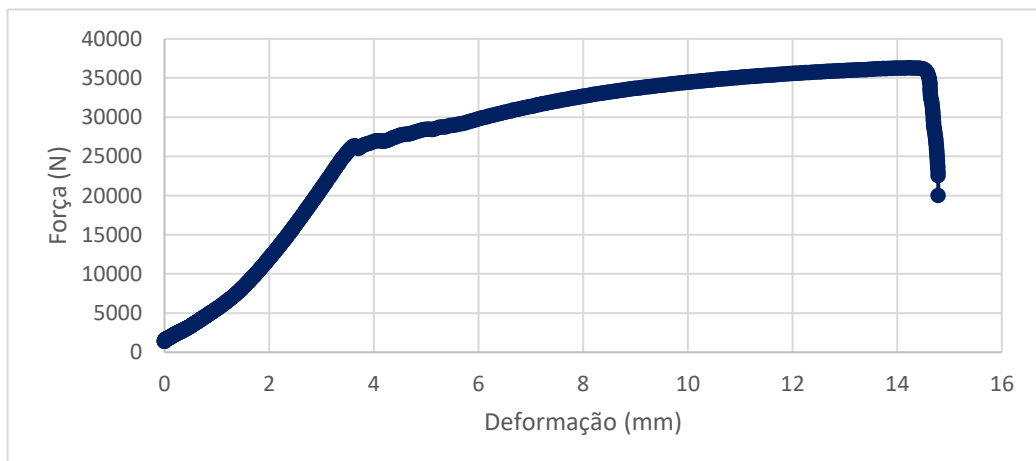
Fonte: Próprio

Gráfico 5 – Variação da deformação em relação a Força – Laser 2



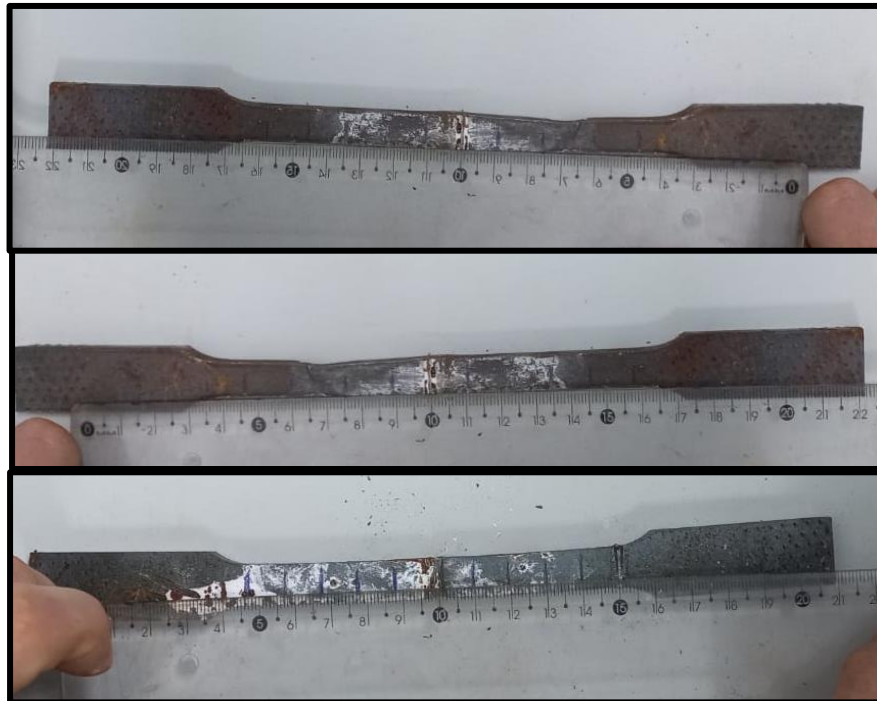
Fonte: Próprio

Gráfico 6 – Variação da deformação em relação a Força – Laser 2



Fonte: Próprio

Figura 19 – Resultado dos corpos de prova (Laser) após ensaio de tração



Fonte: Próprio

5.3 Aplicações em Cenários Distintos

A escolha entre soldagem a laser e soldagem por eletrodo revestido depende das características específicas de cada processo e das exigências da aplicação.

A soldagem a laser destaca-se por sua alta resistência à tração e capacidade de suportar grandes deformações, sendo ideal para indústrias de alta tecnologia, como automotiva, aeronáutica e eletrônica, onde precisão, resistência e flexibilidade são cruciais.

Por outro lado, a soldagem por eletrodo revestido é mais indicada para estruturas pesadas e reparos, sendo amplamente utilizada na construção civil, naval e energia, onde a robustez e a simplicidade do processo são mais valorizadas, mesmo em condições de trabalho variáveis.

5.4 Limitações e Considerações Futuras

Este estudo apresentou algumas limitações, como a amostragem limitada e a realização dos ensaios em condições laboratoriais controladas, que podem não refletir as condições reais de operação industrial. Além disso, fatores ambientais como umidade e temperatura não foram considerados, o que pode influenciar os resultados das soldagens.

Para pesquisas futuras, recomenda-se aumentar o número de corpos de prova e diversificar os materiais utilizados para obter resultados mais representativos. Também é importante conduzir ensaios em condições reais de operação e investigar o impacto de diferentes condições ambientais nos processos de soldagem. Por fim, explorar e desenvolver novas técnicas de soldagem pode oferecer vantagens adicionais em termos de eficiência, qualidade e custo.

6 REFERÊNCIAS

GIMENES JR, Luiz; RAMALHO, J. P. Soldagem laser. **Infosolda. com. br**, 2013.

VILLENA, Patricio Gustavo Riofrío. **Propriedades Mecânicas e Comportamento à Fadiga de Chapas de Aço HSLA Soldadas por Laser**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra.

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

KLEPPNER, Daniel. Relendo Einstein sobre radiação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, p. 87-91, 2005. *Apud* Einstein ,1917.

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

DOS SANTOS, CARLOS EDUARDO FIGUEIREDO; ROCCA, JAIRO ESTEVÃO. **Processos de Soldagem Conceitos, equipamentos e normas de segurança**. Saraiva Educação SA, 2015.

SILVA, Régis Henrique Gonçalves et al. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz**. 2005.

MARQUES, Paulo Villani et al. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

MENDES, Cláudia Luisa. **Ensaio mecânicos**; [revisão técnica: Delmonte Friedrich]. – Porto Alegre: SAGAH, 2018]

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 247 p.

BERTOL, Helton Claudio. **Determinação de critérios para aceitação de medições de dureza realizadas com durômetros portáteis em regiões de soldas**. 2009.

GIMENES JR, Luiz; RAMALHO, J. P. Soldagem laser. **Infosolda. com. br**, 2013.

CARDOSO, Andréia de Souza Martins. **Caracterização mecânica e macroestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Leite, D. U., Castro, N. L. B., Ferreira, C. R., Lima, K. U., & Vieira, M. E. L. (2017). **Ensaio para determinação de resistência em juntas soldadas**. CONSTRUINDO, 57-67.

MANSUR, Tanius Rodrigues et al. Estudo das tensões residuais em juntas soldadas de materiais dissimilares e determinação dos limites de resistência à fadiga dos metais de base. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, p. 274-284, 2011.

DE JESUS COSTA, Jacilene et al. **INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO CHANFRO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO ESTRUTURAL ASTM A36 SOLDADO COM O PROCESSO MIG/MAG**, 2016.

PASSARI, Livia Maria Zambrozi Garcia et al. **Estatística aplicada à química: dez dúvidas comuns**. **Química Nova**, v. 34, pág. 888-892, 2011.

SILVA, DOUGLAS R. da; ROSSI, WAGNER de; BERRETTA, JOSE R.; VIEIRA JUNIOR, NILSON D.; LIMA, MILTON S.F. **Soldagem a laser de ligas de titânio**. 2007.

FARNEZE, Humberto N. et al. **Estudo comparativo de metais de solda de aço de alta resistência obtidos pelos processos eletrodo revestido e arame tubular para aplicação em equipamentos de amarração offshore**. **Soldagem & Inspeção**, v. 14, p. 151-160, 2009.

GARCIA, Luiz Eduardo Caldas et al. **A importância da inspeção de defeitos de soldagem por fusão através de ensaios não destrutivos e da metodologia PoD**. 2017.

7 Glossário

Soldagem - É o ato da junção de dois ou mais peças de materiais similares ou diferentes, principalmente metais, pelo processo de fusão, para formar uma única peça, ou item, em um vínculo forte, uma unidade.

Polaridade - Propriedade positiva ou negativa dos pólos de um ímã. Característica do que possui qualidades ou formas distintas em relação a outra coisa