

PATRÍCIA STELLA DE OLIVEIRA MARTINS DA SILVA

**Estudo da vida em fadiga de uma junta soldada no aço carbono ASTM A516 grau 70
soldada por GMAW**

Guaratinguetá - SP
2022

Patrícia Stella de Oliveira Martins da Silva

**Estudo da vida em fadiga de uma junta soldada no aço carbono ASTM A516 grau 70
soldada por GMAW**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald

Coorientador (a): Prof. Msc. Nasareno das Neves

S586e	<p>Silva, Patricia Stella de Oliveira Martins da</p> <p>Estudo da vida em fadiga de uma junta soldada no aço carbono ASTM A516 grau 70 soldada por GMAW / Patrícia Stella de Oliveira Martins da Silva – Guaratinguetá, 2022.</p> <p>51 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 49-51</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald</p> <p>Coorientador: Prof. Msc. Nasareno das Neves</p> <p>1. Materiais - Fadiga. 2. Soldagem. 3. Aço-carbono. 4. Juntas (Engenharia)</p> <p>I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.178.3</p>
-------	---

Patrícia Stella de Oliveira Martins da Silva

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

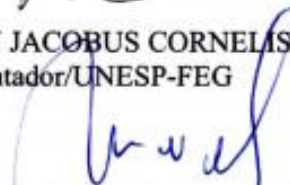


Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. HERMAN JACOBUS CORNELIS COORWALD
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Msc. NASARENO DAS NEVES
UNESP-FEG



Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
UNESP-FEG

Fevereiro de 2022

DADOS CURRICULARES

PATRÍCIA STELLA DE OLIVEIRA MARTINS DA SILVA

NASCIMENTO 17.07.1989 – Guaratinguetá /SP

FILIAÇÃO Marco Antônio de Oliveira Martins
Rosângela Maria Caetano de Oliveira Martins

2014/2022 Engenheira mecânica (Engenharia mecânica - Curso de nível superior)
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade
Estadual Paulista - UNESP

2008/2008 Segundo Sargento da Força Aérea especialista em Eletrônica
Escola de Especialistas de Aeronáutica - EEAR

2004/2007 Curso Técnico de Eletrônica (curso nível médio)
Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá - UNESP

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

Ao meu Senhor e meu Deus, que me deu oportunidade ao estudo, às amizades, às dificuldades, alegrias e tristezas, pois Deus é bom em todo tempo e todo tempo Deus é bom.

Aos meus pais, Rosângela e Marco, cujo incentivo, apoio e sacrifícios por meus estudos desde minha infância me permitiram caminhar longe.

Aos meus professores, da infância a graduação, cada um deixou sua marca em cada ensinamento, especialmente ao meu orientador Prof. Dr. Herman que tão prontamente aceitou me conduzir neste trabalho, me encaminhando ao coorientador Prof. Msc. Nasareno, cuja disponibilidade e paciência em me conduzir foram essenciais para a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos amigos, que em anos de graduação foram companheiros nesta jornada, em especial minha querida amiga Caroline, cuja determinação em me ajudar a concluir a graduação, dedicando a me ensinar e apoiar em todos os momentos foi de uma ajuda incomensurável.

Ao meu querido esposo, que sempre me incentivou a continuar, que é a minha fortaleza, meu companheiro eterno, nesta vida e na próxima.

A Força Aérea Brasileira, em especial a minha chefia, que incentivou meus estudos em todas as etapas.

A todos da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, que de forma direta ou indireta, fizeram parte deste trabalho, o meu muito obrigado, que Deus abençoe imensamente esta faculdade.

“A humildade é o primeiro degrau para a sabedoria.”
Santo Tomás de Aquino

RESUMO

O estudo das propriedades de resistência à fadiga é sempre uma preocupação em diversas áreas da engenharia. Entretanto, esta preocupação se torna ainda mais presente quando se trata de materiais soldados. Bem se sabe o quanto a soldagem, em meio a tantas aplicações, traz inúmeras alterações estruturais, bem como nas propriedades do material dentro e próximo à região da solda, podendo trazer defeitos e fragilidades. Alguns defeitos como pequenas fraturas, podem ser desastrosos, reduzindo em muito a vida em fadiga do material. Para uma estimativa da resistência à fadiga de um material, se utilizam as curvas S-N, que relacionam a tensão de carregamento e o número de ciclos até o rompimento. Neste trabalho busca-se a obtenção da curva S-N, através do ensaio de juntas soldadas pelo processo GMAW, utilizando a liga A 516-70, bastante resistente e geralmente utilizada em soldagem de vasos de pressão. Para isso são realizados ensaios de dureza em corpos de prova da liga A 516-70, com juntas soldadas pelo processo GMAW, ensaio em fadiga, obtendo-se as curvas S-N. Os resultados obtidos demonstraram uma diminuição significativa da vida em fadiga nos corpos de prova soldados pelo processo GMAW em comparação a corpos de prova do metal base laminado e metal base lixado, tendo este último apresentado a vida em fadiga mais longa.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga. Juntas soldadas. Solda GMAW. Aço ASTM A516 G70.

ABSTRACT

The study of fatigue resistance properties is always a concern in several areas of engineering. However, this concern becomes even more present when it comes to welded materials. It is well known how welding, in the midst of so many applications, brings numerous structural changes, as well as the material properties in and near the weld region, which can bring defects and weaknesses. Some defects, such as small fractures, can be disastrous, greatly reducing the fatigue life of the material. To estimate the fatigue strength of a material, S-N curves are used, which relate the loading stress and the number of cycles until failure. This work seeks to obtain the S-N curve, through the test of welded joints by the GMAW and GTAW processes, using the A 516-70 alloy, which is very resistant and ideal for use in welding processes. For this, hardness tests are carried out on specimens of the A 516-70 alloy, with welded joints by the aforementioned processes and fatigue test, obtaining the S-N curves. The results obtained showed a significant decrease in fatigue life in specimens welded by the GMAW process compared to laminated base metal and sanded base metal specimens, the latter having the longest fatigue life.

KEYWORDS: Fatigue. Welded joints. Weld GMAW. A 516-70 steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva S-N típica	16
Figura 2 – Tipos de juntas.....	17
Figura 3 – Soldagem por pressão (esquemática).....	18
Figura 4 – Soldagem por fusão (esquemático).....	19
Figura 5 – Processos de Soldagem por fusão.....	20
Figura 6 – Processo de soldagem GMAW.....	21
Figura 7 – Modos de transferência, (a) curto-circuito, (b) globular e (c) spray ou aerosol.....	21
Figura 8 – Mudanças de temperatura e tensão durante a soldagem.....	23
Figura 9 – Distribuição longitudinal σ_x e transversal σ_y de tensão residual num cordão de solda	24
Figura 10 – Distribuições medidas e calculadas da tensão residual em uma junta de topo do alumínio 5083.....	25
Figura 11 – Efeito da temperatura com o tempo no alívio das tensões de um aço soldado	26
Figura 12 – Regiões da solda de um aço carbono.....	27
Figura 13 – Tipos de tensão em fadiga: (a) ciclo de tensões alternadas, (b) ciclo assimétrico de tensão e (c) ciclo de tensões aleatórias.....	30
Figura 14 – Diagrama da razão entre as tensões (R).....	31
Figura 15 – Ciclo de tensão flutuante em regime de tração.....	32
Figura 16 – Ensaio em fadiga utilizado para criar curvas S-N.....	33
Figura 17 – Curva S-N de um material metálico.....	33
Figura 18 – Curva S-N contendo a força máxima, força de rendimento e limite de resistência	34
Figura 19 – Gráfico tensão-deformação e Curva S-N.....	35
Figura 20 – Corpo de prova segundo o padrão da norma E466 para fadiga.....	39
Fotografia 1 – Máquina de ensaio em fadiga INSTRON 8801	40
Fotografia 2 – Computador de análise do ensaio	41
Fotografia 3 – Corpo de prova fixado para condução do teste	41
Fotografia 4 – Microdurômetro Shimadzu HMV-2.....	42
Fotografia 5 – Fixação do corpo de prova	43
Figura 21 – Pontos e regiões do ensaio de microdureza.....	43
Figura 22 – Curva S-N obtida do ensaio.....	44

Fotografia 6 – Ruptura do corpo de prova com reforço de solda removido após o ensaio em fadiga.....	45
Fotografia 7 – Ruptura do corpo de prova com reforço de solda após o ensaio em fadiga	46
Figura 23 – Gráfico Microdureza a 0,5mm da superfície	46
Figura 24 – Gráfico Microdureza linha central.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Graus e espessura da chapa	36
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço A516 grau 70.....	36
Tabela 3 – Especificações químicas do aço ASTM A 516 grau 70	37
Tabela 4 – Composição química	38
Tabela 5 – Parâmetros de soldagem.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
DMT	Departamento de Materiais e Tecnologia
FEA	Finite-Element Analysis
FEG/UNESP	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá/Universidade Estadual Paulista
GMAW	Gás Metal Arc Welding
MAG	Metal Active Gas
MB	Metal Base
MIG	Metal Inert Gas
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Térmica Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

b	largura do cordão de solda
N	número de ciclos
R	razão entre tensões
S	tensão de ensaio
y	a tensão residual longitudinal formada ao longo da direção transversal
σ_a	amplitude da tensão
σ_i	tensões para um carregamento cíclico
σ_m	máxima tensão residual
σ_m	tensão média
σ_x	tensão em x

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	JUNTA SOLDADA E SUA GEOMETRIA.....	17
2.2	PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	18
2.2.1	Processos de soldagem por pressão.....	18
2.2.2	Soldagem por fusão.....	18
2.2.3	Soldagem GMAW.....	20
2.3	TENSÕES RESIDUAIS.....	22
2.3.1	Consequências das tensões residuais.....	24
2.4	ANÁLISE METALÚRGICA DE UMA JUNTA SOLDADA	26
2.5	FADIGA.....	28
2.5.1	História da Fadiga	28
2.5.2	Mecanismo	29
2.5.3	Ensaio de Fadiga	32
2.5.4	Curvas S-N ou Curvas de Wöhler.....	33
2.6	AÇO CARBONO A516 GR 70	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	38
3.2	PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM GMAW	38
3.3	PARÂMETROS DO CORPO DE PROVA	39
3.4	ENSAIO EM FADIGA	40
3.5	ENSAIO DE MICRODUREZA	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	ENSAIO EM FADIGA	44
4.2	ENSAIO DE MICRODUREZA	46
5	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

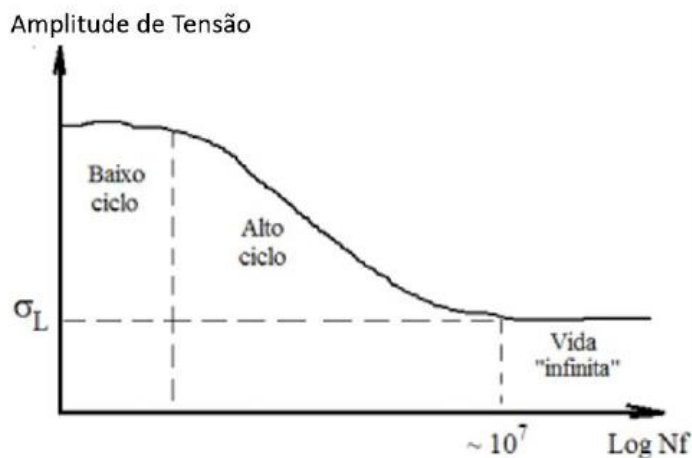
Os processos de soldagem são amplamente utilizados nas indústrias, especialmente na fabricação de peças metálicas. As enormes tubulações utilizadas para transporte de gás natural, supertanques que suportam toneladas de líquidos, plataformas de petróleo, trilhos de trens, são grandes exemplos da utilização da soldagem na indústria. Além disso, as soldas podem ser utilizadas para recuperar peças desgastadas, aplicar revestimentos especiais em superfícies metálicas e em cortes de materiais (EASTERLING, 1983).

O processo de soldagem acarreta numa alteração da microestrutura do material soldado, ocasionando descontinuidades, tanto físicas como metalúrgicas. Algumas descontinuidades geométricas, como trincas, mordeduras, poros e reforço excessivo podem diminuir sua área útil e atuar como concentradores de tensão, o que sob fadiga, pode acelerar o surgimento de trinca. Sob este aspecto, percebe-se que a chance de ocorrerem falhas na região da solda é maior do que em outras partes da estrutura do metal. Dependendo da região na qual a solda está localizada, e em que situação ela for aplicada, uma falha pode condenar ou causar um colapso em toda a estrutura (MODENESI, 2012).

Segundo Tremarin (2017), os projetistas utilizam-se do ensaio em fadiga para definir a resistência das juntas soldadas, por isso seu estudo se faz tão necessário.

Segundo, Isa *et al.*(2018), neste trabalho, o objeto de estudo é a liga de aço carbono ASTM A516-70, que é muito utilizado na área industrial de construção, por possuir boas propriedades mecânicas para condições extremas. Os resultados de testes em fadiga são representados por curvas S-N ou de Wöler, onde a tensão de ensaio (S) é representada em função do número de ciclos (N) para produzir uma ruptura. A Figura 1 apresenta a curva de fadiga S-N típica, destacando as regiões de baixo ciclo, alto ciclo e vida infinita.

Figura 1: Curva S-N típica



Fonte: Guimarães (2019).

O estudo de juntas soldadas e suas fragilidades através das curvas S-N no ensaio em fadiga possuem poucas publicações, tornando seu estudo tão necessário.

1.1 OBJETIVO

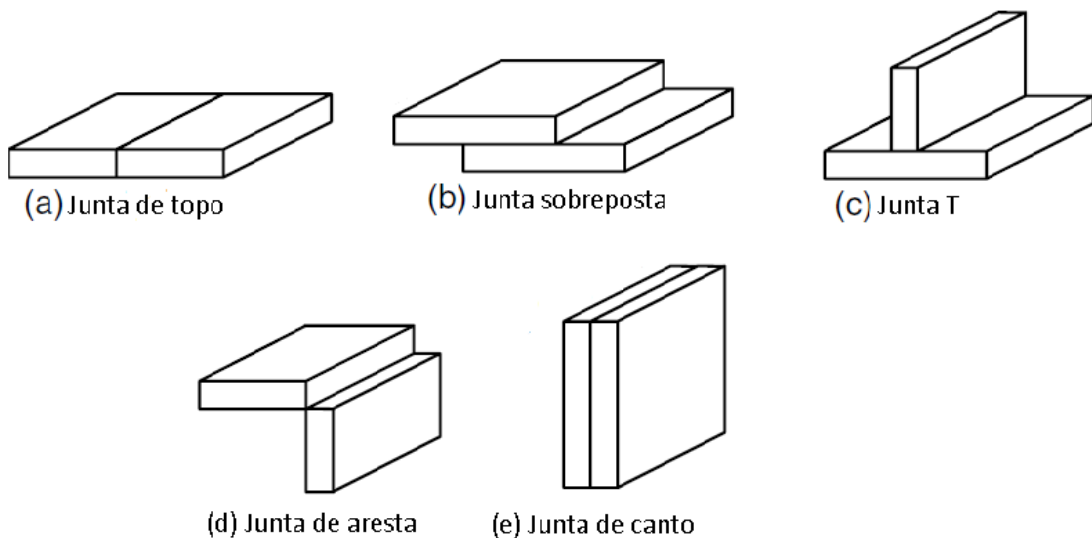
Este trabalho tem por objetivo determinar a curva de fadiga S-N para a liga ASTM A516-70, sob regime de tração, em corpos de prova com juntas soldadas pelo processo GMAW (*Gás Metal Arc Welding*), com reforço de solda e com o reforço removido e o corpo de prova lixado. A obtenção destas curvas visa auxiliar projetos em engenharia para carregamentos cíclicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 JUNTA SOLDADA E SUA GEOMETRIA

Junta, do inglês *joint*, é a região onde é executada a soldagem na peça. Elas podem apresentar diversas formas e geometrias, sendo algumas apresentadas na Figura 2.

Figura 2: Tipos de juntas



Fonte: Kou (2003).

Muitos fatores podem afetar o comportamento da fadiga, como a configuração de uma junta soldada, as propriedades do material, tensão, tipo de solda, tensão residual, procedimento de soldagem e geometria da solda. Porém juntas soldadas são capazes de ter seu limite de resistência à fadiga reduzido, se comparadas a outras juntas não soldadas, devido aos concentradores de tensão gerados por elas. Quanto mais aguda a geometria da junta, maior o concentrador de tensão, conseqüentemente, menor o limite de resistência à fadiga (Kou, 2003).

Segundo Modenesi *et al.* (2012), as juntas soldadas se dão pela formação de vários átomos dispostos em uma estrutura cristalina, onde cada átomo se dispõe a uma distância r_0 do átomo vizinho, onde a energia é mínima. Esta energia mínima faz com que o átomo não tenha uma tendência a se ligar a outros. Porém, isto não ocorre na superfície de um sólido, pois há um menor número de átomos vizinhos, fazendo com que tenha uma maior energia,

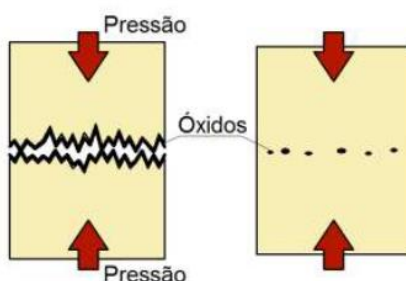
apresentando uma tendência a se unir com outros. Apesar disso, sabe-se que a união entre metais não ocorre simplesmente com a aproximação de suas superfícies. Isso ocorre devido a irregularidades superficiais, como rugosidades, cobertura de óxidos sobre os metais, umidade, gordura, poeira, etc. Com o objetivo de superar essas irregularidades foi que surgiram dois grandes grupos de processos de soldagem: soldagem por pressão e soldagem por fusão.

2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

2.2.1 Processos de soldagem por pressão

Segundo Modenesi *et al.* (2012), neste grupo inclui processos de soldagem por forjamento, ultrassom, fricção, explosão entre outros. São processos em que ocorrem deformações plásticas na superfície, devido a elevada pressão, permitindo uma aproximação entre os átomos. Estes processos podem ser vistos na Figura 3:

Figura 3: Soldagem por pressão (esquemática)

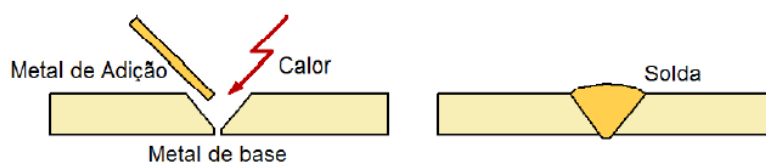


Fonte: Modenesi *et al.* (2012).

2.2.2 Soldagem por fusão

Este método consiste em aplicar calor na região da junta até a fusão do metal de adição, quando ele é utilizado. Quando o metal fundido se solidifica, as superfícies das peças são eliminadas, formando a solda (Modenesi *et al.*, 2012). Este processo pode ser visto pelo Figura 4:

Figura 4: Soldagem por fusão (esquemático)



Fonte: Modenesi *et al.* (2012).

Existem inúmeros processos de soldagem por fusão, sendo os mais amplamente utilizados nas indústrias os processos que utilizam o arco elétrico como fonte de energia, o que é o caso do processo GMAW, utilizado neste trabalho. Na Figura 5 está descrito os principais processos que utilizam como fonte de energia o arco elétrico (MODENESI *et al.*, 2012).

Figura 5: 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 aço 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 aço 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 aço 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 aço 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 aço inox. Passe de raiz de soldas em tubulações
Soldagem por Feixe Eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta Tensão. Peça +	Vácuo ($\gg 10^{-4}$ 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 oxiacetilênica		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

Fonte: Modenesi *et al.* (2012).

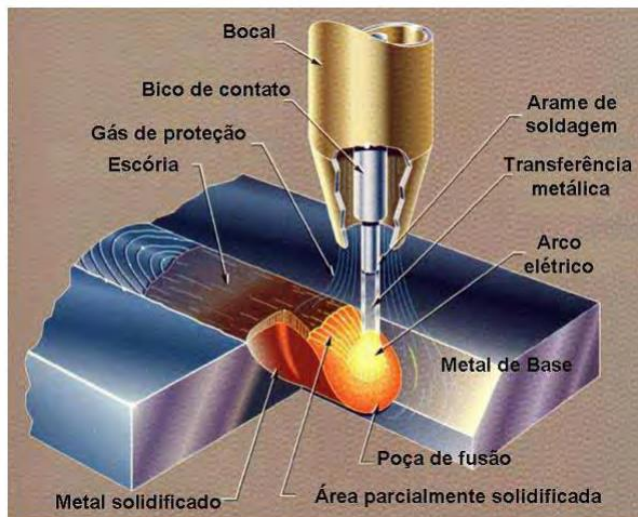
Neste trabalho o processo utilizado foi o de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), discutido a seguir.

2.2.3 Soldagem GMAW

Este processo ocorre através da produção de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo consumível e um metal apresentado na Figura 6. É utilizado ainda um gás para a proteção do arco e da poça de fusão. Este gás pode ser inerte, como o argônio e hélio, ou

ativo, como oxigênio e hidrogênio. Quando inerte é chamado de MIG (*Metal Inert Gas*) e quando ativo é chamado de MAG (*Metal Active Gas*), (MODENESI *et al.*, 2012).

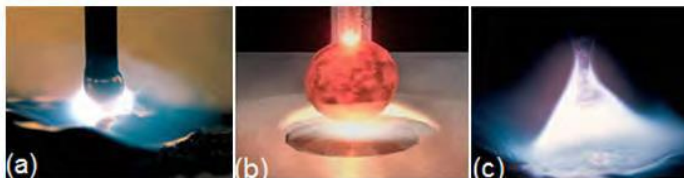
Figura 6: Processo de soldagem GMAW



Fonte: Sami (2011).

Os gases utilizados no processo ajudam a proteger a região da solda contra contaminação da atmosfera, além de dar estabilidade e direção ao arco. A transferência de metal se dá basicamente por três modos: transferência por curto-circuito, transferência globular e transferência por arco spray, conforme a Figura 7 (SARNI, 2011).

Figura 7: Modos de transferência, (a) curto-circuito, (b) globular e (c) spray ou aerosol



Fonte: Sami (2011).

Segundo Kou (2003), a transferência por curto-circuito ocorre em baixos valores de tensão e corrente, onde uma gota de metal é formada na ponta do eletrodo e vai aumentando

de diâmetro, até que por fim toca a poça de metal fundido e é atraída devido à tensão superficial.

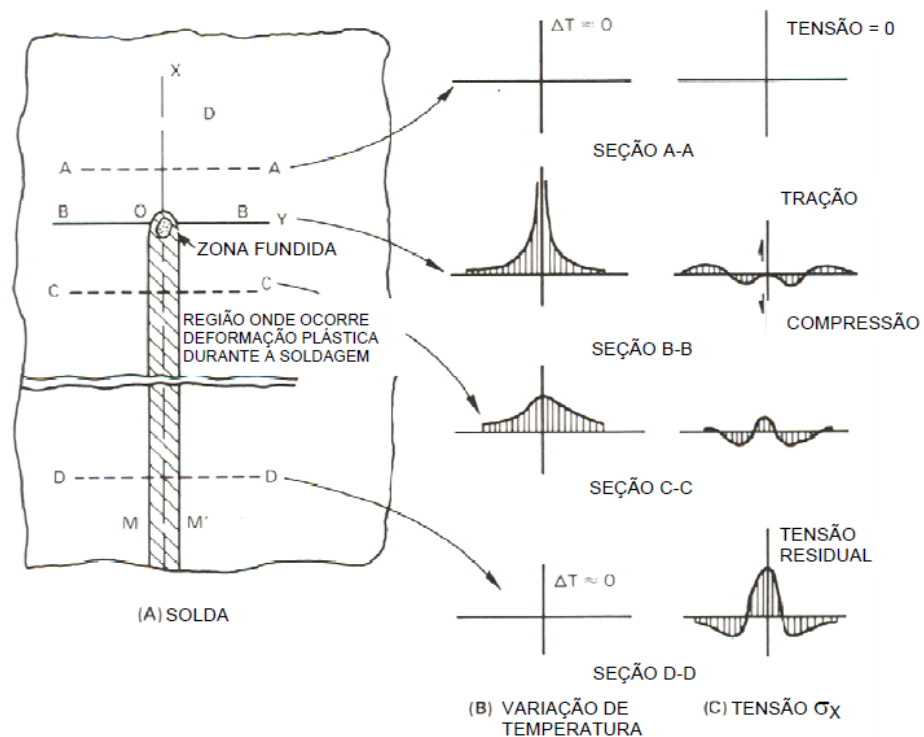
Ainda segundo Kou (2003), a transferência globular ocorre com gotas de metal sob influência da gravidade, geralmente produzindo vários respingos, que podem ser minimizados com a utilização de CO₂ como gás de proteção. Por fim a transferência de solda por spray as gotas são pequenas e frequentes, ocasionando uma transferência estável, com baixo nível de respingo.

Para efetuar a soldagem, o equipamento de utilização básico consiste em uma tocha de soldagem, fonte de energia e corrente constante, fonte de gás e alimentador de arame. (SARNI, 2011).

2.3 TENSÕES RESIDUAIS

Segundo Kou (2003), no processo de soldagem a região a ser soldada sofre um processo de aquecimento localizado e as regiões ao redor permanecem com uma temperatura bem menor. Com o aquecimento, a área soldada tende a se dilatar, porém é restringida pela estrutura ao seu redor, causando deformações elásticas e plásticas concentradas na região da solda. Devido à deformação plástica, localizada na junta soldada, geram-se tensões residuais. Essas tensões podem ser analisadas de acordo com a Figura 8.

Figura 8: Mudanças de temperatura e tensão durante a soldagem



Fonte: Kou (2003).

A área hachurada M-M' é onde ocorre a deformação plástica. Na seção A-A, que está acima da fonte de calor, não possui valores significativos de mudança na temperatura e nem na tensão. Já na seção B-B há um pico de temperatura por passar pela fonte de calor e, a tensão σ_x , se torna zero na região embaixo da fonte de calor, devido à poça de fusão, que não possui aplicação de força. Porém, nas regiões um pouco distantes da fonte de calor, as tensões se apresentam compressivas (σ_x negativo), porque a expansão dessas áreas fica restrita devido ao resto do metal que mantém uma temperatura menor. Devido ao baixo limite de elasticidade do metal nas altas temperaturas, σ_x atinge o limite de elasticidade do metal base e sua temperatura correspondente. E nas áreas longe da poça de solda, a tensão é tracionada e é balanceada com as tensões de compressão na área próxima à poça de solda. (KOU, 2003).

Na seção C-C há uma temperatura menos acentuada devido a distância da fonte de calor, sendo assim, a poça de metal e o metal base também possuem uma temperatura mais baixa e por isso uma tendência a contrair, produzindo uma tensão de tração (σ_x é positivo) nesta região e uma tensão negativa nas regiões ao redor, de compressão. (KOU, 2003).

Por fim, na seção D-D no gráfico de temperatura há valor zero por estar muito distante da fonte de calor. Nesta situação, a poça de metal e o metal base estão resfriados e contraídos, produzindo maiores tensões de tração na região próxima da solda e de compressão na região mais distante da solda. Estando esta seção bem distante da fonte de calor, a distribuição de tensão não tem uma mudança significativa, se tornando uma tensão residual. (KOU, 2003).

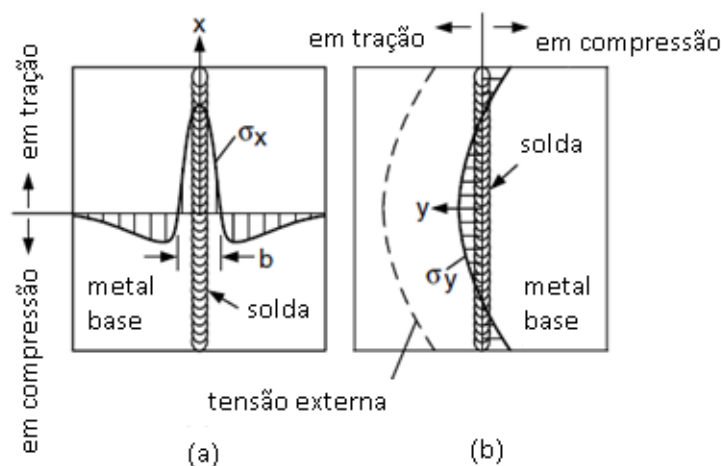
2.3.1 Consequências das tensões residuais

De acordo com Masubuchi (1980) a tensão residual σ_x , em um cordão de solda longitudinal, pode ser representada pela equação abaixo:

$$\sigma_x(y) = \sigma_m \left[1 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right] \exp \left[- \frac{1}{2 \left(\frac{y}{b} \right)^2} \right] \quad (1)$$

Onde σ_m é a máxima tensão residual, que varia conforme o limite de elasticidade do metal; b é a largura do cordão de solda e y é a tensão residual longitudinal formada ao longo da direção transversal. Na Figura 9a pode-se observar a variação da tensão residual σ_x ao longo do cordão de solda (KOU, 2003).

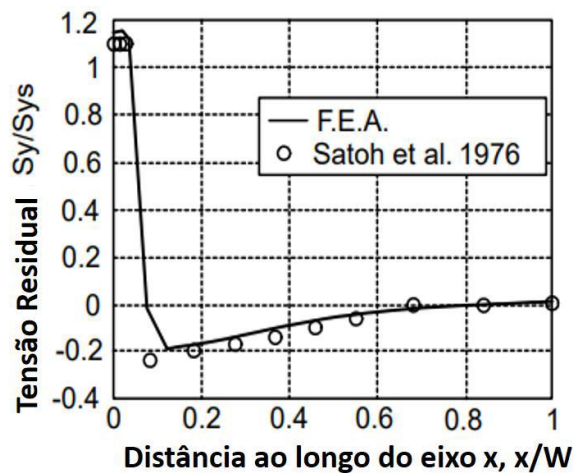
Figura 9: Distribuição longitudinal σ_x e transversal σ_y de tensão residual num cordão de solda



Fonte: Kou (2003).

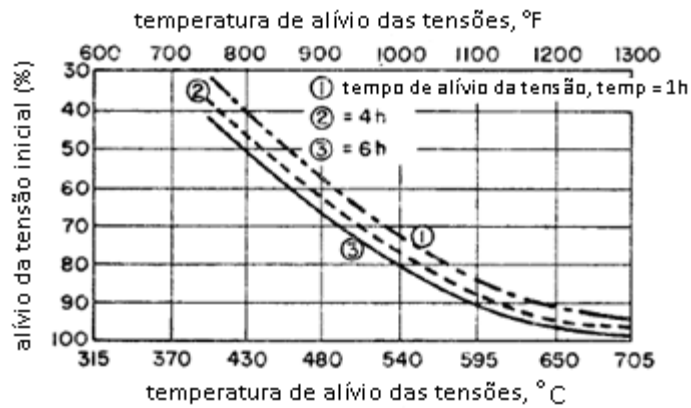
Já na Figura 9(b) percebemos um aumento da tensão de tração na parte central da solda que é balanceada por uma tensão de compressão ao final da solda. Observa-se ainda que, mesmo que haja uma tensão externa, como um apoio para a peça, não fará uma interferência significativa em σ_x (KOU, 2003). Na Figura 10 podemos observar a análise da tensão residual na junta soldada de duas peças retangulares de alumínio 5083 (60cm x 27,5cm x 1cm), realizada por solda GMAW. Os resultados calculados são baseados na análise de elementos finitos (FEA - *finite-element analysis*) e os resultados medidos são de Satoh e Terasaki (1976). As tensões residuais podem causar sérios problemas como trincas por indução de hidrogênio e fragilização por corrosão sob tensão. Porém alguns tratamentos térmicos, como pré-aquecimento, peening e vibração podem aliviar as tensões, o que pode ser observado na Figura 11. (KOU, 2003).

Figura 10: Distribuições medidas e calculadas da tensão residual em uma junta de topo do alumínio 5083



Fonte: Kou (2003).

Figura 11: Efeito da temperatura com o tempo no alívio das tensões de um aço soldado



Fonte: Kou (2003).

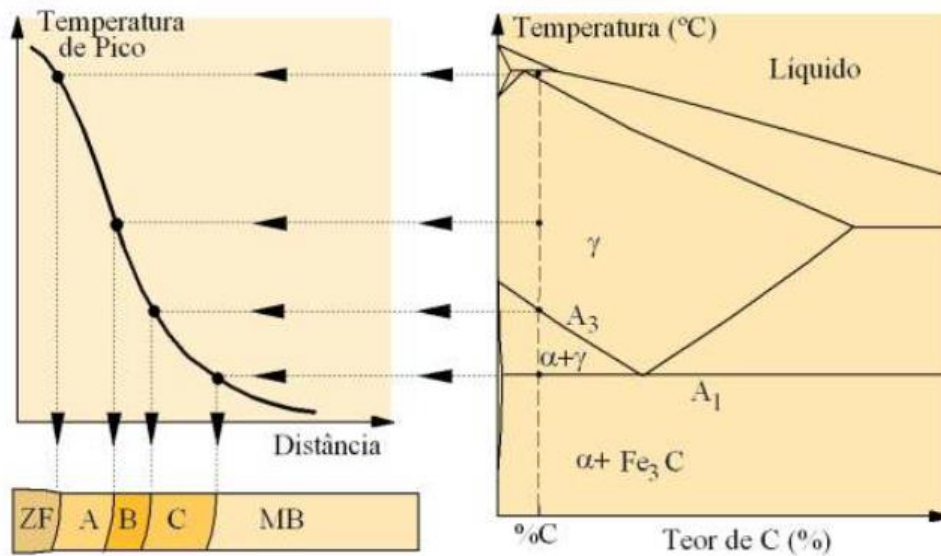
2.4 ANÁLISE METALÚRGICA DE UMA JUNTA SOLDADA

Segundo Modenesi *et al.*, 2012, primeiramente, ao se analisar uma junta soldada, verifica-se a formação de três regiões básicas:

- a) Zona fundida (ZF): região em que o metal base foi fundido;
- b) Zona Termicamente Afetada (ZTA): região não fundida, mas que foi afetada em sua microestrutura pelo ciclo térmico da soldagem;
- c) Metal Base (MB): região afastada da área fundida que não sofreu alterações em sua microestrutura.

Ainda segundo Modenesi *et al.*, 2012, a formação da ZTA ocorre devido aos ciclos térmicos durante o processo de soldagem e é influenciada pelas características do metal base. Na Figura 12 demonstra as regiões da solda de um aço carbono, material utilizado neste trabalho.

Figura 12: Regiões da solda de um aço carbono



Fonte: Modenesi *et al* (2012).

As subzonas A, B e C formam a Zona Termicamente Afetada (ZTA), onde, a partir da Zona de Fusão, na linha de fusão onde se inicia a parte estritamente sólida, há um resfriamento, com grandes taxas em A, passando por taxas menores em B e recristalizando-se em C, com menor taxa de resfriamento, conforme descrito abaixo (Modenesi *et al.*, 2012):

- A. Região de granulação grosseira (GGZTA): fica localizada junto à região de fusão e é submetida a uma temperatura de pico de 1200°C , com formação de grãos austeníticos grandes, o que caracteriza uma microestrutura rica em constituintes aciculares como bainita e martensita. Essa é uma região sensível, pois tende a ter grande dureza, perda de tenacidade e um local comum para a formação de trincas;
- B. Região de granulação fina (GFZTA) ou região normalizada: sua temperatura varia de 1200°C a temperatura de A_3 . Possui granulação fina, semelhante à de um material normalizado, não apresentando grandes problemas para a ZTA;
- C. Região intercrítica (ICZTA): Com temperaturas entre A_3 e A_1 , possui uma transformação parcial de sua estrutura original, podendo formar, em alguns casos, alta dureza e baixa tenacidade;
- MB. Região subcrítica (SCZTA): é a região de metal base, aquecido a temperaturas inferiores a A_1 . Em soldagem de aços tratados mecanicamente, esta região pode sofrer um super-revenimento e ocorrer uma perda de resistência mecânica ou dureza (em relação ao metal base).

2.5 FADIGA

2.5.1 História da Fadiga

As falhas ocorridas em velas e mastros de embarcações que velejavam por longas distâncias têm relatos de muitos anos atrás e se referiam ao fenômeno de fadiga. Entretanto, o estudo desse fenômeno se tornou mais importante com o advento da revolução industrial, onde o foco não era mais em trabalhos manuais ou de tração animal, onde o estudo era essencialmente estático (SURESH, 1998).

A história do estudo da fadiga se inicia com Albert, 1830, nas minas de Oberharz (Suresh, 1991 and A. Morin, 1853). Em 1937 Albert publicou os primeiros resultados de um ensaio em fadiga (RIBEIRO *et al.*, 2011).

Com o desenvolvimento de materiais metálicos e suas aplicações em ferrovias e pontes, as rupturas por fadiga começaram a surgir e os acidentes se tornaram mais frequentes. Então em 1842 foram realizadas pesquisas sobre fadiga de materiais devido ao acidente ocorrido próximo a Versalhes, na França, de acordo com o artigo publicado na Times of London, 1842. Nesse contexto, cientistas e pesquisadores foram propostos a estudar o fenômeno de fadiga (RIBEIRO *et al.*, 2011).

Em 1842, Rankine, engenheiro inglês, se tornou famoso por sua contribuição no campo da engenharia mecânica e reconheceu que a concentração de tensão em certas regiões de componentes mecânicos favorecia o aparecimento de fraturas (RANKINE, 1842).

Porém foi Wöhler, em 1850 e 1860, que conduziu as investigações sobre os carregamentos sobre os eixos das ferrovias. Os ensaios foram realizados em laboratório de fadiga sob tensões repetidas submetidas a flexão, torção e cargas axiais (WÖHLER, 1860). Esses estudos mostraram que a vida em fadiga aumentou com a diminuição do campo de tensão aplicado, de modo que, abaixo de uma certa carga de tensão aplicada, parecia ter vida infinita. Por outro lado, ele descobriu que a vida em fadiga foi drasticamente reduzida na presença de entalhes. Os estudos sugerem um fator de segurança de dois para resistência estática e um adicional de dois para materiais de fadiga que são válidos para vida infinita de projeto.

Wöhler representou seus resultados de teste na forma de tabelas. Spangenberg, seu sucessor, como diretor do "*Mechanisch-Technische-Versuchsanstalt*" em Berlim, traçou os resultados de Wöhler como formas curvas, embora na forma incomum de abscissa linear e

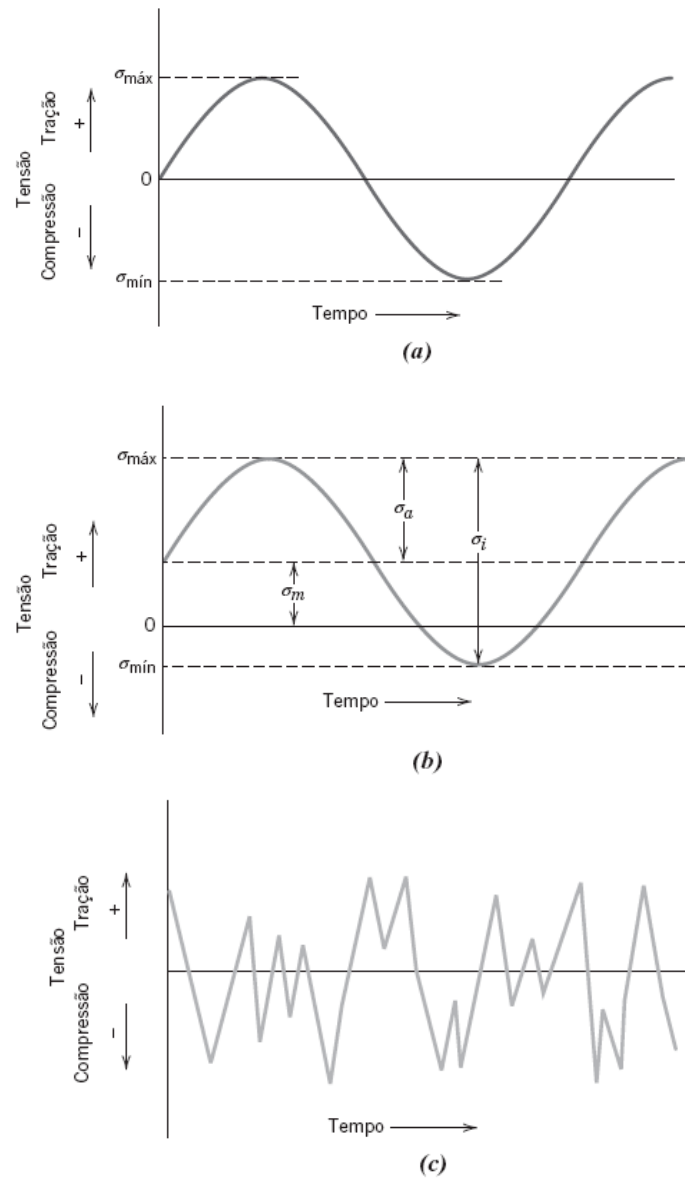
ordenada, obtendo curvas SN (SPANGENBERG, 1874 e 1879). De acordo com Ribeiro *et al* (2011), as curvas SN foram chamadas então de “curvas Wölher” desde 1936.

2.5.2 Mecanismo

A fadiga é a deterioração de materiais submetidos a esforços mecânicos de intensidades variáveis, num fenômeno progressivo, podendo levar à ruptura. Ela ocorre em três fases: nucleação da trinca, propagação da trinca e ruptura. Sua ocorrência é a grande responsável por inúmeras falhas em estruturas que sofrem com algum tipo de movimento. (MODENESI *et al.*, 2012)

De acordo com Callister (1940), a tensão aplicada em um material pode ser de natureza axial (tração-compressão), de flexão (dobramento) ou de torção. No exemplo da Figura 13 podemos perceber três tipos de oscilações em função do tempo, em 13a, com uma tensão de tração máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) e uma tensão de compressão mínima ($\sigma_{\text{mín}}$) de igual magnitude, variando de forma senoidal em relação ao tempo, sendo denominado *ciclo de tensões alternadas*; em 13b os valores máximos e mínimos são assimétricos em relação a zero, chamado então de *ciclo assimétrico de tensão*; e por fim, em 13c, há o ciclo de tensões aleatórias, com a tensão variando aleatoriamente em amplitude e frequência.

Figura 13: Tipos de tensão em fadiga: (a) ciclo de tensões alternadas, (b) ciclo assimétrico de tensão e (c) ciclo de tensões aleatórias



Fonte: Callister (2020).

No ciclo assimétrico notam-se parâmetros como a tensão média (σ_m), o intervalo de tensões para um carregamento cíclico (σ_i), a amplitude da tensão (σ_a) e a razão entre tensões (R), que são calculados a seguir (CALLISTER, 1940)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (2)$$

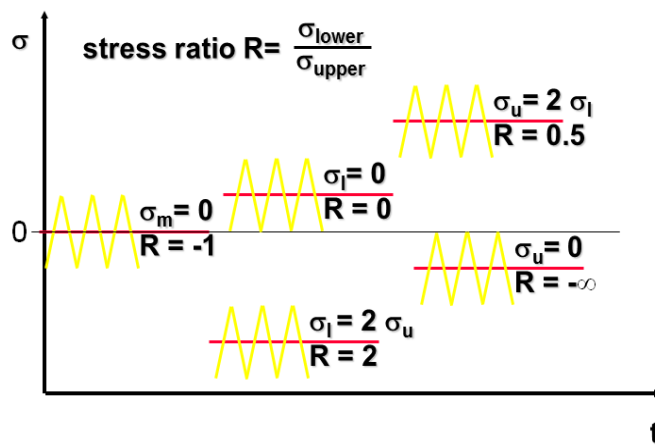
$$\sigma_i = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (3)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_i}{2} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (5)$$

A razão entre as tensões (R) é um importante fator para determinar as condições em que vai operar a curva S-N. Para condições de carregamento totalmente reversas com tensão média de 0, então $R=-1$. Para um carregamento estático, $R=1$. E para o caso em que a tensão média é de tração e igual à amplitude da tensão, $R=0$ (CALLISTER, 1940). Na Figura 14 há um gráfico com valores de R.

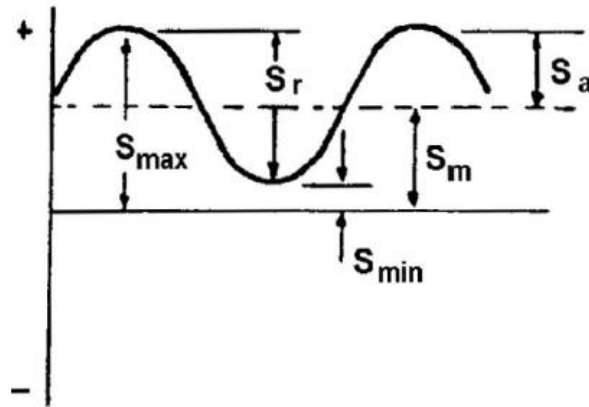
Figura 14: Diagrama da razão entre as tensões (R)



Fonte: SIEMENS (2019).

Além das tensões cíclicas já descritas, neste trabalho é realizado o ensaio com uma tensão axial estritamente positiva, ou seja, sob o regime de tração-tração, conforme na Figura 15 (SIEMENS, 2019).

Figura 15: Ciclo de tensão flutuante em regime de tração



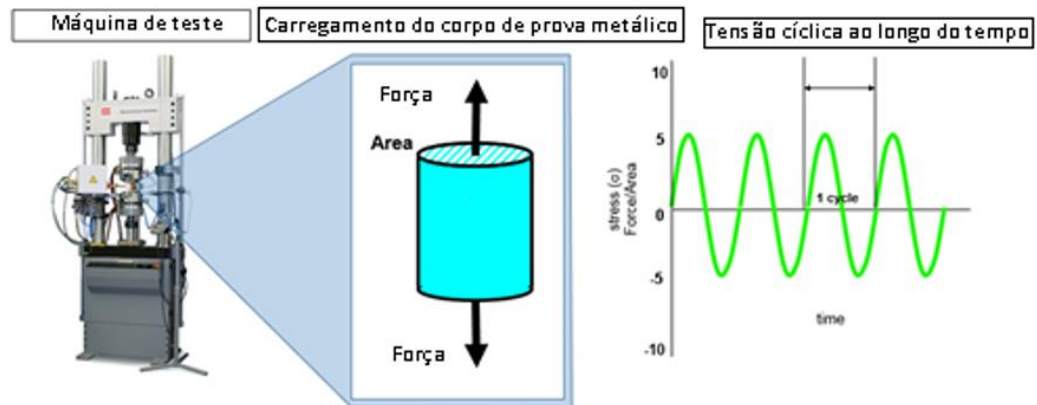
Fonte: Dieter (1981).

2.5.3 Ensaio de Fadiga

O ensaio de fadiga é a aplicação de uma carga cíclica a um corpo de prova, seguindo os padrões estabelecidos para o ensaio que se deseja realizar. No caso de uma junta soldada, objeto de análise deste trabalho, ocorre inúmeras alterações metalúrgicas no metal base devido ao calor transmitido durante a solda, o que faz com que o ensaio de fadiga seja um importante teste para avaliar a resistência da junta soldada.

O ensaio ocorre da seguinte forma: o corpo de prova é colocado numa máquina de teste em fadiga, submetendo a ensaios cíclicos alternados, conforme a Figura 16, até sua ruptura.

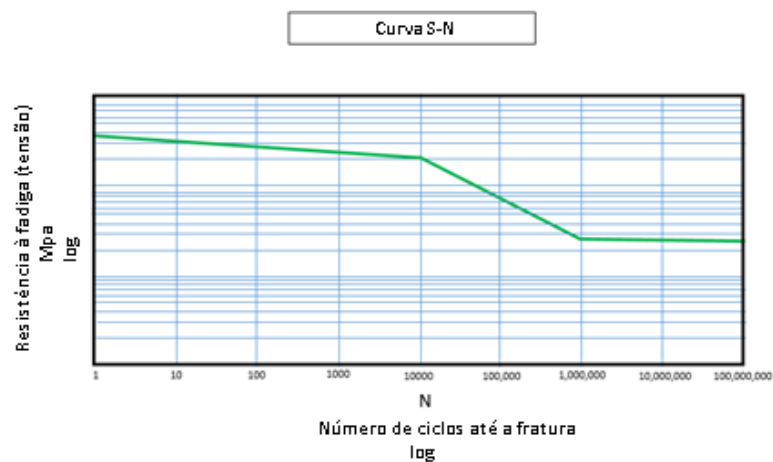
Figura 16: Ensaio em fadiga utilizado para criar curvas S-N



Fonte: SIEMENS (2019).

Vários corpos de prova são necessários ser testados para obter uma curva S-N. Na Figura 17 está ilustrada uma curva S-N derivada de um ensaio de um corpo de prova de material metálico. Nesta curva percebemos que, quanto maior a amplitude de tensão cíclica aplicada, menor é o número de ciclos até a fratura. (SIEMENS, 2019)

Figura 17: Curva S-N de um material metálico



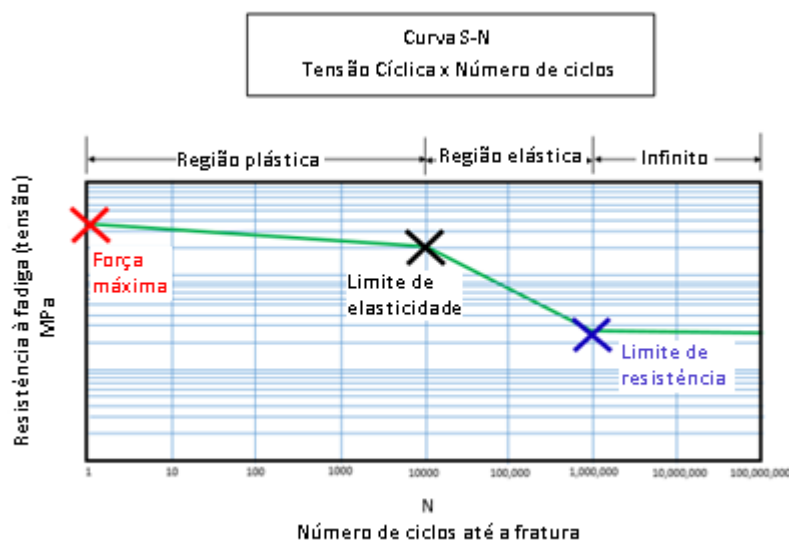
Fonte: SIEMENS (2019).

2.5.4 Curvas S-N ou Curvas de Wöhler

A Curva S-N é o gráfico de uma tensão alternada pelo número de ciclos até a fadiga de um determinado material, com a tensão e números de ciclos normalmente obtidos em escala

logarítmica. A curva S-N pode ser dividida em três regiões: região plástica, elástica e de vida infinita, como podemos ver na Figura 18 (SIEMENS, 2019).

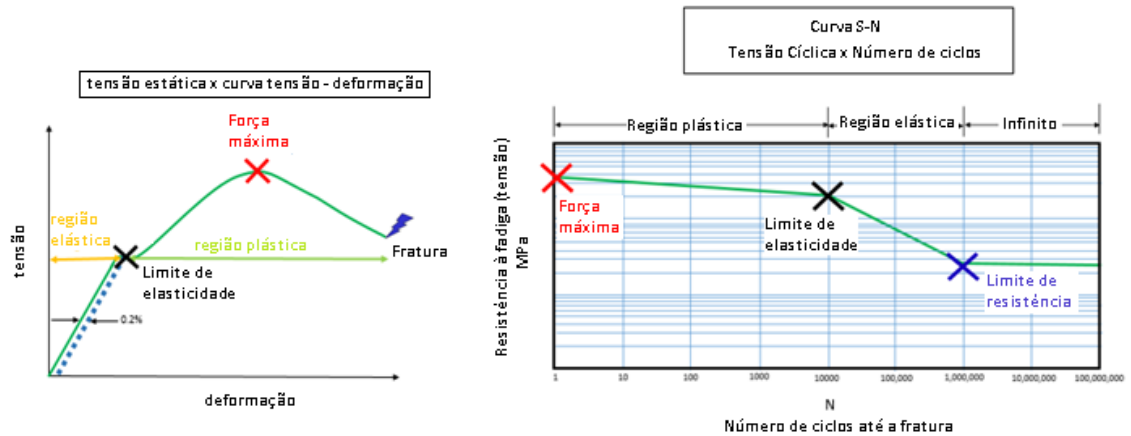
Figura 18: Curva S-N contendo a força máxima, força de rendimento e limite de resistência



Fonte: SIEMENS (2019).

Três fatores separam as regiões: tensão máxima, que é a tensão requerida para que a falha ocorra com um ciclo; tensão de rendimento, dividindo a área plástica da elástica, também conhecida por região de alto ciclo, onde um grande número de ciclos de tensão de baixa amplitude pode fazer com que a peça falhe; e tensão limite, onde se as tensões permaneceram abaixo desta, não ocorrerá falha. Estas regiões também podem ser claramente observadas no gráfico de tensão deformação, Figura 19 (SIEMENS, 2019).

Figura 19: Gráfico tensão-deformação e Curva S-N



Fonte: SIEMENS (2019).

Alguns materiais, como o aço, possuem uma região chamada de vida infinita, onde, se operarem em tensões abaixo da tensão limite dessa região, nunca ocorrerá uma falha. Porém, para que isso ocorra, a região de vida infinita deve levar em conta algumas condições: está baseada somente no número de ciclos, assumindo que a corrosão e outros fatores não estão presentes; se qualquer um dos níveis de tensão cíclica estiver mais alto e na região plástica ou elástica, o limite de resistência já não está mais em vigor (SIEMENS, 2019).

2.6 AÇO CARBONO A516 GR 70

O aço carbono ASTM A 516-70 é amplamente utilizado na área industrial de construção, por possuir boas propriedades mecânicas para condições extremas. Sua principal utilização é em serviços de moderadas e baixas operações (ISA *et al.*, 2018).

A chapa de aço do ASTM A516-70 é conhecida principalmente pela utilização em vasos de pressão soldados, onde a tenacidade ao entalhe aprimorada traz grande importância para a indústria. Este material também é excelente para utilização em ambientes com a temperatura inferior à temperatura ambiente. Ele oferece um maior rendimento e resistência à tração quando comparado ao ASTM A516-65 e pode operar em temperaturas mais baixas. É ideal para o alto padrão definido pela indústria de petróleo, gás e petroquímica (ISA *et al.*, 2018).

Segundo a norma ASTM A-516 (1990), esse aço possui especificação para chapa grossa de aço carbono-manganês, onde a temperatura de serviço é de baixa a moderada, com

faixa de trabalho de -45°C a 350°C . Ainda segundo a norma, as chapas estão definidas com espessuras máximas de acordo com o grau, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Graus e espessura da chapa

Grau - U.S., em ksi [SI, em	
MPa]	Espessura Máxima (mm)
55 [380]	305
60 [415]	205
65 [450]	205
70 [485]	205

Fonte: Norma ASTM A516 (1990).

As propriedades mecânicas desse aço, segundo a norma ASTM A516 (1990), estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço A516 grau 70

LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento (%)	
		em 200 mm	em 50 mm
≥ 260	De 485 a 620	≥ 17	≥ 21

Obs.: corpos-de-prova retirados no sentido transversal à laminação da chapa.

Fonte: Norma ASTM A516 (1990).

As especificações de composição química (% em peso) do aço ASTM A-516 grau 70 são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações químicas do aço ASTM A 516 grau 70

Elemento	12,71 a	50,81 a		
(% em peso)	$\leq 12,70$ mm	50,80 mm, inclusive	101,60 mm, inclusive	$> 101,60$ mm
Carbono	$\leq 0,27$	$\leq 0,28$	$\leq 0,30$	$\leq 0,31$
Manganês		0,85 a		
Fósforo		1,20		
Enxofre		$\leq 0,035$		
Silício		$\leq 0,035$		
Cobre		0,15 a		
Níquel		0,40		
Cromo		$\leq 0,40$		
Molibdênio		$\leq 0,40$		
Vanádio		$\leq 0,30$		
Nióbio		$\leq 0,12$		
Titânio		$\leq 0,030$		
		$\leq 0,020$		
		$\leq 0,030$		

Obs.: análise de panela e/ou corrida.

Fonte: Norma ASTM A516 (1990).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Para este trabalho foi utilizado como metal base o aço carbono ASTM A516 Gr 70 e como metal de adição o AWS ER 70S-6, com as composições químicas segundo a Tabela 4.

Tabela 4: Composição química

Metal Base ASTM A516 Gr 70	Metal de Adição AWS ER 70S-6
C – 0,22%	C – 0,07%
Mn – 1,01%	Mn – 1,47%
Si – 0,18%	Si – 0,86%
P – 0,03%	P – 0,01%
S – 0,01%	S – 0,01%
Cu – 0,01%	Cu – 0,13%
Ni – 0,01%	Ni – 0,02%

Fonte: Neres *et al.*(2020).

3.2 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM GMAW

Foram realizadas soldagens pelo processo GMAW convencional, sem preaquecimento, em metal base ASTM A516 Gr 70 de 6,4mm de espessura. As juntas foram preparadas com chanfro em duplo V, com ângulo de 80°. O aporte térmico utilizado no processo de soldagem foi de 1,02 kJ/mm. Para a seleção do metal de adição AWS ER 70 S-6 foi utilizado os fundamentos de soldabilidade das publicações Lippold (2014). Os parâmetros de soldagem estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros de soldagem

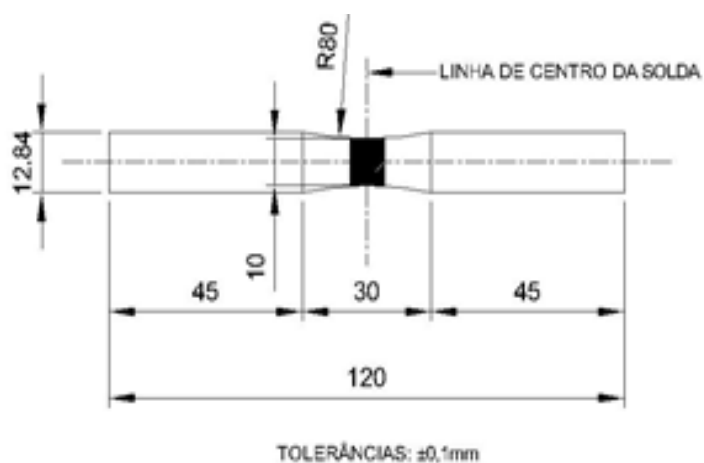
Corrente de Soldagem	196 A
Tensão de Arco	26 V
Velocidade de Soldagem	26,75 cm/min
Proteção Gasosa	75% Ar + 25% CO ₂
Vazão do gás	18 l/min
Arame Eletrodo	AWS ER 70S-6 Ø 1,2 mm
Velocidade do Arame	5,87 m/min

Fonte: Neres *et al.*(2020).

3.3 PARÂMETROS DO CORPO DE PROVA

Os corpos de prova foram preparados segundo a norma ASTM E466 (1990) de corpos de prova para ensaio em fadiga. Os CDP's foram usinados removendo 1mm de material no último passe e em seguida, lixados no sentido longitudinal, conforme a norma. Na Figura 20 se encontra o esquema do corpo de prova utilizado, com suas medidas.

Figura 20: Corpo de prova segundo o padrão da norma E466 para fadiga



Fonte: Neres *et al.*(2020).

3.4 ENSAIO EM FADIGA

Para a realização do ensaio em fadiga, foram aplicadas cargas axiais nos corpos de prova com uma razão de tensão $R=0,1$, com carregamento cíclico em regime de tração-tração, com frequência de 20Hz. Conforme Callister (1940), as tensões foram calculadas em função da área de cada corpo de prova. Foram selecionados 03 níveis de tensões na faixa de deformação plástica dos materiais: 481MPa, 512 MPa e 534 MPa. Foram testados corpos de prova com metal base laminado, metal base lixado e com processo de solda GMAW (Gás Metal Arc Welding).

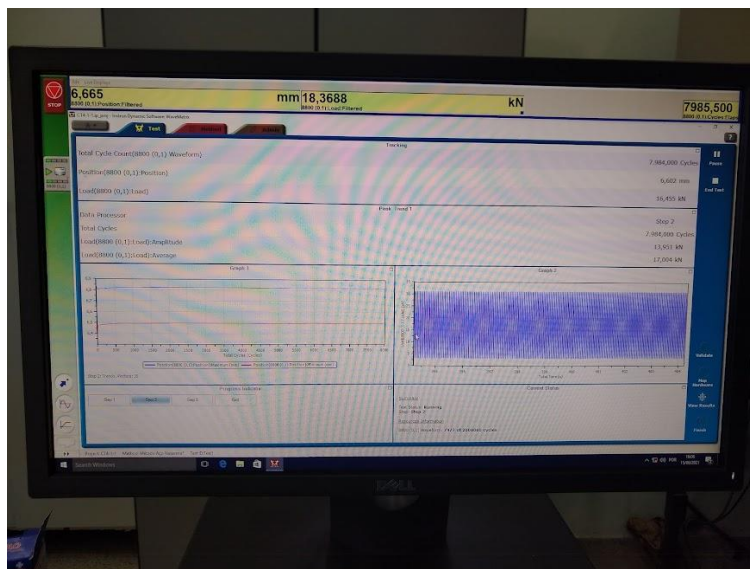
O equipamento utilizado é a máquina universal INSTRON modelo 8801, do laboratório do DMT (Departamento de Materiais e Tecnologia) da FEG/UNESP de Guaratinguetá (Fotografias 21 e 22). O ensaio foi realizado com o corpo de prova em temperatura ambiente, conforme a Fotografia 23.

Fotografia 1: Máquina de ensaio em fadiga INSTRON 8801



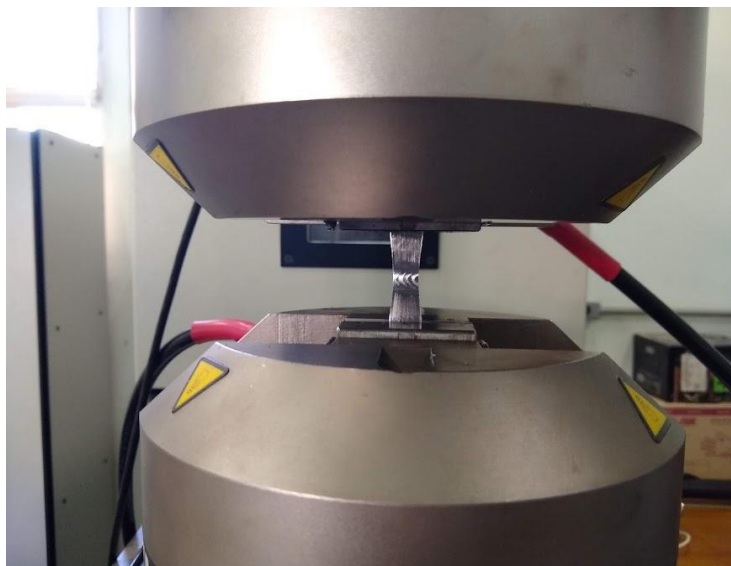
Fonte: Produção do próprio autor.

Fotografia 2: Computador de análise do ensaio



Fonte: Produção do próprio autor.

Fotografia 3: Corpo de prova fixado para condução do teste



Fonte: Produção do próprio autor.

3.5 ENSAIO DE MICRODUREZA

Foram realizados ensaios no microdurômetro da Shimadzu Micro Hardness Tester da marca Shimadzu, do laboratório do DMT (Departamento de Materiais e Tecnologia) da FEG/UNESP, conforme Fotografia 4.

Fotografia 4: Microdurômetro Shimadzu HMV-2



Fonte: Produção do próprio autor.

O Microdurômetro é da série HMV-2 e realiza o ensaio em microdureza Vickers.

Para realizar o ensaio, cada corpo de prova foi fixado com uma fita na base do microdurômetro, com valor de dureza Vickers de 0,5HV, conforme Fotografia 5.

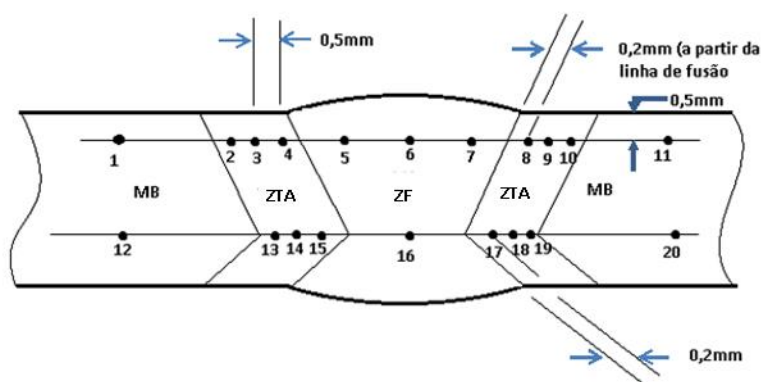
Fotografia 5: Fixação do corpo de prova



Fonte: Produção do próprio autor.

Os ensaios foram realizados com 20 indentações, sendo a 0,5mm da superfície e na linha central, nas três regiões da solda: metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida (ZF), conforme Figura 21.

Figura 21: Pontos e regiões do ensaio de microdureza



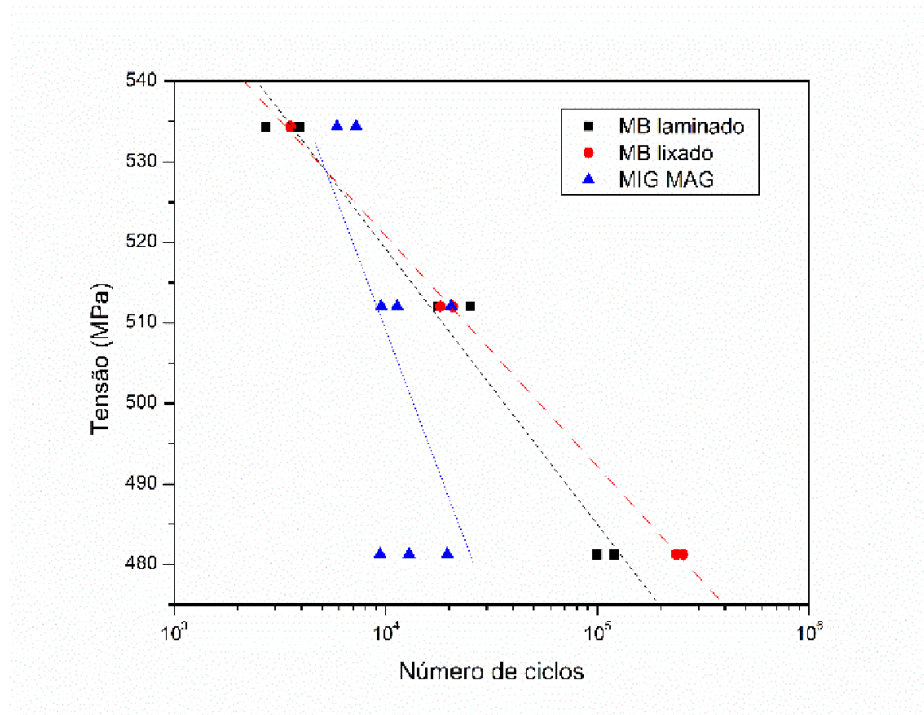
Fonte: Produção do próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIO EM FADIGA

Através do ensaio em fadiga obteve-se a curva S-N da Figura 21.

Figura 22: Curva S-N obtida do ensaio



Fonte: Neres *et al.*(2020).

Foram aplicados três níveis de tensão máxima, para assim obter o número de ciclos entre a solda e o metal base até a ruptura. Neste gráfico, ao analisarmos o metal base laminado, o número de ciclos aumenta de forma significativa conforme é diminuída a tensão máxima aplicada, assim como no metal base lixado. Porém, no metal base lixado, quando aplicadas tensões cíclicas mais baixas, observa-se um aumento ainda maior de sua vida em fadiga, o que pode ser resultado de uma menor rugosidade superficial após o processo de lixamento, diminuindo as tensões residuais, aumentando a resistência à nucleação. Já no corpo de prova soldado pelos processos MIG/MAG percebe-se que, ainda que haja uma diminuição na tensão máxima aplicada, o número de ciclos não tem grandes alterações, o que pode ser resultado das alterações microestruturais causadas pelo processo de soldagem, gerando maiores tensões residuais, regiões de maior dureza, favorecendo a nucleação.

Foram realizados ensaios em corpos de prova com reforço de solda e em corpos de prova com reforço removido por fresamento e lixado. Na Fotografia 6 está a foto do corpo de prova com o reforço de solda removido e lixado após o ensaio em fadiga. Nele podemos observar que a fratura ocorreu na região central que caracteriza o metal de solda. O processo de fresamento pode ter induzido tensões residuais compressivas nas camadas sub superficiais dos corpos de prova, aliviando as tensões residuais trativas originadas pela soldagem, retardando o processo de nucleação das trincas de fadiga e oferecendo resistência ao crescimento delas.

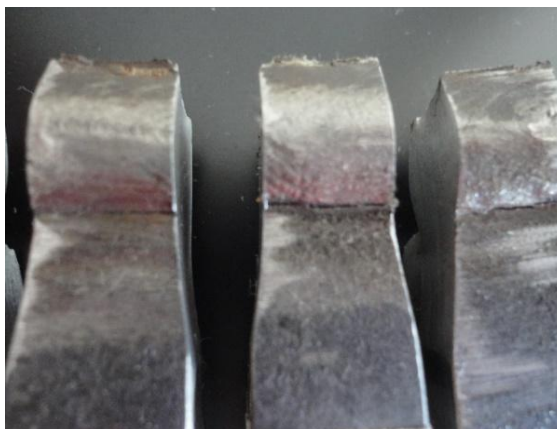
Fotografia 6: Ruptura do corpo de prova com reforço de solda removido após o ensaio em fadiga



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Fotografia 7 foi ensaiado um corpo de prova com reforço de solda, podendo ser observado a nucleação na margem do reforço de solda. Isto se deve ao fator geométrico de seção, que gerou um concentrador de tensão no pé da solda (linha de fusão), corroborado pela RGGZTA, de menor tenacidade, vencendo a competição com possíveis trincas que possam ter sido nucleadas no MS sob tensões residuais trativas. Uma vez nucleada a trinca, propiciada pelo concentrador de tensão geométrico, a maior dureza da RGGZTA favoreceu sua propagação.

Fotografia 7: Ruptura do corpo de prova com reforço de solda após o ensaio em fadiga

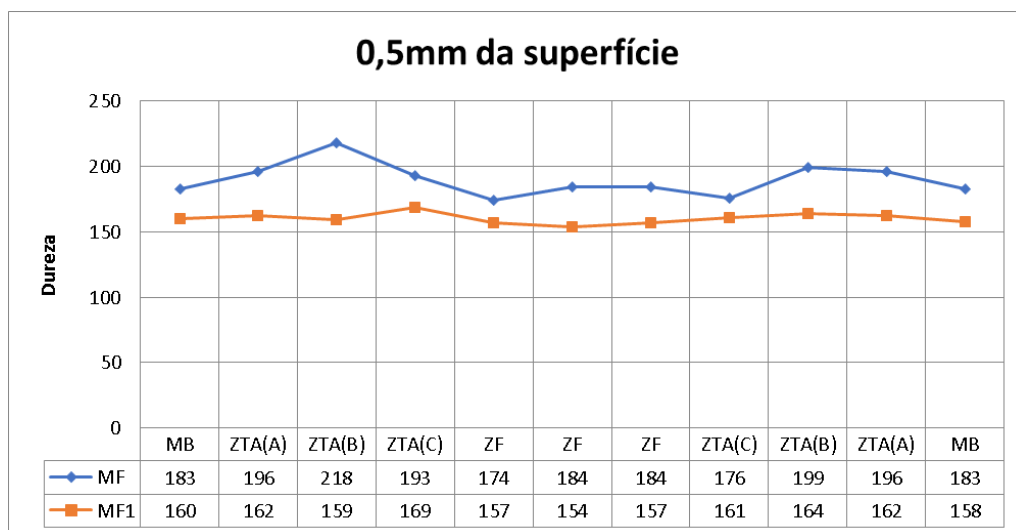


Fonte: Neres *et al.*(2020).

4.2 ENSAIO DE MICRODUREZA

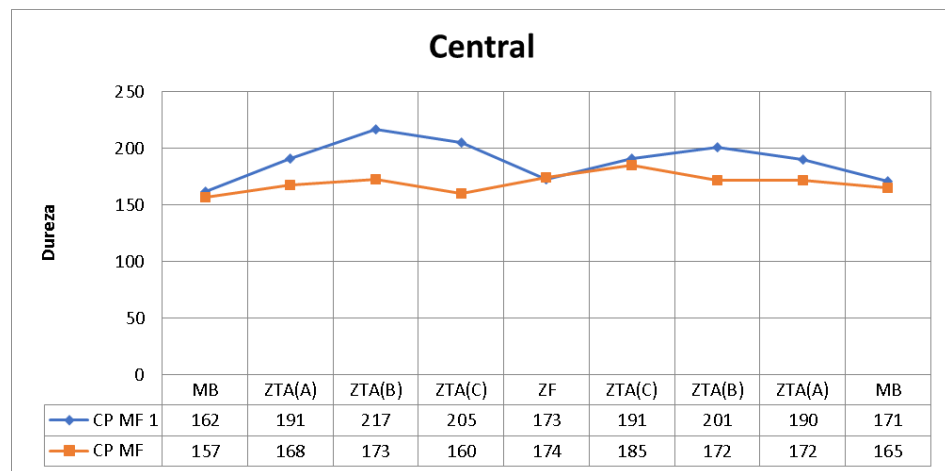
Foram realizados ensaios de microdureza obtendo os seguintes gráficos:

Figura 23: Gráfico Microdureza a 0,5mm da superfície



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 24: Gráfico Microdureza linha central



Fonte: Produção do próprio autor.

Observando estes gráficos percebemos um aumento de dureza nas regiões da Zona Termicamente Afetada (ZTA), especialmente na região ZTA(B), tanto na região central como na região a 0,5mm da superfície. As regiões do metal base, que se encontram mais distantes da fonte de solda, não sofrendo alterações, possuem uma medida menor de dureza. A zona de fusão (ZF), no geral, apresenta um aumento intermediário de dureza, sendo maior na região mais próxima da superfície.

5 CONCLUSÃO

Analisando a curva S-N obtida do ensaio em fadiga do metal base laminado, metal base lixado e os corpos de prova com solda MIG/MAG, percebemos uma pequena variação do número de ciclos dos corpos de prova com solda MIG/MAG. Como explicitado no início desse trabalho, o processo de soldagem causa alterações microestruturais, levando a uma diminuição do número de ciclos para vida em fadiga do material. Isso foi comprovado com a curva obtida, onde o ciclo de tensões permanece quase invariável com a diminuição da tensão máxima aplicada no ensaio para a análise no corpo de prova com solda GMAW.

Através da análise microestrutural, com a análise de dureza, percebe-se um aumento de dureza na Zona Termicamente Afetada (ZTA) podendo apresentar uma baixa tenacidade, favorecendo a formação de trincas.

Através dos corpos de prova com reforço de solda e com reforço removido e lixado, conforme as Fotografia 6 e 7, respectivamente, observam-se diferentes regiões de nucleação, sendo o corpo de prova com reforço removido iniciar a nucleação na região central, podendo ser resultado das tensões residuais trativas, como discutido em teoria. Já o corpo de prova com reforço de solda apresenta nucleação na região das margens do reforço, onde há uma região de concentração de tensão devido à descontinuidade geométrica, tornando-se favorável à nucleação.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, W. D. JÚNIOR; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**: uma abordagem integrada. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CRUZ, W. P. **Análise estatística usando a distribuição de Weibull de ensaios de fadiga axial em juntas soldadas pelo processo GMAW E GMAW-CW**. 2013. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, Marabá, 2013.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

EASTERLING, K. **Introduction to the physical metallurgy of welding**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1983.

GUIMARÃES, C. R. **Tenacidade à fratura e resistência à iniciação e ao crescimento de trinca por fadiga de aços para aplicação em moinhos tubulares**. 2019. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

ISA, M. R.; ZAROOG, O. S.; MURUGAN, K.; GUMA, S. O. K.; ALI, F. S. Improvement of mechanical properties and fatigue life by shot peening process on ASTM A516 Grade 70 steel. **Journal of Fundamental and Applied Sciences**, Malaysia, v. 14, n. 4, p. 440-442, dec. 2018.

KOU, S. **Welding metallurgy**. 2nd ed. New Jersey: Hoboken, 2003.

LIPPOLD, J. C. **Welding Metallurgy and Weldability**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

MASUBUCHI, K. **Analysis of welded structures**: residual stresses, distortion and their consequences. New York: Pergamon Press, 1980. 641p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; DAGOBERTO B. S. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 209 f. (apostila do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais)

MORIN, A. **Leçons de mécanique pratique-résistance des matriaux**. Paris: Librairie de L. Hachette Et Cie, 1853. 456 p.

NERES, W. S.; DOMINGUES JUNIOR, J. B. A.; PANÃO, J. N.; FERNANDES, M. F.; VOORWALD, H. J. C.; NEVES, N. Estudo do comportamento em fadiga de juntas soldadas pelo processo GMAW. *In*: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA 22., 2020, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo, 2020. p. 69-69.

RANKINE. On the causes of the unexpected breakage of the journals of railway axles and on the means of preventing such accidents by observing the law of continuity in their construction. **Minutes Of Proceedings Institution Of Civil Engineers**, London, p. 105-108, jan. 1842.

RIBEIRO, A. S.; CORREIA, J. A. F. O.; SILVA, A. L. L.; DE JESUS, A. M. P. Evolution of fatigue history. *In*: BRAZILIAN CONGRESS OF MECHANICAL, 11., 2011, Natal. **Anais [...]**. Natal: ABCM, 2011.

SARNI, M. I. J. **Estudo da soldagem GMAW convencional e pulsada de aço estrutural temperado e revenido utilizando eletrodo de alma metálica**. 2011. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2011.

SATO, K; TERASAKI, T. Effect of Welding Conditions on Residual Stresses Distributions and Welding Deformation in Welded Structures Materials. **Journal Of The Japan Welding Society**. Osaka, p. 42-53. jan. 1976.

SIEMENS. **What is a SN-curve?** 2019. Disponível em: <https://blog.fastformat.co/como-fazer-citacao-de-artigos-online-e-sites-da-internet>. Acesso em: 13 jan. 2022.

SPANGENBERG, L. Über das Verhalten der Metalle bei wiederholten Anstrengungen. **Z. Bauw**, v. 24-25, p. 473–495, 1874.

TREMARIN, R. C.; PRAVIA, Z. M. C. Previsões de vida fadiga segundo normas técnicas: uma revisão crítica. **Soldagem e inspeção**, São Paulo, v. 22, n. 3, p. 281-299, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/vX7PWJjvvTd9bHNZyp6MHzx/?lang=pt>. Acesso em: 13 jan. 2022.

WÖHLER, A. Versuche zur Ermittlung der auf die Eisenbahn wagenachsen einwirkenden Kräfte und die Widerstandsfähigkeit der Wagen-Achsen. **Zeitschrift für Bauwesen**, p. 583-616, 1960.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 466-15**: Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. 15 ed. West Conshohocken: Astm Internacional, 2015. 6 p. American Society For Testing And Materials

PATEL, Sachin; PATEL, Piyush; MEHTA, Vishal. Experimental Study of the Effect of Heat Input on Mechanical Properties of TIG Welded Joints of SA516 Grade 70 Material. **International Journal Of Research And Scientific Innovation (Ijrsi)**. Surat, p. 29-35. maio 2017.