

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS - PPGE3M

MARCELO CARPENEDO

EFEITOS QUE A MARCAÇÃO NA JUNTA DE SOLDA TEM NA VIDA EM
FADIGA DE CHAPAS SOLDADAS COM CORDÕES INTERMITENTES PELO
PROCESSO DE SOLDAGEM MAG NO AÇO ASTM A1011 GR50 CLASSE 2

Porto Alegre
2021

MARCELO CARPENEDO

EFEITOS QUE A MARCAÇÃO NA JUNTA DE SOLDA TEM NA VIDA EM
FADIGA DE CHAPAS SOLDADAS COM CORDÕES INTERMITENTES PELO
PROCESSO DE SOLDAGEM MAG NO AÇO ASTM A1011 GR50 CLASSE 2

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre
2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões

Vice-Reitor: Patricia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Carla Schwengber ten Caten

Vice-Diretor: Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Afonso Reguly

Vice-Coordenador: Andréa Moura Bernardes

MARCELO CARPENEDO

EFEITOS QUE A MARCAÇÃO NA JUNTA DE SOLDA TEM NA VIDA EM
FADIGA DE CHAPAS SOLDADAS COM CORDÕES INTERMITENTES PELO
PROCESSO DE SOLDAGEM MAG NO AÇO ASTM A1011 GR50 CLASSE 2

Esta Tese de Doutorado foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Materiais e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Afonso Reguly

Prof. Dr. Afonso Reguly

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Guilherme Vieira Braga lemos (Dr.) – DEMET/UFRGS _____

Arnaldo Ruben Gonzalez (Dr.) – PROMEC/UFRGS _____

Fabiano Dornelles Ramos (Dr.) – IFRS _____

Dedico este trabalho à minha esposa Jocieli, que sempre me incentivou a continuar com os estudos mesmo com as dificuldades geradas pela escassez de tempo; aos meus filhos Lorenzo e Pedro, para quem deixo um pequeno exemplo sobre o prazer em se dedicar aos estudos; aos meus pais Valdir e Janete e ao meu irmão, Mateus, que me ensinaram a correr atrás dos meus objetivos e nunca mediram esforços para garantir que o início da minha caminhada em direção à independência fosse alcançada de forma segura e baseada em valores sustentados pela integridade ética e moral e nos valores da família. Devemos olhar cada conquista em nossas vidas não como uma simples vitória, mas sim em como o universo conspira para que as coisas aconteçam de acordo com o resultado de nossas atitudes e nossos valores. Faça o bem e terá o bem.

AGRADECIMENTOS

A lista de agradecimentos é consideravelmente longa, mas em primeiro lugar e com inquestionável importância agradeço primeiramente a Deus por me conceder a oportunidade de chegar a este momento. Agradeço incondicionalmente aos meus pais, Valdir e Janete, e ao meu irmão, Mateus, pelo imensurável esforço em me proporcionar suporte material e emocional para vencer os obstáculos da vida, mostrando que nossa trajetória é resultado direto de nossas escolhas e atitudes e que a família é a entidade mais valiosa em nossas vidas. Agradeço imensamente à minha esposa, Jocieli, e aos meus dois filhos, Lorenzo e Pedro, pela paciência e pela compreensão sobre o tempo que, muitas vezes, tive que remover do convívio familiar e do descanso para dedicar aos estudos, assim como espero que entendam que o resultado de minhas conquistas é entregue a eles em sua plenitude. Agradeço à AGCO do Brasil, pois por meio desta fui imerso efetivamente no mundo da engenharia; agradeço a pessoas como o Roque Antônio Tadiello Bassin, Airton Solimar Walter, Alberto Schmitt, Alberto Hoher Junior, Luciano Ferrari Pedroso e Fábio Spessoto Persoli pelo suporte em minha escalada profissional, pessoas com quem tive a oportunidade de trabalhar e que, além de serem meus gestores e/ou pares profissionais foram, e alguns ainda são, meus conselheiros, críticos, amigos e enfim, colegas de trabalho que me ensinaram e continuam ensinando segredos valiosos da vida profissional e que de várias formas me ajudaram a chegar a este momento. Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, especialmente à equipe do PPGE3M, que abriu as portas para mim e me acolheu fraternamente nesta jornada acadêmica, agradecendo especialmente ao meu primeiro orientador, Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker (*In Memoriam*), pelo acolhimento à Pós-Graduação, sendo encaminhado posteriormente a meu atual orientador Prof. Dr. Afonso Reguly, grandes amigos e mentores por parte da UFRGS. Todos, sem exceção, inclusive aqueles que não mencionei aqui, mas que sabem de sua relevância, vêm me mostrando que a vida é feita de desafios, dificuldades, derrotas e vitórias, que a forma de encarar e lidar com cada situação é especial e única, mas que acima de tudo, vale a pena. Desistir não é uma opção.

“Quando aceitamos nossos limites,
conseguimos ir além deles”.

Albert Einstein

RESUMO

O processo de soldagem por fluxo de gás ativo - MAG (do inglês *Metal Active Gas*) vem evoluindo ao longo de décadas, empregado extensivamente em soldas intermitentes e largamente aplicado em chapas finas de aço, obtendo estruturas complexas, esbeltas e, muitas vezes, de grande responsabilidade. Ao longo desse período avanços significativos vêm ocorrendo em máquinas e materiais, porém detalhes simples como os chanfros da junta, regiões cruciais que, em conjunto com outros fatores, determinam a qualidade da solda aplicada, têm recebido pouca atenção sobre seus efeitos na resistência à fadiga, bem como estudos para melhoria de suas características geométricas a fim de contribuir para o aprimoramento das propriedades mecânicas do componente. Este trabalho apresenta um estudo comparativo do comportamento sob fadiga de juntas soldadas fabricadas a partir de chapas planas de aço ASTM A1011 Gr50 CLASSE 2, com 3 mm de espessura, unidas com solda de topo sem cobre junta, soldadas com arame de solda ER70S-6 de 0,8 mm de diâmetro, gás de proteção composto por Argônio e 20% de CO₂, corrente de 120 Amperes e posição de soldagem 1G. Um grupo de amostras foi fabricado pelo processo atual, com chanfro reto e de face lisa, e outro grupo com a adição de marcações nas faces dos chanfros retos, sendo ambas as peças das juntas obtidas pelo processo de corte laser e ambos os chanfros sem uso de bisel. As marcações são identificações aplicadas na face de soldagem, obtidas durante o corte das peças, com o objetivo de orientar o soldador em relação ao correto posicionamento dos cordões, assegurando sua qualidade dimensional em relação aos seu comprimento e posicionamento ao longo da junta. O estudo buscou avaliar estatisticamente a variação dimensional dos cordões de solda entre as duas técnicas de solda, com e sem as marcações; caracterizar as curvas de fadiga de ambas as juntas, realizar análises de falhas das regiões fraturadas das amostras, análises micro e macrográficas das seções transversais das soldas e análise de elementos finitos em modelos 3D similares aos ensaiados em laboratório. Os resultados mostraram ganhos significativos com a utilização das marcações em todos os aspectos avaliados, tanto geométricos quanto mecânicos. As juntas executadas com as marcações tiveram melhora dimensional no comprimento e espaçamento dos cordões de 1,7% e 14,6%, respectivamente, em comparação com as juntas sem marcação e se aproximando dos valores especificados em projeto, resultando também no aumento da penetração e da área de ligação da junta em 29,8% e 12,5%, respectivamente. Esses ganhos influenciaram positivamente no aumento da vida em fadiga através da redução na inclinação da curva (m), aumentando os limites de fadiga em 65% para o maior nível de carregamento e 100% para o menor nível de carregamento avaliado. A análise por elementos finitos, modelada com elementos triangulares com dimensão máxima de 1 mm, mostrou uma

importante melhora na distribuição das tensões atuantes em torno da solda com o uso das marcações, onde a uniformidade dimensional do cordão implicou na melhoria da distribuição das tensões ao longo da junta. As diferenças nas tensões resultantes da variabilidade dimensional dos cordões de solda sem o uso das marcações apresentaram variações de aumento de 12% para as regiões de afastamento e diminuição de 15% para as regiões de proximidade dos cordões. As marcações na junta se mostraram significativamente úteis na melhora das propriedades mecânicas da junta através do aprimoramento das características geométricas do cordão, aspectos de difícil controle com os recursos disponíveis atualmente para o processo de soldagem.

ABSTRACT

The Metal Gas Arc Welding - MAG welding process come evolving through decades, used extensively in intermittent welds and largely applied in thin steel plates, obtaining complex structures, slender and, frequently, with great responsibility. Along this period significant advances has occurred in equipment and materials, but simple details as groove faces, crucial regions of the welded joint that, among other factors, define the quality of the weld applied, has received few attention about its effects on the joint resistance, as well studies to improve their geometric characteristics to contribute on the mechanical properties of the component. This research presents a comparative study of the fatigue behavior of welded joints made by thin plain plates of ASTM A1011 Gr50 Class 2, with 3 mm of thickness and joined with butt weld without backing, welded with 0,8 mm weld wire ER70S-6, protection gas composed by Argon and 20% of CO₂, weld current of 120 Ampere and weld position 1G. One sample group was manufactured by the current welding process, with square and smooth groove joint, and other sample group with the application of weld markings on the joint grooves, with both joint parts obtained by laser cutting process and square chamfer without bevel. The weld markings are positioners applied on the weld groove, obtained during the cutting process of the parts, with the aim to orient the welder about the correct positioning of the weld beads, ensuring the dimensional quality regarding their length and positioning along the joint. This study aimed to evaluate statistically the dimensional variation of the weld beads among the two weld techniques, with and without markings, characterize the fatigue curves of both joints, proceed fracture analysis of the fractured samples, micro and macrographic analysis of the joint cross-sections and finite elements analysis in 3D models similar to those assessed in laboratory. The results shown significant gains with the application of the joint markings in all aspects assessed, as geometric as mechanic. The joints made with the markings had dimensional improvement on weld bead length and spacing by 1,7 % and 14,6 %, respectively, in comparison with joints without the markings and approximating of project specifications, resulting also in the increasing of joint penetration and joint connection area by 29,8% and 12,5%, respectively. These gains influenced positively in the fatigue life increasing through reduction of *m* curve inclination, increasing the fatigue limits in 65% for the higher loading level and 100% for the lower loading level assessed. The finite elements analysis, modeled with triangular elements with maximum size of 1 mm, shown an important improvement in the stress distribution acting around the weld bead applied with the markings, where the dimensional uniformity of the weld bead implied on the significant improvement of stresses homogeneity. The difference on the resulting stresses from the dimensional variation of the weld beads without the markings

application presented increasing variations of 12% on places where there are increasing of the joint separation and decreasing variation of 15% on places where there are increasing of the joint proximity. The joint markings presented as significantly beneficial on the mechanical properties improvements of the joint through improvement of geometrical characteristics of the weld beads, aspects with difficult management with the current controlling resources for the welding process.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplos de ciclos de fadiga com carregamentos constantes. a) tensões completamente reversíveis, com tensão média = 0; b) ciclos com tensão média diferente de zero; c) ciclos sem inversão de tensões, com tensão mínima = 0.....	27
Figura 2 – Fases de iniciação e propagação do processo de fadiga em metais.	29
Figura 3 – Taxas de propagação da trinca em um aço com comportamento dúctil. As três regiões que descrevem o comportamento da trinca são: (a): iniciação e crescimento da microtrinca; (b): propagação estável da trinca; (c): crescimento rápido e fratura.	30
Figura 4 – Características superficiais dos três estágios da fadiga em duas amostras cilíndricas, sem entalhes, submetidas a carregamentos de tração e flexão em regime de carregamento de a) baixo ciclo e b) alto ciclo.....	31
Figura 5 - Microestruturas formadas ao longo da seção transversal de uma junta soldada.	33
Figura 6 - Efeito da solda na resistência à fadiga.	36
Figura 7 - Efeito da classificação da junta em relação ao limite de fadiga.	37
Figura 8 - Classificação de juntas soldadas de acordo com a severidade das tensões atuantes.	38
Figura 9 - Defeitos típicos observados em juntas soldadas.	42
Figura 10 - Estrutura metálica utilizada em uma máquina agrícola.	43
Figura 11 - Efeito do perfil da junta na resistência a fadiga de soldas em juntas de topo transversais em aço carbono.	45
Figura 12 - Cordão de solda com propagação de trinca.	45
Figura 13 - Penetração da junta versus nível de tensões resultantes em diferentes pontos.	47
Figura 14 - Efeito da abertura de raiz da junta e do raio do pé do cordão na concentração de tensões na junta.....	48
Figura 15 - Efeito da abertura de raiz da junta e do raio do pé do cordão na vida em fadiga da junta.	48
Figura 16 - Estudo comparativo da resistência de juntas com variação na abertura de raiz e tamanho da solda.	50
Figura 17 - Percentual de custos envolvidos no processo de soldagem.	51
Figura 18 – Fluxograma estrutural de pesquisa e análise.....	53

Figura 19 - Detalhe das faces de solda das amostras avaliadas a) com marcação e b) sem marcação.....	55
Figura 20 – Exemplos de peças individuais de amostras para análise estatística da variação dimensional dos cordões. a) especificações da peça básica; b) especificações de uma peça com as marcações na face de solda; c) peça cortada com as marcações.....	56
Figura 21 - Extensão verificada no cordão de solda.....	57
Figura 22 – Detalhes dimensionais da marcação na junta.....	59
Figura 23 – Detalhes dimensionais da marcação para juntas de aresta e sobreposta.....	59
Figura 24 – a) Desenho do corpo de prova sem marcação na junta para os ensaios de fadiga e b) corpo de prova soldado.....	62
Figura 25 – a) Desenho do corpo de prova com marcação na junta para os ensaios de fadiga e b) corpo de prova soldado.....	63
Figura 26 – Corpo de prova padronizado para a definição das propriedades mecânicas dos metais.....	64
Figura 27 - Dimensões e posicionamento dos elementos utilizados nos ensaios de fadiga.....	66
Figura 28 – Posicionamento e descrição das informações avaliadas na análise fractográfica das amostras ensaiadas por fadiga.....	67
Figura 29 - Posicionamento das seções transversais nos cordões de solda para caracterização da diluição da junta.....	68
Figura 30 - Posicionamento do perfil de microdureza na seção transversal das amostras: a) sem marcação; b) com marcação.....	69
Figura 31 - Detalhe da região de interseção do cordão de solda com o metal de base da junta soldada.....	71
Figura 32 – Exemplo de amostra para as análise dimensional da junta com as marcações. 31a: especificações para processo de soldagem. 31b: amostra após soldagem.....	73
Figura 33 - Efeitos da combinação $L_{pm} \times L_p$ sobre as variações dimensionais da junta com marcação.....	75
Figura 34 - Efeitos da combinação $L_{pm} \times L_e$ para amostras com marcação.....	76
Figura 35 - Efeitos da combinação $L_{pm} \times L_p \times L_e$ para amostras com marcação.....	77
Figura 36 - Efeitos da combinação $L_{psm} \times L_p$ sobre as variações dimensionais da junta sem marcação.....	78

Figura 37 - Efeitos da combinação $L_{psm} \times L_e$ para amostras sem marcação.....	79
Figura 38 – Efeitos da combinação $L_{psm} \times L_p$ e L_e para amostras sem marcação.	79
Figura 39 - Comparação entre as diferenças das médias para L_{pm} e L_{psm}	82
Figura 40 - Curvas de fadiga para as amostras com e sem a marcação.....	86
Figura 41 - Intervalos de ciclos verificados em cada nível de carregamento nos ensaios de fadiga.	87
Figura 42 - Fractografias das amostras avaliadas nos ensaios de fadiga. a) amostra com marcação nas juntas; b) amostra sem marcação nas juntas.	89
Figura 43 – Representação esquemática das regiões avaliadas na fractografia das amostras avaliadas nos ensaios de fadiga para juntas com e sem marcação.	90
Figura 44 – Amostras embutidas de uma junta a) sem marcação e b) com marcação.	91
Figura 45 – Caracterização microestrutural de uma junta soldada sem marcação.	92
Figura 46 – Caracterização microestrutural de uma junta soldada com marcação.	92
Figura 47 – Detalhes da junta soldada avaliados para caracterização geométrica.	93
Figura 48 - Seções transversais das juntas avaliadas nas verificações geométricas dos cordões de solda.	96
Figura 49 - Interface entre as faces de solda de uma junta contendo marcação.....	99
Figura 50 - Interface entre as partes da junta com marcação durante carregamentos de flexão.	99
Figura 51 - Interface entre as partes da junta sem marcação durante carregamentos de flexão.	100
Figura 52 - Perfil de microdureza para a junta com marcação.....	102
Figura 53 - Perfil de microdureza para a junta sem marcação.	102
Figura 54 - Tensões atuantes sobre a amostra contendo os cordões de solda distribuídos de forma equidistante.	104
Figura 55 - Limite da zona de verificação das tensões atuantes no cordão de solda.....	105
Figura 56 - Tensões atuantes sobre a amostra contendo os cordões de solda distribuídos de forma desigual.	106

Figura 57 - Variação nas tensões atuantes no cordão de solda central para: a) juntas equidistantes; b) juntas desiguais. 107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Projeto de experimentos fatorial completo com dois fatores, três níveis e três réplicas. 54	54
Tabela 2 - Níveis codificados e naturais para os fatores de projeto.	55
Tabela 3 - Parâmetros de soldagem para fabricação dos corpos de prova para a análise estatística e ensaios de fadiga.	56
Tabela 4 – Propriedades mecânicas e composição química do arame de solda.	57
Tabela 5 - Composição química do metal de base. Valores percentuais máximos.	61
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do metal de base.	61
Tabela 7 - Plano de testes para os ensaios de fadiga.	66
Tabela 8 - Medições dos espaçamentos dos cordões de solda das amostras ensaiadas por fadiga. 70	70
Tabela 9 – Respostas para o comprimento e espaçamento do cordão de solda.	74
Tabela 10 - ANOVA para L_{pm} em função de L_p e L_e (com marcação).	75
Tabela 11 - ANOVA para L_{psm} em função de L_p e L_e (sem marcação).	77
Tabela 12 - Dados para a análise da inferência estatística.	81
Tabela 13 – Valores para os tempos de projeto com o uso das marcações.	83
Tabela 14 – Valores para os tempos de corte laser com o uso das marcações.	83
Tabela 15 – Valores para os tempos de soldagem atuais.	84
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de fadiga.	85
Tabela 17 - Variação da resistência à fadiga em relação ao nível de carregamento avaliado para cada grupo de amostras.	86
Tabela 18 – Caracterização geométrica das juntas soldadas para α) corpos de prova com marcação e β) corpos de prova sem marcação.	94
Tabela 19 - Análise geométrica dos cordões de solda.	94

LISTA DE SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
c	Região central da junta soldada
CCS	Comprimento do cordão de solda
EF	Elementos finitos
f	Região final da junta soldada
F_p	Carga de prova
F_j	Face da junta
GMAW	<i>Gas metal arc welding</i>
i	Região inicial da junta soldada
I_j	Interface da junta
L_m	Distância de M_o à zona de tração da solda com marcação
L_p	Comprimento nominal do cordão de solda
L_e	Espaçamento nominal do cordão de solda
L_{pm}	Comprimento resultante do cordão de solda aplicado com marcação
L_{psm}	Comprimento resultante do cordão de solda aplicado sem marcação
L_{sm}	Distância de M_o à zona de tração da solda sem marcação
m	Inclinação da curva de fadiga
M_{om}	Ponto de momento com marcação
M_{osm}	Ponto de momento sem marcação
P_{cm}	Ponto de compressão com marcação
P_{csm}	Ponto de compressão sem marcação
R_j	Raiz da junta
R_{jm}	Abertura de raiz da junta com marcação
R_{jsm}	Abertura de raiz da junta sem marcação
TG	Tamanho de grão
UTS	Máxima tensão de resistência do material
ZTA	Zona termicamente afetada
Z_{csm}	Zona de compressão sem marcação
Z_{cm}	Zona de compressão com marcação
Z_{tm}	Zona de tração com marcação
Z_{tsm}	Zona de tração sem marcação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	OBJETIVOS.....	25
2.1	OBJETIVO GERAL.....	25
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
3.1	ASPECTOS GERAIS SOBRE O PROCESSO DE FALHAS POR FADIGA.....	26
3.2	PROCESSO DE SOLDAGEM SEMIAUTOMÁTICO.....	32
3.2.1	Uniformidade dos Cordões de Solda.....	34
3.3	FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS.....	36
3.4	FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS INTERMITENTES.....	40
3.5	EFEITOS DO CORDÃO DE SOLDA NA VIDA EM FADIGA.....	42
3.5.1	Descontinuidades.....	42
3.5.2	Presença do Cordão de Solda.....	43
3.5.3	Penetração da Junta.....	46
3.5.4	Abertura de Raiz da Junta.....	47
3.6	CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM MAG.....	50
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	53
4.1	VARIAÇÃO DIMENSIONAL DOS CORDÕES DE SOLDA.....	54
4.2	DEFINIÇÕES GEOMÉTRICAS DAS MARCAÇÕES NAS JUNTAS.....	57
4.3	ANÁLISE ECONÔMICA PARA A APLICAÇÃO DAS MARCAÇÕES NAS JUNTAS 59	
4.4	FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE FADIGA	61
4.5	ENSAIOS PARA DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS BÁSICAS DAS JUNTAS.....	63
4.6	ENSAIOS DE FADIGA.....	65

4.7	ANÁLISE FRACTOGRÁFICA.....	66
4.8	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	67
4.9	CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORDÕES DE SOLDA	68
4.10	MICRODUREZA	69
4.11	ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
5.1	VARIAÇÃO DIMENSIONAL DOS CORDÕES DE SOLDA.....	73
5.1.1	Análise Estatística	73
5.1.2	Nova Técnica de Soldagem: Junta Com Chanfro Reto, Faces Lisas e Uso das Marcações 74	
5.1.3	Técnica de Soldagem Atual: Junta Com Chanfro Reto, Faces Lisas e Sem Marcação77	
5.2	AVALIAÇÃO DE CUSTOS COM O USO DAS MARCAÇÕES NAS JUNTAS. 82	
5.2.1	Impacto do Uso das Marcações no Tempo de Projeto	82
5.2.2	Impacto do Uso das Marcações no Tempo de Corte Laser	83
5.2.3	Impacto do Uso das Marcações no Tempo do Processo de Soldagem.....	83
5.3	ENSAIOS DE FLEXÃO PARA DEFINIÇÃO DA UTS.....	84
5.4	ENSAIOS DE FADIGA	85
5.5	FRACTOGRAFIA	88
5.6	CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DAS JUNTAS SOLDADAS	91
5.7	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA JUNTA SOLDADA.....	93
5.8	MICRODUREZA	101
5.8.1	Aplicabilidade das Marcações nas Juntas.....	103
5.9	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS.....	103
5.9.1	Cordões de Solda Equidistantes	104
5.9.2	Cordões de Solda Desiguais	106
6	CONCLUSÃO.....	110

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 114

1 INTRODUÇÃO

O processo de falhas em componentes mecânicos por fadiga vem acompanhando a sociedade por décadas, principalmente após o início do processo industrial em larga escala, com Wöler iniciando os estudos em falhas ocorridas em eixos ferroviários (MUGHRABI, 2015) e a consolidação desta teoria através da análise das falhas nos aviões Comet (WANHILL et al, 2016), onde a perda de vidas evidenciou a criticidade do assunto.

Desde então inúmeros estudos foram realizados com o objetivo de caracterizar os mecanismos que causam as falhas por fadiga, resultantes na maioria das vezes de carregamentos bem abaixo dos limites de resistência mecânica do material. Esta característica é ainda mais evidente em juntas soldadas, onde a presença da zona fundida e suas características macro e microestruturais causam danos importantes nas propriedades mecânicas da junta, acelerando significativamente o processo de falha.

O estudo dos efeitos que a união soldada e suas características físicas, microestruturais e mecânicas têm sobre a vida em fadiga de componentes mecânicos tem despertado interesse de inúmeros pesquisadores e instituições ao longo dos anos, visto o impacto que seus efeitos têm na vida cotidiana e o impacto negativo que certas falhas trazem para a sociedade, embora ainda seja um fenômeno não completamente compreendido (FRICKE, 2003).

A utilização de uniões soldadas na fabricação mecânica vem acompanhando o setor metal-mecânico e seus produtos desde os primórdios de seu desenvolvimento em escala industrial, a partir de meados da década de 1950 (MACHADO, 1997). Atualmente o processo básico de soldagem, constituído da fusão de metais, está subdividido em inúmeros outros métodos de soldagem, caracterizados por uma extraordinária evolução em equipamentos e materiais, bases tecnológicas deste processo de união por fusão.

Muitos estudos são desenvolvidos com o objetivo de aprimorar os processos de soldagem visando melhorias na qualidade metalúrgica do metal fundido, sendo esta a principal característica a ser observada e controlada durante a fabricação de uma junta, principalmente quando se tratam de componentes submetidos aos efeitos da fadiga. Em função disso ocorrem incessantes desenvolvimentos e progressos em máquinas, materiais e métodos de soldagem.

Podem ser citados, no âmbito de equipamentos, desenvolvimentos de sofisticadas fontes de potência, as quais controlam precisamente os parâmetros de soldagem e os ajustam

de acordo com as variações ambientais, sejam elas devido aos componentes presentes na junta ou devido às variações impostas inerentemente ao manuseio da tocha de solda.

Em relação aos materiais empregados na fabricação de uniões soldadas destacam-se os aços de alta resistência e baixa liga (*HSLAS – High Strength Low Alloy Steel*), os quais combinam características especiais de composição química e fabricação que os conferem características únicas, como elevada resistência mecânica e boa soldabilidade. O efeito prático do emprego desses materiais vem despertando o interesse de empresas no seu desenvolvimento e em métodos de processamento cada vez mais sofisticados, como por exemplo os materiais de ultra-alta resistência mecânica (*UHSS – Ultra High Strength Steel*), da mesma forma soldáveis, porém com limites de escoamento que ultrapassam a ordem de 1500 MPa.

Em meio a este cenário de tecnologias em expansão e aprimoramentos de processos de fabricação alguns aspectos importantes acabam ficando com uma parcela muito pequena de esforços em pesquisas, dedicadas a entender e melhorar suas características (BRANCO, 1999). Um deles é observado na aplicação de cordões intermitentes em juntas soldadas, onde a preparação da face de solda, desconsiderando os chanfros para melhorar a penetração, continua basicamente a mesma por décadas, possuindo faces lisas para a aplicação de cordões, com comprimento e espaçamento especificados em projeto, e com suas características dimensionais finais totalmente dependentes do operador da solda.

Este tipo especial de cordão (intermitente¹) é largamente aplicado tanto em componentes simples como em estruturas que demandam elevado controle de qualidade em função da responsabilidade que possuem, considerando o fato de que há um número relativamente pequeno de estudos relacionados aos efeitos causados pela presença de soldas intermitentes no comportamento mecânico de componentes (BRANCO, 1999), especialmente na vida em fadiga.

Neste trabalho foi avaliado o efeito que o uso das marcações nas juntas tem sobre a vida em fadiga do componente, sendo elas simples recortes aplicados nas faces da junta. O objetivo final deste recurso é a melhora da qualidade dimensional dos cordões aplicados de forma intermitente pelo processo semiautomático, contribuindo de forma direta para o

¹Cordões de solda intermitentes são largamente empregados em estruturas fabricadas com chapas finas de aço, onde soldas contínuas ocasionam consideráveis distorções e incrementos desnecessários no custo do produto final.

aumento da vida em fadiga da junta através do aprimoramento de aspectos geométricos da região fundida.

A falta de estudos relacionados ao efeito do uso de marcações em juntas soldadas, resultando na falta de embasamento para a elaboração de normas e códigos e resultando, conseqüentemente, na especificação de elementos superdimensionados para mitigar as incertezas ocasionadas sobre a resistência mecânica da junta em função de sua variabilidade dimensional, serviram de motivação para a investigação desenvolvida neste trabalho.

O estudo consistiu em comparar amostras fabricadas a partir de chapas planas de aço ASTM A1011 GRAU 50 CLASSE 2, com espessura de 3 mm, unidas pelo processo de soldagem MAG com cordões de solda intermitentes, diferenciando-as pela presença de marcações aplicadas na face de soldagem e obtidas durante o corte das peças pelo processo laser, visando aprimorar a precisão dimensional na aplicação dos cordões.

As amostras foram submetidas a análises estatísticas para justificar a variabilidade dimensional no comprimento dos cordões fabricados pelos métodos atuais, sem as marcações, breve análise econômica sobre a aplicação das marcações, ensaios de fadiga, macrografias das falhas, análises microestruturais, caracterização geométrica entre os cordões e análise de elementos finitos – EF.

Uma breve análise econômica foi conduzida para caracterizar o cenário atual do processo de desenvolvimento e fabricação de juntas soldadas com cordões intermitentes, evidenciando os impactos que a aplicação das marcações tem nas etapas de projeto, corte e união das peças por soldagem. Durante o desenvolvimento e corte das peças há um pequeno acréscimo de custo em função da adição das marcações, porém na etapa de soldagem, englobando todas as etapas do processo, é que são vistos os maiores ganhos, atingindo valores da ordem de 50% na redução dos custos de fabricação.

Uma das justificativas para a utilização das marcações nas juntas soldadas é a melhora na qualidade dimensional dos cordões de solda, onde uma análise estatística foi conduzida para caracterizar o efeito que o uso das marcações tem sobre o comprimento e espaçamento das juntas ao longo da peça. A comparação foi feita entre as juntas fabricadas pelo método atual, sem marcação, e juntas fabricadas com marcação.

Os resultados mostraram um cenário onde as condições atuais de fabricação de juntas com cordões intermitentes, aplicados pelo método semiautomático, resultam em elementos com variação dimensional significativa, mostrando uma grande tendência de não

atendimento à requisitos de projeto em relação ao comprimento mínimo dos elementos. Esta situação foi resolvida de forma incisiva com o uso das marcações, onde a maioria absoluta das amostras ficou com dimensões dentro dos limites estabelecidos em projeto, com a variabilidade dimensional da junta diretamente relacionada à presença da marcação.

A marcação da junta é um recorte posicionado na face de solda das peças, obtida durante a fabricação por processo de corte laser, tendo a função de orientar o soldador sobre o posicionamento correto dos cordões durante a soldagem. Esta característica pode ser aplicada em juntas de topo, ângulo, canto, aresta e sobreposta, sendo que as condições básicas para aplicação das marcações são: peças fabricadas em chapas planas de aço; corte das peças por laser, jato d'água ou qualquer outro processo que permita a obtenção das marcações sem alterações significativas no processo de corte; aplicação de cordões de solda intermitentes; soldagem semiautomática.

Os ensaios mecânicos para caracterização das curvas de fadiga das juntas mostraram que o aumento nos limites de fadiga para as soldas com marcação chega a valores de 100%, comparando com os limites de fadiga das juntas fabricadas pelos métodos atuais de soldagem, sem as marcações. Os ganhos foram expressivos para os três níveis de carregamento avaliados, mostrando uma situação que supera os ganhos obtidos com a classificação de juntas em classes superiores de resistência à fadiga (BS 7608, 2014), tornando-se similar às melhorias obtidas através de processos para redução de tensões residuais ou alívio de concentração de tensões na junta (KIRKHOPE et al, 1999).

Durante as avaliações mecânicas não foram identificados fatores que tivessem contribuição de destaque sobre o efeito das curvas de fadiga, mas sim o somatório de vários aspectos melhorados com o uso das marcações nas juntas como a penetração, tamanho e uniformidade da abertura de raiz da junta, posicionamento e comprimento uniformes dos cordões de solda e concentração de tensões ao longo da borda da junta. Esses aspectos, quando presentes de forma homogênea e seus ganhos somados, atuam de forma altamente positiva na melhora das propriedades mecânicas da junta soldada, afetando diretamente a resistência à fadiga do componente.

As análises fractográficas e microestruturais, envolvendo também a microdureza, não mostraram diferenças importantes e que pudessem justificar os ganhos na resistência à fadiga das juntas com as marcações, apresentando falhas e microestruturas com características similares às juntas fabricadas pelo método atual.

Por fim uma análise de EF foi realizada para verificar os níveis de concentração de tensões em torno das juntas, analisando uma amostra com espaçamento desigual entre os cordões, representando os componentes sem marcação, e outra amostra com espaçamento equidistante entre os cordões, representando os componentes com marcação. Os resultados mostraram que a diferença no espaçamento entre as juntas causa um distúrbio na distribuição das tensões em torno dos cordões de solda, aumentando o risco de falhas por fadiga.

Foi observado que não bastam os controles aplicados às características mais usuais da junta, como microestrutural e tensões residuais, é necessário a ampliação do campo de observação para identificar variáveis que afetam de forma substancial o comportamento mecânico final do componente, que neste caso é a resistência a fadiga.

O efeito que as marcações apresentaram sobre a qualidade da dos cordões de solda teve influência extremamente relevante sobre a resposta obtida com as avaliações da vida em fadiga das juntas. Foram obtidas melhorias na resistência mecânica através da adoção de meios para orientar a aplicação dos cordões intermitentes, aprimorando sua qualidade dimensional e a homogeneidade das características geométricas das juntas soldadas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o comportamento dos limites de fadiga de chapas soldadas com cordões intermitentes fabricados em chapas planas de aço ASTM A1011 Gr 50 CLASSE 2, de 3 mm de espessura, com a solda topo aplicada pelo processo MAG, chanfro reto sem bisel e sem cobre-junta. Será realizada uma comparação quantitativa sobre o efeito que a presença das marcações nas faces de solda, obtidas durante o processo de corte das peças, têm sobre a resistência à fadiga e analisar os resultados com o comportamento de chapas soldadas pelo método atual, sem o uso das marcações, com os cordões aplicados também em faces lisas sem bisel.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar estatisticamente, através da metodologia ANOVA e Inferência Estatística, a variabilidade dimensional dos cordões de solda aplicados com a utilização das marcações, comparando os resultados com medições realizadas em soldas aplicadas pelas técnicas atuais do processo, sem as marcações, caracterizando as melhorias dimensionais obtidas no comprimento e espaçamento dos cordões em relação às especificações de projeto;

- Avaliar as características físicas e geométricas da ZTA de ambas as amostras, com e sem as marcações, identificando as microestruturas geradas pelo processo de soldagem e as variações em detalhes como diluição, penetração, abertura de raiz da junta e microdureza;

- Avaliar macrograficamente as regiões de falhas das juntas ensaiadas em laboratório, comparando de forma geral as regiões fraturadas durante os ensaios de fadiga, buscando caracterizar o efeito da presença das marcações no processo de falha;

- Avaliar comparativamente, por meio de análises de elementos finitos, o efeito que as variações dimensionais dos cordões de solda têm sobre a concentração de tensões na junta, comparando as tensões atuantes em um componente com cordões intermitentes e equidistantes, representada pela presença das marcações de solda, com um componente com cordões intermitentes e com espaçamento irregular, representada pelo processo atual de soldagem, sem as marcações.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE O PROCESSO DE FALHAS POR FADIGA

Sabe-se que componentes mecânicos são intrinsicamente submetidos a esforços estruturais, sendo que uma parcela significativamente alta combinada com esforços cíclicos (ROSA et al, 2002), afetando consideravelmente a resistência mecânica da peça em função de tensões flutuantes que maximizam os danos causados por defeitos, muitas vezes microscópicos, presentes na geometria das peças.

De forma simplificada, a fadiga é definida como um processo de acúmulo cíclico de danos causados por tensões flutuantes (KHEDMAT et al., 2009), sendo uma de suas principais características o fato de que a carga não é alta o suficiente para que a falha ocorra imediatamente, mas sim após os danos acumulados terem alcançado níveis críticos (WEIDNER, 2017).

O início das investigações sobre a forma como os carregamentos cíclicos atuam sobre componentes mecânicos ocorreu em 1858 por Wöhler, investigando falhas recorrentes em eixos de trens ferroviários (MUGHRABI, 2015), e seu ápice investigativo com as falhas recorrentes nos aviões Comet, onde as catástrofes foram imediatamente associadas a falhas causadas por erros de projeto que desencadeavam a nucleação e propagação de trincas (WANHILL et al, 2016).

O termo “fadiga” foi mencionado pela primeira vez em 1954 por Braithwaite (SCHÜTZ, 1996), descrevendo falhas em vários componentes mecânicos. A partir desse período observa-se o estudo do efeito dos concentradores de tensões sobre a resistência mecânica de componentes submetidos a carregamentos cíclicos, respaldando a grande maioria das teorias atualmente existentes.

O processo de falha por fadiga depende de fatores microestruturais, condições de carregamentos específicos e deformações plásticas localizadas (TU, 2016), acompanhando a história do desenvolvimento industrial por seu efeito em representar cerca de 90% de todas as falhas mecânicas (SIK et al, 2018). Estima-se que os custos anuais para prever ou conter danos causados pelas falhas por fadiga causem um impacto de aproximadamente 3% na economia das nações (DOWLING, 2013).

Atualmente há três formas de abordar o fenômeno da fadiga em projeto e estruturas:

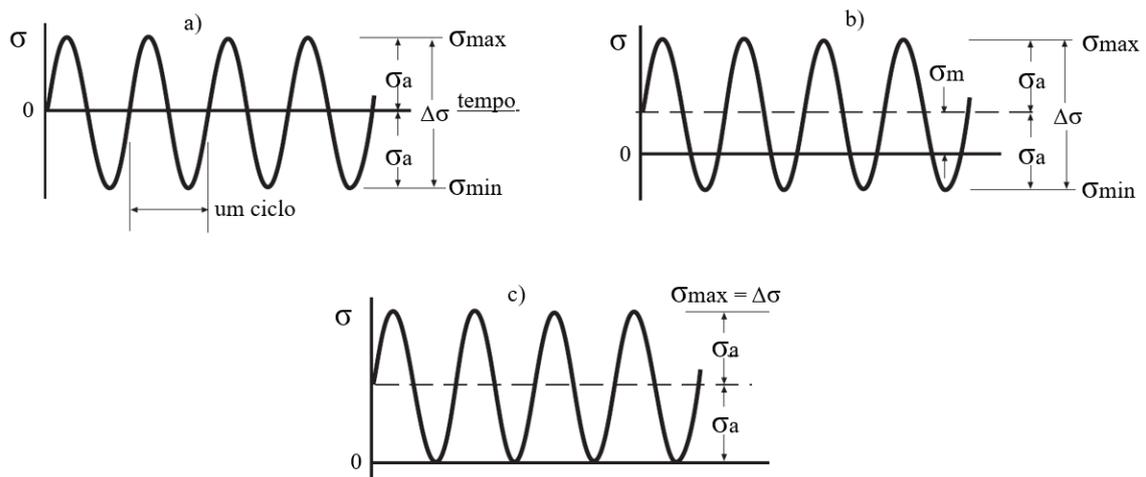
a) Análise baseada em carregamentos: nesta abordagem é considerado o efeito que o carregamento nominal tem sob uma determinada região de interesse do componente (BRUDER, 2012), definindo a vida em fadiga estimada da peça em função de ajustes causados por concentradores de tensões como furos, cantos vivos, rasgos de chaveta, etc. (DOWLING, 2013), sendo restrita a análises no campo elástico do material (CASTILLO, 2009);

b) Análise baseada em tensões: considera o efeito da concentração de tensões no componente através de comparações entre as forças atuantes e o efeito do módulo de elasticidade do material com base em sua geometria (CASTILLO, 2009);

c) Análise baseada na mecânica da fratura: analisa a taxa de propagação da trinca em função das condições de carregamento e de uma característica única de cada material, chamada de Fator de Intensidade de Tensões – ΔK (CASTILLO, 2009).

A análise do processo de fadiga, tanto teórica quanto prática, envolve o entendimento do modo de carregamento atuante, definindo sua amplitude (σ_m) e razão de carregamento (R). A figura 1 mostra três exemplos básicos de diferentes perfis de carregamentos e sua nomenclatura associada.

Figura 1 – Exemplos de ciclos de fadiga com carregamentos constantes. a) tensões completamente reversíveis, com tensão média = 0; b) ciclos com tensão média diferente de zero; c) ciclos sem inversão de tensões, com tensão mínima = 0.



Fonte: Adaptado de DOWLING (2013).

Pode ser observado que em ambos os modos de carregamento mostrados na figura 1 as forças são flutuantes e atuantes ao longo de um período de tempo. Isso causa um determinado dano plástico acumulativo ao material (KWOFIE, 2007), levando

inevitavelmente à nucleação e propagação de trincas, finalizando o processo de fadiga com a falha total do componente. A velocidade de propagação da trinca é alterada se o perfil de carregamento é modificado em qualquer das etapas antes descritas, podendo levar à vida infinita do componente se as tensões atuantes ficarem abaixo de determinado nível, chamado de limite de resistência à fadiga.

Este conceito, embora bem conhecido e amplamente abordado, ainda necessita de pesquisas, sendo que eventualmente é provada a existência de situações controversas (SONSINO, 2007), pois se o carregamento alternado for mantido por um tempo suficientemente longo, a falha por fadiga ocorrerá inevitavelmente.

Em componentes com materiais de estrutura teoricamente homogênea obtidas em elementos únicos e processadas por usinagem, laminação, forjamento, entre outros com elevada precisão e qualidade no acabamento superficial, o número de ciclos resistidos sob fadiga pode ser relativamente alto, ultrapassando a casa de 10^7 ciclos. Para conjuntos soldados, juntas parafusadas ou peças sujeitas a carregamentos combinados com corrosão, o limite de fadiga é relativamente baixo, com tensões e períodos de tempo inferiores ao caso anterior (SONSINO, 2007).

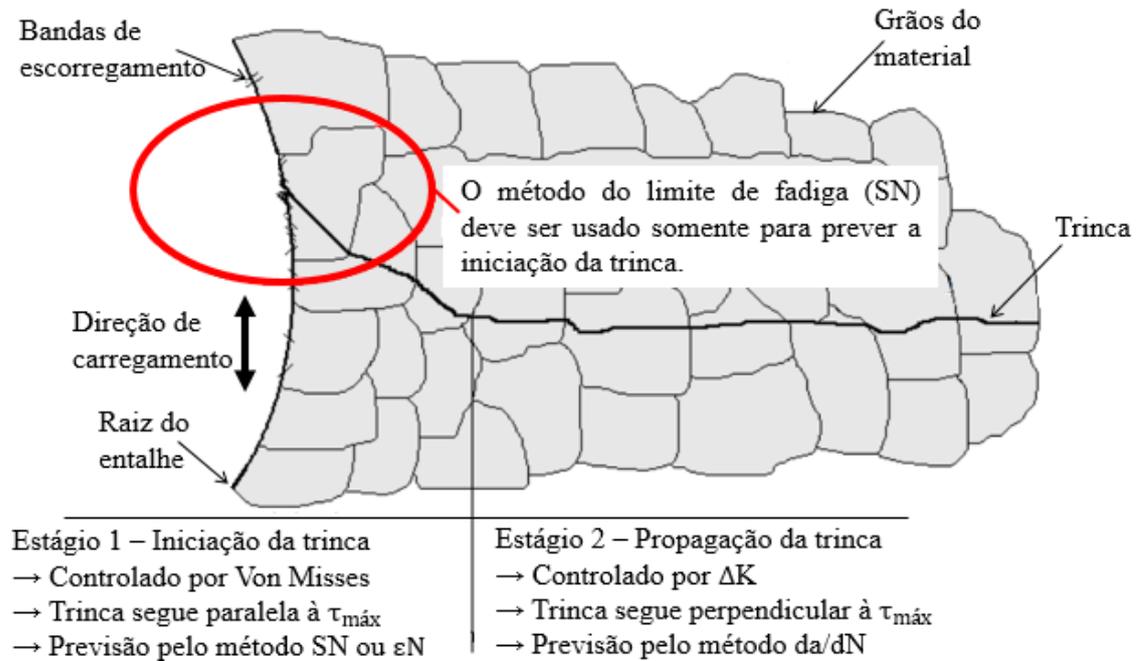
As falhas por fadiga estão associadas a duas situações específicas, chamadas de fadiga de baixo e alto ciclos e dependem basicamente do nível de carregamento a que o componente é submetido (FARAHMAND, 1997). O número de ciclos que divide as duas situações fica entre 10^2 e 10^4 ciclos, sendo que na primeira as deformações plásticas do material são levadas em conta, o mesmo não ocorrendo com a segunda (DOWLING, 2013).

Sobre o trajeto que a trinca percorre ao longo da junta sabe-se que é um período dividido basicamente em três etapas: iniciação da trinca, propagação e fratura. Para o período de propagação da trinca a lei de Paris (DOWLING, 2013) descreve precisamente seu comportamento em relação aos carregamentos aplicados, porém ainda não há métodos eficazes para prever o período de iniciação (UPADHYAYA, 2012; FARAHMAND, 1997), enquanto ela atinge comprimentos de até 0,25 mm (ZHANG, 2013), conforme ilustrado pela figura 2.

Em metais com comportamento dúctil a iniciação das trincas tem início com o desenvolvimento das bandas de escorregamento, onde ocorre deformação do material através de seus planos cristalinos, sendo que o acúmulo dessas deformações causa o surgimento de inúmeras microtrincas que se acumulam e podem evoluir para a etapa de propagação da trinca. Em metais de resistência mais elevada e, conseqüentemente, menor

ductilidade, as microtrincas surgem predominantemente em defeitos no material como vazios, inclusões, contornos de grãos, defeitos superficiais e, inclusive, bandas de escorregamento (DOWLING, 2013; FARAHMAND, 1997; SAE, 1997).

Figura 2 – Fases de iniciação e propagação do processo de fadiga em metais.



Fonte: Adaptado de CASTRO (2000).

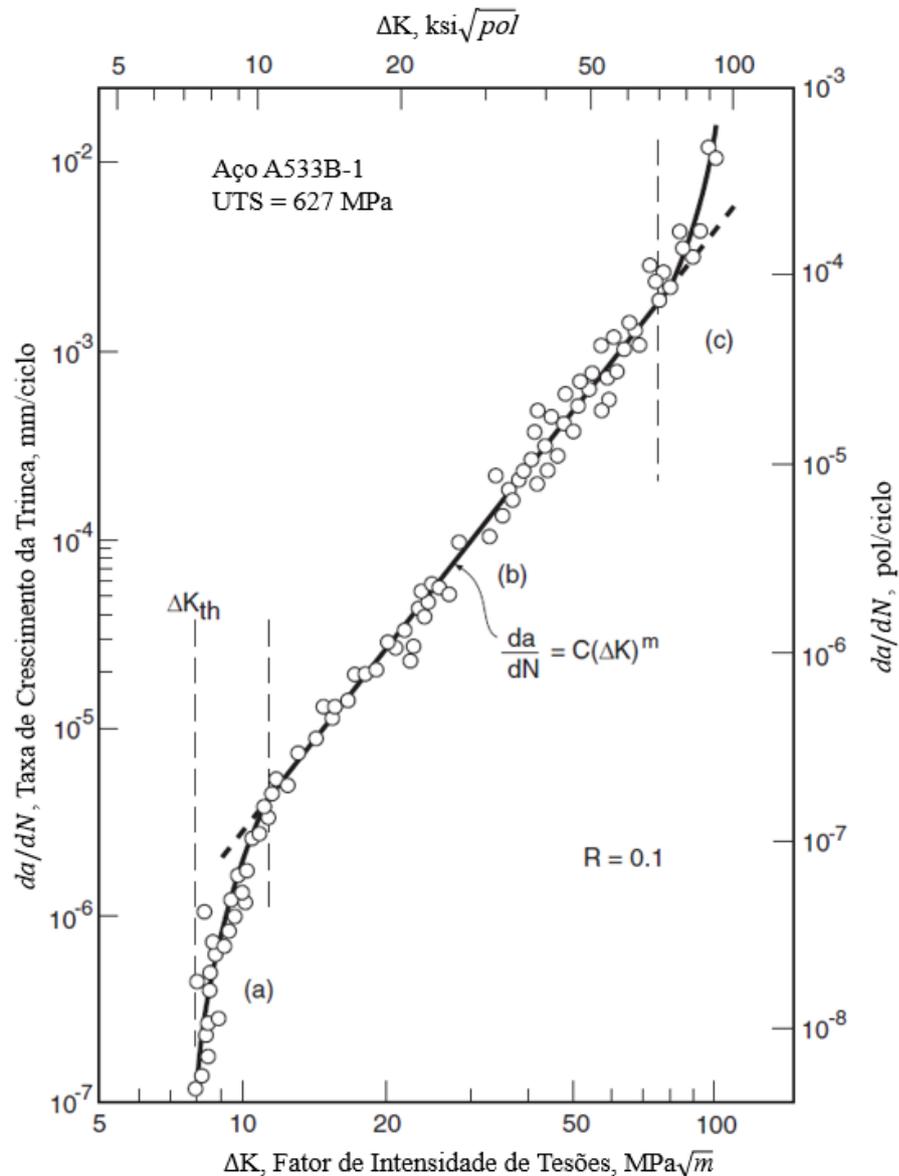
A figura 3 (DOWLING, 2013) descreve o comportamento da propagação de uma trinca por fadiga, partindo de sua iniciação até a fratura da peça, para um aço dúctil utilizado em um vaso de pressão, sendo que a curva é descrita pela Lei de Paris (PARIS et al, 1971).

Sabe-se que a vida em fadiga pode ser controlada pelo comportamento das microtrincas (MURTAZA, 1995; IBRAHIM, 1980), especialmente para fadiga de alto ciclo (WEIDNER, 2017), porém o período de iniciação da trinca ainda é objeto de discussão em relação ao seu efeito quando presente em juntas soldadas. Não há um consenso sobre sua consideração ou não, conforme exposto por ZHANG (2009), LASSEN (2009) e UPADHYAYA (2012), principalmente em função da aplicação do componente (STEPHENS et al, 2001). Outro estudo descreve o desenvolvimento de um método preciso para previsão da vida em fadiga (OKAWA et al, 2013), onde é considerada a iniciação de trincas no metal de solda.

Diversos outros estudos sugerem a adoção de metodologias para determinar o período de tempo consumido para que ela atinja esta extensão (ZHANG, 2013; UPADHYAYA, 2012; IBRAHIM, 1980), o qual pode consumir cerca de 50% da vida em fadiga para juntas

com resistência de 10^5 a 10^6 ciclos (ZHANG, 2009). A iniciação da trinca ocorre quando é atingido o valor crítico do dano para a peça (UPADHYAYA, 2012), sendo que os métodos atuais para prever o período gasto pela iniciação de trincas de fadiga, tendendo a aumentar à medida que aumenta o número de ciclos para a resistência à fadiga, são principalmente empíricos (UPADHYAYA, 2012).

Figura 3 – Taxas de propagação da trinca em um aço com comportamento dúctil. As três regiões que descrevem o comportamento da trinca são: (a): iniciação e crescimento da microtrinca; (b): propagação estável da trinca; (c): crescimento rápido e fratura.



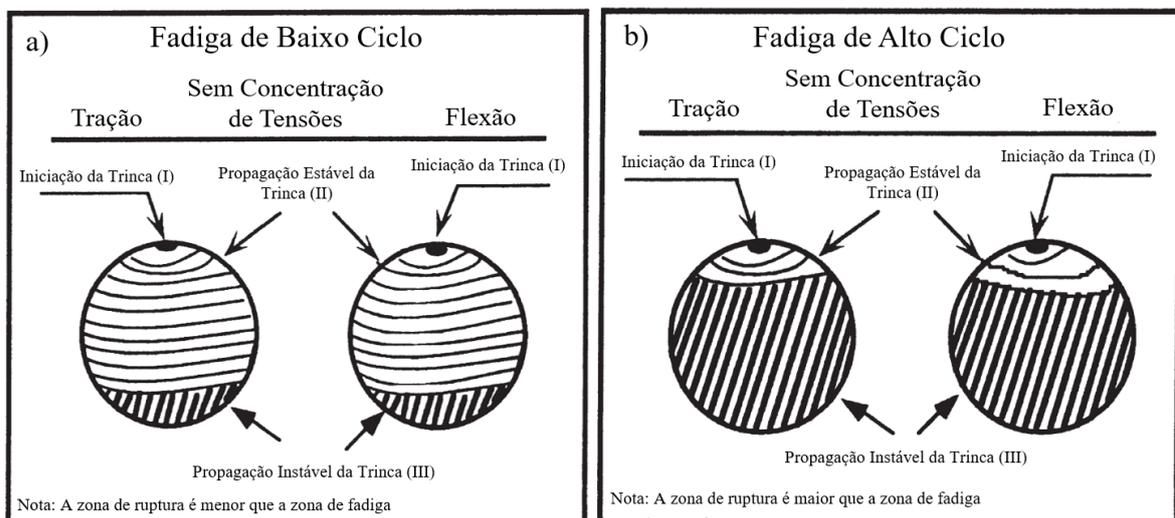
Fonte: Adaptado de DOWLING (2013).

Após a ocorrência da fratura por fadiga a superfície da falha fornece informações a respeito dos carregamentos aplicados, características do material e do ambiente em que a

falha ocorreu (FARAHMAND, 1997). A ruptura por fadiga é descrita por Stephens (et al, 2001) como o local onde a “trinca cresceu até um ponto em que o material remanescente não pode mais tolerar as tensões ou deformações”. Neste instante ocorre a fratura repentina do componente.

A figura 4 mostra duas superfícies de fraturas de baixo e alto ciclo, descrevendo as três regiões de propagação da trinca por fadiga. Pode ser observado que, como descrito por Farahmand (1997), as aparências das fraturas descrevem o modo de carregamento aplicado nos componentes, onde as áreas geradas pelo período de propagação estável da trinca (estágio 2) são menores para fadigas de alto ciclo.

Figura 4 – Características superficiais dos três estágios da fadiga em duas amostras cilíndricas, sem entalhes, submetidas a carregamentos de tração e flexão em regime de carregamento de a) baixo ciclo e b) alto ciclo.



Fonte: Adaptado de FARAHMAND (1997).

Embora o processo de fadiga dos materiais seja um assunto de constantes pesquisas, ainda não é totalmente compreendido, especialmente quando ocorre em juntas soldadas, visto a quantidade de variáveis presentes em elementos que sofreram alterações microestruturais, transformadas de forma não controlada durante sua fusão e solidificação da junta (FRICKE, 2003). Mesmo com inúmeras metodologias de previsão de falhas por fadiga desenvolvidas até o momento, falhas ainda ocorrem (FRICKE, 2017) e a investigação deste fenômeno persiste através do estudo de suas inúmeras variáveis.

Com a evolução de simulações computacionais a predição das tensões atuantes em estruturas tornou-se uma tarefa mais simples, facilitando e acelerando o processo de desenvolvimento de produtos (LENER et al, 2018), além de fornecer informações

relativamente precisas sobre o comportamento mecânico dos componentes. Para tanto, o correto entendimento dos carregamentos atuantes e dos princípios fundamentais de atuação das falhas por fadiga se fazem necessários para resultar em análises robustas, confiáveis e rápidas.

3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM SEMIAUTOMÁTICO

O processo de soldagem possui papel vital para a indústria de transformação de produtos metálicos devido a características como versatilidade, facilidade de operação e relativo baixo custo de operacionalização, permitindo a obtenção de peças e conjuntos com geometrias e dimensões complexas e, eventualmente, impraticáveis por outros processos como a fundição, forjamento ou conformação.

Na soldagem de produtos planos a indústria metal-mecânica utiliza em grande escala o processo MAG, devido a vários aspectos como a qualidade da união soldada, baixo custo de manutenção e operação dos equipamentos, além de ser um processo versátil, possibilitando sua aplicação nas mais variadas situações. Machado explica que:

Esse processo de soldagem se baseia na formação do arco elétrico entre a peça e um eletrodo maciço ou consumível, continuamente alimentado. A poça de fusão assim formada, é protegida por um gás, ou mistura de gases, inerte e oxidante ("ativo"), [...] (MACHADO, 1997, p. 194).

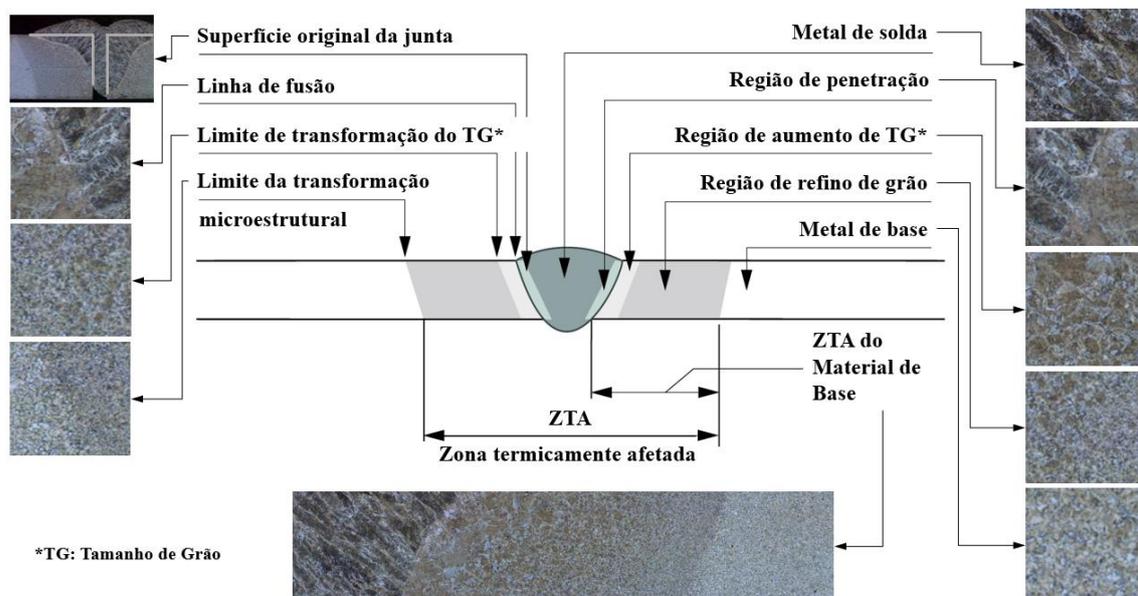
A soldagem teve seu desenvolvimento tecnológico registrado pela primeira vez em 1890, quando Charles L. Coffin patenteou o primeiro processo de soldagem por arco elétrico, utilizando um eletrodo de metal. Em paralelo se desenvolvia a soldagem por eletrodo revestido, tendo seu maior impulso durante a 1ª Guerra Mundial. Posteriormente, em 1926, Henry M. Hobart e Philip K. Devers, ambos nos Estados Unidos, utilizaram os gases Hélio e Argônio para a proteção da poça de fusão e do arco elétrico. Em 1951 foram feitos os primeiros testes utilizando Oxigênio juntamente com os gases inertes, sendo que em 1953 K.V. Kyubavskii e N.M. Novoshilov, na então ex-União das Repúblicas Socialistas Soviéticas, aplicaram o gás oxidante CO₂ como meio de proteção para um eletrodo alimentado continuamente, consolidando o processo MAG para união dos aços (MACHADO, 1997).

Desde então ocorreram muitos avanços no processo de soldagem relacionados à eficiência dos equipamentos e meios protetores, além do desenvolvimento de novos materiais destinados tanto para a fabricação dos componentes das juntas como para os

consumíveis do processo. Em paralelo desenvolveram-se novos métodos de soldagem, como a união por laser, feixe de elétrons e mais recentemente a soldagem por fricção (Friction Stir Welding – FSW), onde há diminuição considerável no consumo de energia para viabilizar a união do metal, ainda no estado sólido, por mistura mecânica e sem a necessidade de meios protetores (MISHRA, 2005). Todos estes avanços são fomentados pela necessidade de melhorar a qualidade mecânica e microestrutural da junta, a produtividade do processo como um todo e, principalmente, melhorar as propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta.

Pelo processo MAG ser executado em altas temperaturas a energia fornecida para a deposição do metal de adição afeta drasticamente a microestrutura dos materiais envolvidos no processo, resultando em uma zona fundida com várias microestruturas adjacentes, tornando-a suscetível a situações que aumentam as chances de falhas.

Figura 5 - Microestruturas formadas ao longo da seção transversal de uma junta soldada.



Fonte: Adaptado de SSAB (2009).

A figura 5 mostra, esquematicamente, a seção transversal de uma junta soldada, mostrando todas as regiões formadas do metal de base (área não afetada pelo calor da solda) até a zona central da junta (metal fundido). A amostra foi fabricada com chapas de aço microligado ASTM A1011 GR50 (ASTM A1011/1011M), com espessura de 4,75 mm e unida conforme os parâmetros de solda descritos na tabela 3.

Pode ser observado que há uma variação microestrutural significativa ao longo da seção transversal da junta, com o metal de base possuindo grãos refinados, obtidos durante o processo de fabricação do material, bem como o metal de solda apresentando grãos

significativamente grosseiros, colunares e orientados segundo a direção de solidificação da zona fundida. Pode ser observada também a região de transição entre o metal de solda e o metal de base, representando o entalhe metalúrgico da junta, sendo a região de maior fragilidade visto a mudança brusca na microestrutura e, conseqüentemente, no gradiente de propriedades mecânicas da junta.

Esta diferenciação microestrutural ao longo da seção transversal da junta, sem considerar os aspectos metalúrgicos impostos pelo processo de soldagem², faz com que sejam minimizadas, ou mesmo perdidas, muitas das propriedades mecânicas benéficas originalmente presentes no material de base, como resistência mecânica (resistência a carregamentos estáticos e flutuantes) e tenacidade.

3.2.1 Uniformidade dos Cordões de Solda

Durante a evolução que vem ocorrendo no processo de soldagem em relação a equipamentos e consumíveis, embora o foco principal esteja sobre a automação e robotização, a soldagem semiautomática continua a ser amplamente usada na indústria, especialmente quando aplicada em juntas intermitentes. Entretanto, uma característica deste método de soldagem permanece inalterada desde o princípio de sua aplicação em escala industrial: a preparação da face de solda para juntas de chanfro reto.

Desconsiderando preparações do chanfro para melhorar a penetração, como biseis, não houveram mudanças em relação a técnicas para orientar o soldador sobre o correto posicionamento dos cordões de solda, tanto em relação à sua localização quanto sua extensão ao longo da junta.

É de amplo conhecimento que a qualidade da solda em relação à precisão dimensional, quando aplicada pelo método semiautomático, é um resultado direto das habilidades do soldador (KIM et al, 2005), uma vez que o posicionamento do cordão pode ser guiado por marcações superficiais, significativamente afetadas pela luminosidade do arco elétrico, ferramentas ou, na maioria das vezes, somente pelas habilidades do soldador. Estas características afetam diretamente a qualidade da junta, tanto sob o ponto de vista estético quanto mecânico, sendo aspectos de crescente atenção no meio industrial diante do cenário econômico atual (METTERNICH et al, 2013; STENBERG et al, 2017; HAMMERSBERG,

²O processo de soldagem possui grande influência nas características microestruturais da junta em função de aspectos processuais como o aporte térmico, taxas de resfriamento, máximas temperaturas atingidas e regiões de transição entre as microestruturas formadas, afetando significativamente, e de forma direta, as propriedades mecânicas da junta.

2010), onde a qualidade e a redução de custos, este último também afetado por questões de garantia³ em função de produtos de má qualidade mecânica, vêm norteando muitas das diretrizes tecnológicas do setor industrial.

Em uma linha de produção, onde a produtividade define as regras fabris, a aplicação de cordões intermitentes é, na grande maioria das vezes, feita sem o auxílio de ferramentas para orientar o soldador a respeito do correto posicionamento das juntas, salvo situações especiais. Este cenário resulta em uma situação de imprecisão dimensional no comprimento e espaçamento dos cordões de solda, afetando aspectos estruturais como rigidez e, possivelmente, a concentração de tensões no componente.

Soldas intermitentes têm uma contribuição importante nas propriedades mecânicas da junta, especialmente em relação à resistência à fadiga (KHEDMATI, 2009), onde estudos específicos, embora em números restritos, foram conduzidos para avaliar a influência dos pontos de início e fim do cordão de solda em relação à resistência a carregamentos cíclicos (FRICKE, 2003; DIMITRAKIS, 2001), sendo regiões críticas para a nucleação e propagação de trincas de fadiga.

De acordo com normas de soldagem (AWS D1.1/D1.1M, 2010; EN 1993-1-1, 1992) os tamanhos e comprimentos dos cordões de solda não devem ser menores do que os valores especificados em projeto, reforçando a necessidade de executar a junta com as dimensões corretas e, conseqüentemente, atingir as propriedades mecânicas pretendidas para o produto final. Estes critérios conduzem projetistas e engenheiros a encontrar soluções tanto no chão de fábrica quanto nos departamentos de engenharia, que permitam atingir as recomendações normalizadas para uma segura, porém mais relacionada com uma padronizada entrega e utilização do produto (CASAVOLA, 2009; DESHMUKH et al, 2014).

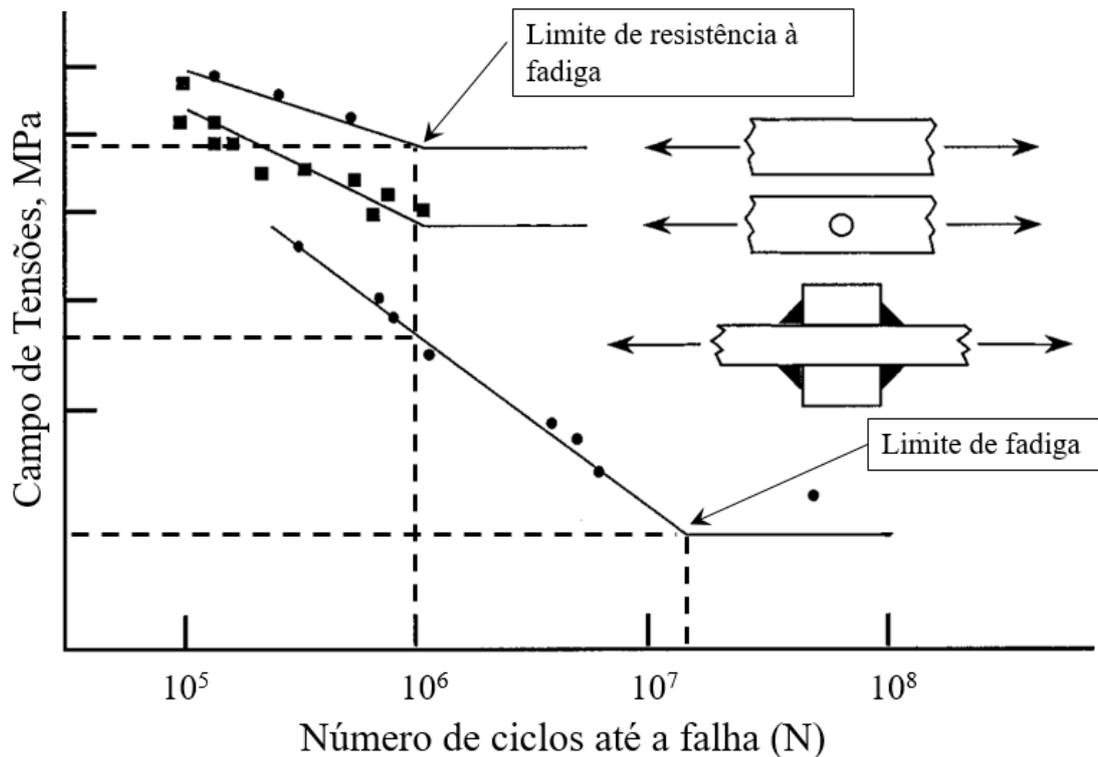
Este cenário mostra a necessidade de desenvolver estudos a respeito destas características e sua influência sobre as propriedades mecânicas da junta soldada, pois o efeito estrutural que as variações dimensionais dos cordões de solda conferem à resistência mecânica da junta ainda é uma incógnita. Em outra frente é latente a necessidade de melhorar as condições de aplicação dos cordões de solda, visto a relação direta que possuem com as propriedades mecânicas dos componentes, especialmente em relação à vida em fadiga.

³Período de tempo em que o produto é segurado pelo fornecedor contra defeitos de fabricação.

3.3 FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS

Em juntas soldadas a presença da solda altera significativamente a vida em fadiga do componente em comparação com a resistência do metal de base, como pode ser observado nas figuras 6 e 7, ao ponto que em uma junta soldada submetida a carregamento alternado e constante, não importando a intensidade da carga, irá falhar em algum momento se os carregamentos forem mantidos (LASSEN, 2009).

Figura 6 - Efeito da solda na resistência à fadiga.



Fonte: adaptado de MADOX (2000) e TWI (2019).

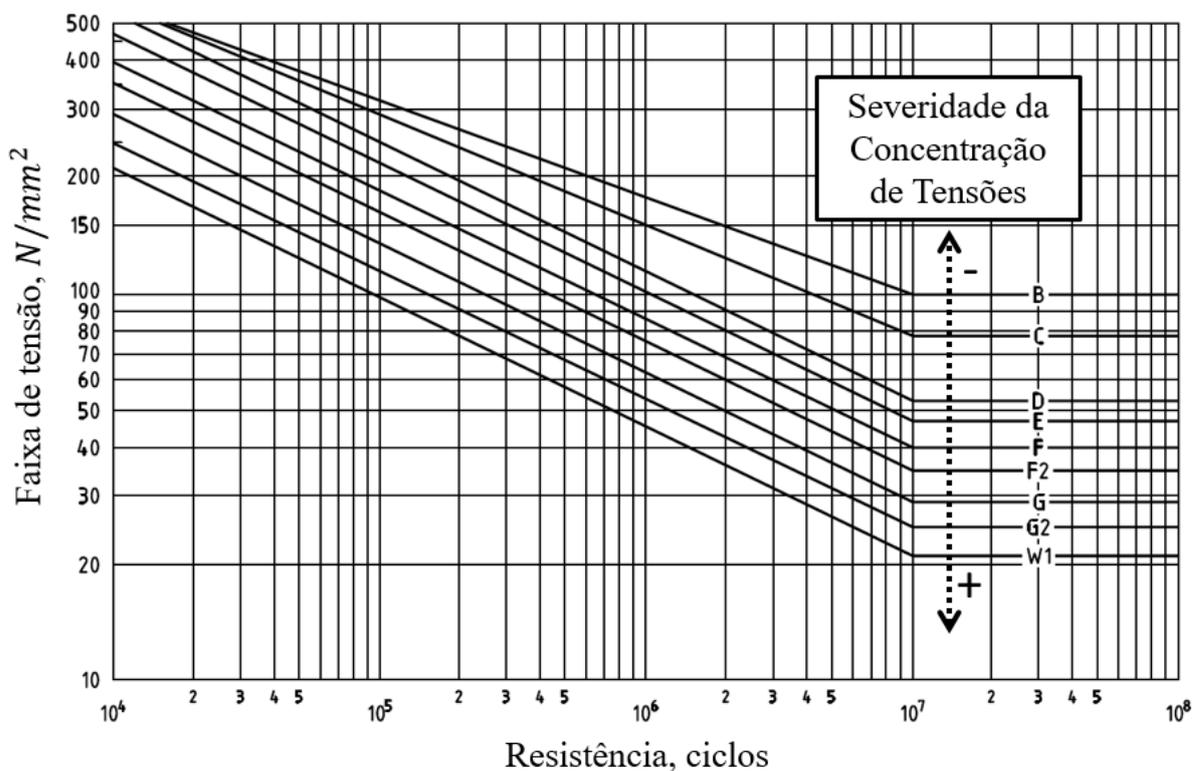
A figura 6 mostra a influência da presença de concentradores de tensões na vida em fadiga de amostras fabricadas em aço carbono, comparando a resistência à fadiga do metal de base em relação a componentes usinados e soldados. Pode ser observado que em componentes não soldados ocorre a existência de um limite de resistência a fadiga, onde teoricamente qualquer tensão com valores abaixo desta fronteira não conduz ao surgimento nem propagação de trincas.

Uma alteração nesta característica é observada quando o mesmo componente é avaliado com a presença de solda, onde o limite de resistência é substituído pelo limite de fadiga, conferindo ao componente uma previsibilidade para ocorrência da falha em algum

momento de sua vida em trabalho. Para a curva de fadiga do componente soldado mostrado na figura 6 a vida em fadiga cai drasticamente, sendo que para 10^7 ciclos ocorre o limiar do limite de fadiga, onde as tensões resistidas pelo componente são tão baixas que dificilmente são consideradas em projeto.

Estas características são de extrema importância para qualquer projeto de componente soldado que seja submetido a carregamentos flutuantes, pois toda a resistência à fadiga da peça passa a ser governada não mais pelos limites de resistência do material de base, mas sim pelos limites da solda, notavelmente inferiores e sensivelmente afetados pelas características, tanto geométricas quanto metalúrgicas, da zona fundida.

Figura 7 - Efeito da classificação da junta em relação ao limite de fadiga.

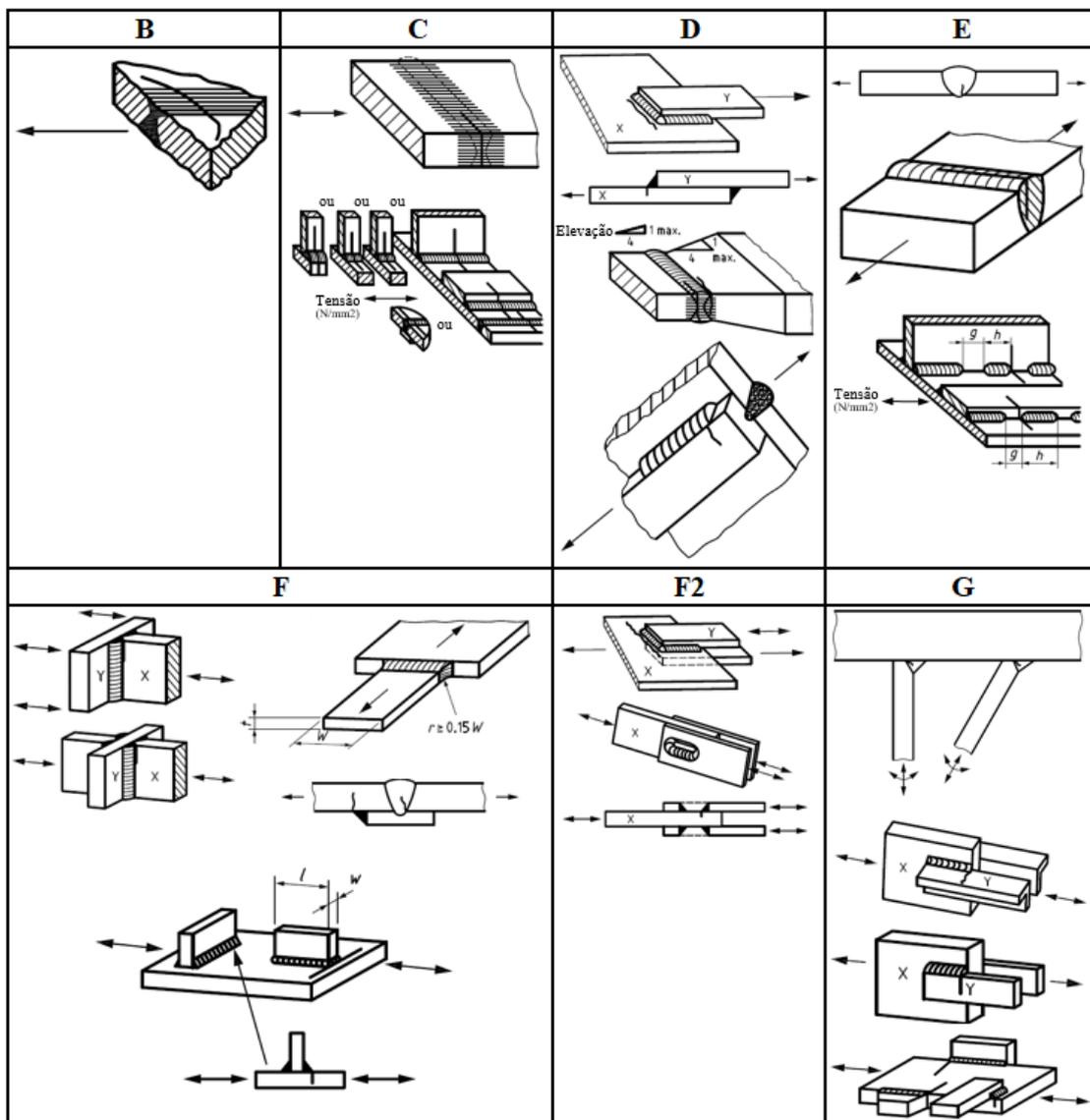


Fonte: Adaptado de BS 7608 (2014).

A figura 7 (BS7608, 2014) mostra o efeito de cada classificação geométrica de junta soldada em relação à resistência à carregamentos cíclicos, apresentando como limite de fadiga o valor de 10^7 ciclos. Na figura 7 cada curva, de B até W1, representa algumas condições geométricas de juntas soldadas, sendo que quanto maior for a severidade das tensões atuantes menor é a letra classificatória da curva.

Conforme orientado pela figura 8, onde são mostrados alguns casos descritos pela BS 7608 (2014) para as juntas soldadas comumente fabricadas a partir de chapas planas de aço, enquanto que para se enquadrar na curva B a junta necessita de peças coplanares e o reforço da solda ser removido totalmente por usinagem, a junta G representa situações em que o cordão de solda afeta severamente a concentração de tensões na união, com a solda sendo carregada transversalmente ou tocando a borda da peça.

Figura 8 - Classificação de juntas soldadas de acordo com a severidade das tensões atuantes.



Fonte: Adaptado de BS 7608 (2014).

Cada configuração de junta possui um efeito distinto em relação à resistência à fadiga devido à severidade do entalhe, o qual está relacionado com a geometria da peça, tipo de solda e material.

Pode ser observado que a classificação da resistência da junta vai decaindo à medida que a solda tem aumentos de angulação e transversalidade dos carregamentos em relação aos seus membros, afetando negativamente a resistência e aumentando sua importância nas características estruturais.

É importante notar que a simples mudança no sentido de carregamento da junta afeta sensivelmente o limite de fadiga do componente, a exemplo da comparação entre as soldas de classe D e F. Esta alteração na vida em fadiga é causada principalmente por três fatores (SSC-400, 1997):

- Presença de microtrincas;
- Concentração de tensões na raiz da junta;
- Tensões residuais de tração

Embora haja opiniões divergentes sobre alguns aspectos do comportamento em fadiga de juntas soldadas, como a consideração do período de iniciação de trincas (ZHANG, 2009) sabe-se que a solda é um importante concentrador de tensões e fonte de inúmeros defeitos, tanto superficiais quanto internos, para o metal fundido (SCHORK et al, 2018; YILIRIM, 2017; SARZOSA, 2013).

Em estudo realizado por Zhang (2009) foi evidenciado que mesmo em juntas de alta qualidade ocorre a existência de falhas, fato que reforça o entendimento que a vida em fadiga de juntas soldadas é governada pela propagação da trinca, além de que as características do metal de base pouco afetam a resistência do componente, estando totalmente atrelada às propriedades físicas e mecânicas da zona fundida.

A avaliação de componentes soldados sob fadiga é um assunto que tem despertado o interesse de pesquisadores por décadas, visto a quantidade de variáveis envolvidas no fenômeno e a influência que seus efeitos têm sobre a vida da sociedade, seja para quem projeta um componente ou para quem faz uso do produto final, sendo este último o sujeito alvo para a incessante busca do entendimento deste fenômeno que atua sobre qualquer objeto que esteja sujeito a carregamentos flutuantes. Embora seja um assunto intensamente discutido em pesquisas ainda não é completamente compreendido, especialmente quando avaliado sob a perspectiva de juntas soldadas em função da complexidade mecânica, metalúrgica e geométrica da junta.

A dificuldade em comunicar os resultados obtidos por estudos em juntas soldadas e seu posterior uso em correlações de projeto está, segundo Casavola (2009), na dificuldade

em reproduzir duas juntas com as mesmas características, sejam elas geométricas, metalúrgicas ou mecânicas, fazendo com que cada junta tenha propriedades mecânicas e metalúrgicas únicas, originadas exclusivamente em função dos parâmetros de solda e suas variações devido às condições ambientais em que o componente foi fabricado.

Desta forma os dados obtidos experimentalmente devem ser criteriosamente aplicados em cálculos e simulações para junções e situações similares, além de ressaltar a existência de inúmeras considerações durante as avaliações como simplificações e aplicação de coeficientes de segurança, o que torna os valores obtidos em ensaios praticamente intrínsecos, considerando um certo nível de precisão, à geometria originalmente avaliada.

Neste cenário cabe ao engenheiro utilizar os dados disponíveis na literatura, como por exemplo as normas BS-7608 (2014) e IIW-1823-07 (2008), comparando qual a forma geométrica de junta que melhor se adequa à situação em análise e observar os limites de tensões recomendados, aplicando as devidas metodologias para caracterização da vida em fadiga do componente, sejam elas via simulação computacional através de análise de EF e/ou avaliando o projeto com testes de laboratório e campo.

Mesmo com a existência de documentos para recomendar os limites de tensões aplicados em juntas soldadas, Casavola (2009) salienta que, na medida do possível, devem ser avaliadas em tamanho real e simulando os carregamentos reais, pois este procedimento mitiga⁴ parte das simplificações aplicadas em partes específicas de um conjunto ou mesmo em simulações virtuais, como análise de EF.

Os estudos relacionados ao fenômeno da fadiga estão geralmente direcionados ao entendimento de seu comportamento de forma genérica, eliminando uma série de variáveis a fim de aprimorar a assertividade no entendimento da influência de determinado parâmetro sobre a resistência do componente (FRICKE, 2003). Esta simplificação acaba afastando de uma situação real os resultados obtidos em análises à medida que o número de variáveis envolvidas no estudo for diminuindo.

3.4 FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS INTERMITENTES

A quantidade de fatores presentes em uma junta soldada que afetam sua vida em fadiga é tal que a grande maioria dos estudos relacionados ao tema são elaborados com base em

⁴As características (mecânicas, metalúrgicas e geométricas) de um componente soldado são de difícil repetibilidade, visto a quantidade de variáveis envolvidas no processo, principalmente a variável humana, atrelada à operação do bocal de solda.

soldas contínuas, atuando como um corpo único e rígido, simplificando as análises através da eliminação de variáveis relevantes como o início e fim dos cordões, os quais são importantes pontos de concentração de tensão.

Soldas intermitentes são constantemente utilizadas em construção mecânica, seja em razão de fatores econômicos ou para minimizar efeitos de distorções na junta, porém a falta de estudos relacionados aos efeitos mecânicos deste tipo específico de componente dificulta o entendimento do comportamento mecânico deste tipo particular de junta (BRANCO, 1999). Este cenário resulta em carência de técnicas para mitigar seus efeitos sobre o comportamento à fadiga da estrutura, visto a quantidade de variáveis que este processo impõe sobre os estudos em comparação à solda contínua (KHEDMATI et al, 2007). Branco afirma que:

[...] o comportamento à fadiga das juntas transversais e longitudinais contínuas com e sem cobre-junta encontra-se já estudado com bastante profundidade, quer sob o ponto de vista teórico quer a nível de resultados experimentais. O mesmo não acontece em relação às juntas descontínuas [...] que merecem mais trabalho de investigação [...]. (BRANCO, 1999, p.320).

A fabricação de componentes soldados engloba basicamente duas formas de deposição dos cordões: a forma contínua, onde a solda é depositada do início ao fim da face de solda sem interrupções, e a forma intermitente, onde a face de solda recebe, no mínimo, um cordão de solda com comprimento inferior à ela. Nesta última situação geralmente ocorre a deposição de mais de um cordão com comprimentos iguais e equidistantes, distribuídos de forma pré-definida ao longo da face de solda.

Na solda contínua o conjunto final resulta em um corpo único, com todos os componentes interligados através do metal fundido. As descontinuidades, nesses casos, são devidas principalmente pelas intersecções dos cordões de solda que coincidem através de duas ou mais faces de solda ou por interrupções da soldagem em uma mesma face da junta. Neste último caso a descontinuidade pode ser amenizada removendo as imperfeições da extremidade incompleta da junta antes de iniciar a sua continuação.

Na soldagem intermitente cada junta resulta na presença de, no mínimo, duas descontinuidades representadas pelo início e fim do cordão de solda. Essas descontinuidades são pontos críticos de concentração de tensões (SHAMS, 2016), pois além da presença dos possíveis defeitos que ocorrem ao longo da soldagem as extremidades possuem regiões

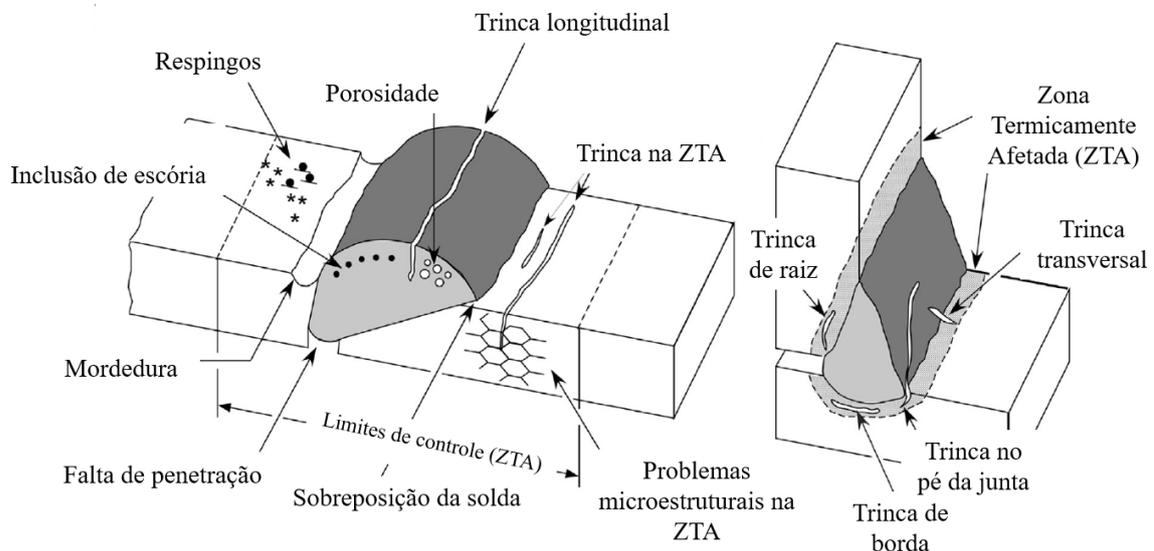
geometricamente agudas e outras com baixa fusão, aumentando o risco para o início e propagação de trincas.

3.5 EFEITOS DO CORDÃO DE SOLDA NA VIDA EM FADIGA

3.5.1 Descontinuidades

Dentre as características do processo de soldagem que possuem maior impacto na resistência mecânica do componente estão as descontinuidades, as quais podem ter origem em fatores como parâmetros de solda, manuseio inadequado dos equipamentos de solda e materiais impróprios para o processo.

Figura 9 - Defeitos típicos observados em juntas soldadas.



Fonte: adaptado de SCHORK (et al, 2018).

Os defeitos mostrados na figura 9 podem ser divididos em duas categorias: devido ao processo de soldagem, como trincas, respingos e porosidades, e defeitos relacionados à geometria do cordão de solda, como falta de penetração, mordeduras e sobreposição do pé da solda.

As descontinuidades estão presentes tanto no interior quanto no exterior da zona termicamente afetada – ZTA, conforme mostrado na figura 9, e possuem efeitos severamente deteriorantes às propriedades mecânicas da junta, uma vez que são pontos de elevada concentração de tensões e atuam como facilitadores para iniciação de trincas. Estudos realizados por REEMSNYDER (1978) e MUNSE (1978) mostram que defeitos internos têm efeito significativamente maior no decréscimo da vida em fadiga do que defeitos externos,

principalmente para fadiga de baixo ciclo (WEIDNER, 2017), reforçados pela dificuldade em controlar fatores que muitas vezes são invisíveis à inspeção visual e economicamente inviáveis para detecção e reparação em uma parcela significativa de aplicações.

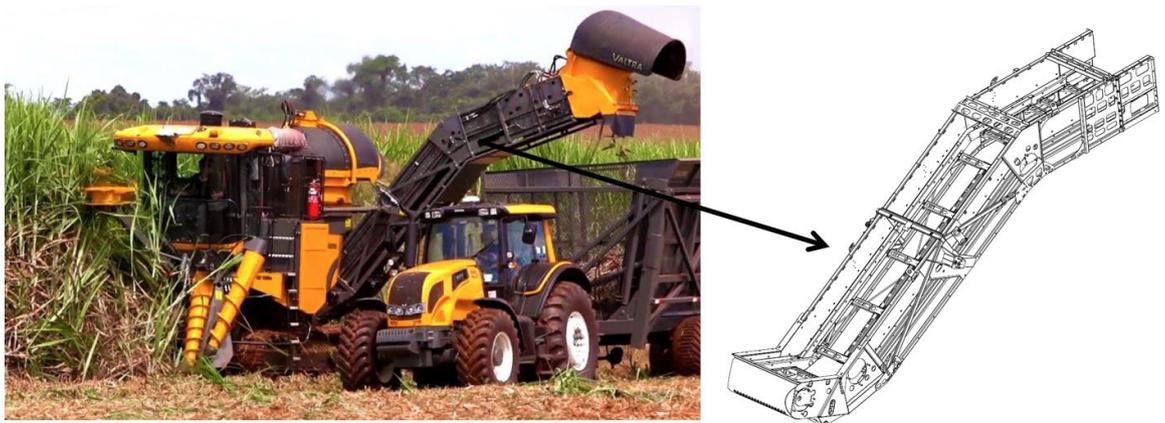
3.5.2 Presença do Cordão de Solda

Em relação ao efeito das características geométricas do cordão de solda as regiões críticas para iniciação de trincas são o início e fim da junta, especialmente o início (KAFFENBERGER et al, 2012), tendo seu efeito potencializado quando presente em juntas intermitentes, onde essas regiões críticas são multiplicadas pela quantidade de cordões presentes no componente (SHAMS, 2016).

Na indústria metal mecânica a utilização de juntas intermitentes é largamente difundida, visto que soldas contínuas não são facilmente aplicáveis em estruturas com rigidez relativamente baixa ou conjuntos fabricados a partir de chapas finas⁵ de aço, devido a questões como deformações térmicas e peso.

A figura 10 mostra um exemplo de estrutura fabricada predominantemente por chapas finas de aço e soldada quase em sua totalidade por cordões intermitentes, onde a complexidade estrutural limita a aplicação extensiva de juntas contínuas. Pode ser observada a predominância de componentes esbeltos na estrutura soldada em destaque, com peças de baixa espessura e comprimentos relativamente grandes, sendo em sua totalidade unidos por soldagem MAG e cordões intermitentes.

Figura 10 - Estrutura metálica utilizada em uma máquina agrícola.



⁵Considera-se chapas finas de aço aos materiais com espessura inferior a 5 mm (KAFFENBERGER et al, 2012).

A estrutura mostrada na figura 10 faz parte de uma máquina agrícola que trabalha aproximadamente 3000 horas por ano, estando sujeita a vários modos de carregamentos e condições ambientais. O controle na qualidade da aplicação da solda é tão importante quanto sua correta especificação e distribuição ao longo da estrutura, uma vez que se torna inviável um controle rigoroso de todas as juntas⁶, mas é relativamente fácil e simples adequar as características do projeto para mitigar possíveis danos causados pela concentração de tensões atuantes no conjunto devido à presença de solda.

Outro fator importante para a utilização de juntas intermitentes em chapas finas de aço está relacionado com a resistência mecânica do conjunto, onde um cordão contínuo muitas vezes acaba sendo superdimensionado em relação à resistência mecânica necessária para a estrutura ou causando distorções mecânicas. Nestas situações, considerando as limitações do processo de soldagem, podem ser aplicados cordões com tamanhos proporcionais às necessidades mecânicas do conjunto.

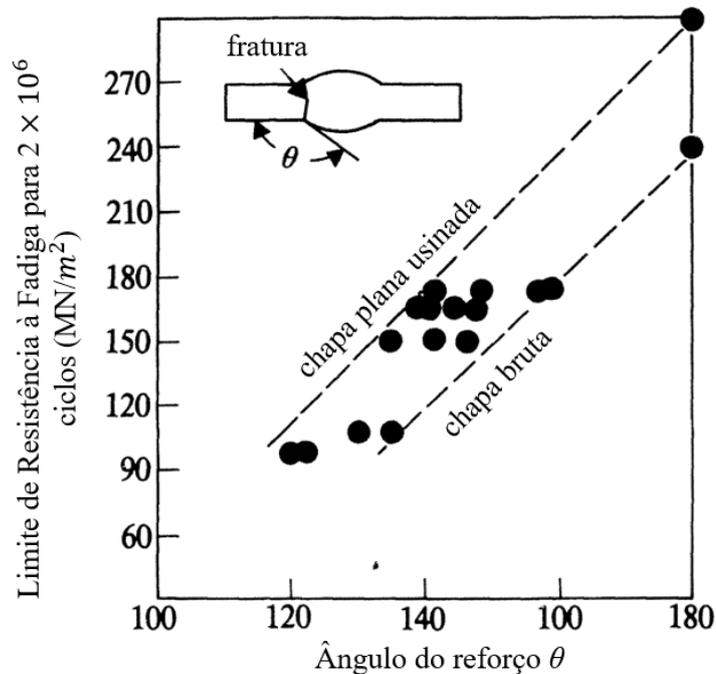
Em estudo realizado por Lancaster (1980) foi avaliado o efeito da geometria do cordão de solda em relação ao surgimento e propagação de trincas e seu efeito sobre a vida em fadiga. A figura 11 mostra o efeito do ângulo do reforço do cordão de solda sobre a resistência à fadiga do componente. Observa-se o impacto que o aumento no ângulo do reforço tem sobre a diminuição da vida em fadiga, onde variações de 180 a 120 graus impactam na diminuição de até 3 vezes a resistência à fadiga do componente. A diminuição da vida em fadiga decresce linearmente com a diminuição do ângulo do reforço da junta, sendo que este ângulo, na grande maioria das situações, não recebe qualquer tratamento pós solda, como esmerilhamento do pé do cordão ou mesmo sua remoção, sujeitando a junta à perda de resistência mecânica.

Um estudo realizado por Kaffenberger (et al, 2012) mostrou que há diferenças marcantes no surgimento e propagação de trincas em relação aos pontos de início e fim do cordão de solda. A figura 12 mostra uma vista superior de um cordão de solda em uma junta sobreposta com a presença de uma trinca propagada a partir da região de início da solda. Pode ser observado que, geometricamente, o cordão possui ângulos de reforço diferentes ao longo de sua seção longitudinal, sendo que em seu início o ângulo é mais afastado de 180 graus, favorecendo o surgimento de falhas nesta região. Este detalhe geométrico da junta, segundo Kaffenberger (et al, 2012), está relacionado com a necessidade do soldador em

⁶Neste componente a quantidade de cordões de solda é superior a 1400 elementos devido à elevada incidência de soldas intermitentes.

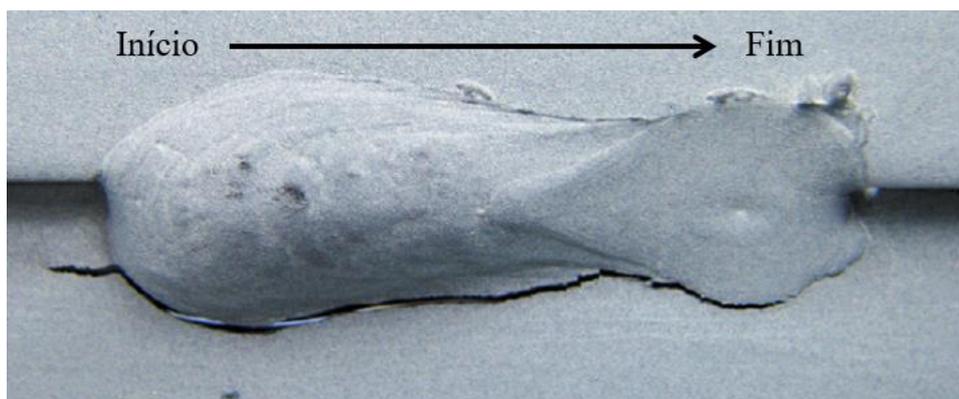
manter o bocal de soldagem estático por alguns segundos, geralmente 1 a 2 segundos, na posição de início da junta a fim de que ocorra a estabilidade do arco elétrico para que, somente após sua estabilização, a tocha possa ser deslocada e iniciada a deposição do cordão.

Figura 11 - Efeito do perfil da junta na resistência a fadiga de soldas em juntas de topo transversais em aço carbono.



Fonte: Adaptado de: LANCASTER (1980).

Figura 12 - Cordão de solda com propagação de trinca.



Fonte: adaptado de KAFFENBERGER (et al, 2012).

Esta operação faz com que, ao final da junta, a poça de fusão esteja completamente líquida e permitindo que o metal de solda se acomode e flua por todas as direções disponíveis, mantendo assim o formato ligeiramente plano do reforço, diminuindo a suscetibilidade à nucleação e propagação de trincas.

Todas essas variáveis, intrínsecas ao processo de soldagem, fazem com que na maior parte das situações as juntas sejam projetadas e dimensionadas seguindo a premissa da segurança, resultando em seu superdimensionamento.

3.5.3 Penetração da Junta

A penetração da junta tem efeito significativo na resistência mecânica do componente pela relação direta que possui com a área de união entre as peças, tendo efeito marcante principalmente sobre a resistência estática, onde as tensões suportadas são diretamente proporcionais ao aumento da área de ligação da junta.

Estudos mostram que a penetração tem papel crucial na vida em fadiga de juntas soldadas, embora ainda não haja um consenso sobre o efeito que a penetração tem na vida em fadiga, por exemplo, de juntas em ângulo (DUNG et al, 2015), sugerindo inclusive que em algumas situações juntas com penetração parcial, da ordem de 80%, tem resistência à fadiga superior a juntas com penetração total. Já o estudo apresentado por ZACHARY (1976) mostrou que juntas de topo possuem resistência à fadiga maior quando a solda é realizada com penetração total.

Ambas as situações descritas possuem inúmeros fatores que as caracterizam para apresentarem os comportamentos em fadiga relatados pelos estudos, o que deixa claro a especificidade de cada situação, mesmo em juntas similares, em relação aos efeitos que cada grupo de características tem sobre o comportamento mecânico do componente avaliado.

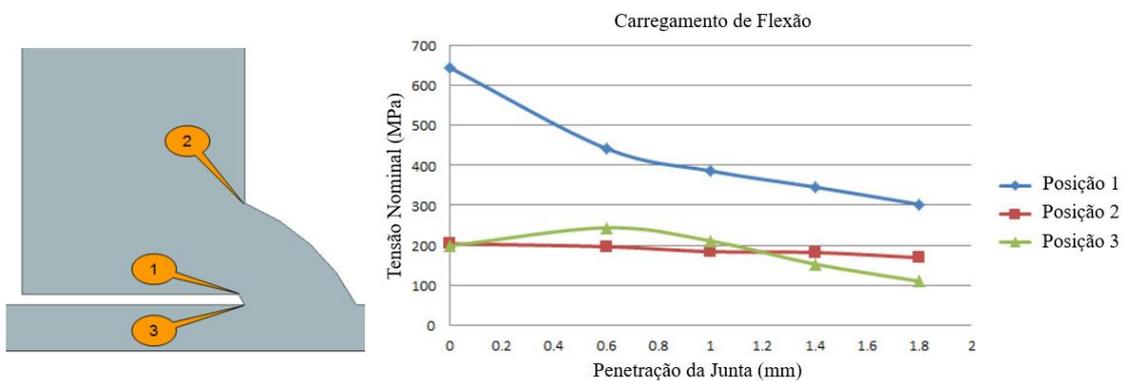
Dung (et al, 2015) ainda salienta a importância que o controle na execução da solda tem sobre a melhora nas características geométricas da junta e, conseqüentemente, nas suas propriedades mecânicas. Esta afirmação é uma exceção entre os estudos realizados sobre comportamento de juntas soldadas sob fadiga, sendo que as condições relacionadas à homogeneidade geométrica no comprimento e espaçamento de cordões de solda não têm sua influência descrita em estudos a respeito do comportamento mecânico de juntas soldadas.

De acordo com Deshmukh (et al, 2014) a maioria das falhas em juntas soldadas está relacionada com a sua penetração insuficiente, estritamente conectada com a geometria da junta e o tipo de carregamento. Embora algumas normas possuem recomendações que permitem a utilização de juntas com penetração parcial (AWS D1.1/D1.1M, 2010), sua aplicação é permitida em situações onde não ocorrem carregamentos cíclicos. Quanto menor a penetração da junta menor será sua resistência em função do acréscimo das tensões

residuais no cordão pela menor área de fusão entre os componentes, facilitando a iniciação e propagação de trincas, principalmente de baixo ciclo.

A figura 13 é resultado de estudo realizado por DESHMUKH (et al, 2014) para identificar quais as regiões da junta sofrem de forma mais acentuada com a concentração de tensões, avaliando o efeito que a penetração tem sobre a magnitude das tensões em três regiões: o pé do cordão (posição 2) e nas duas faces internas da raiz da junta (posição 1 e posição 3).

Figura 13 - Penetração da junta versus nível de tensões resultantes em diferentes pontos.



Fonte: Adaptado de DESHMUKH (et al, 2014).

Pode ser observado que a penetração tem influência direta sobre os níveis de tensões na junta, embora tenha efeitos diferenciados de acordo com a posição onde é avaliada, em geral atuando de forma a diminuir os níveis de tensões à medida que a penetração aumenta.

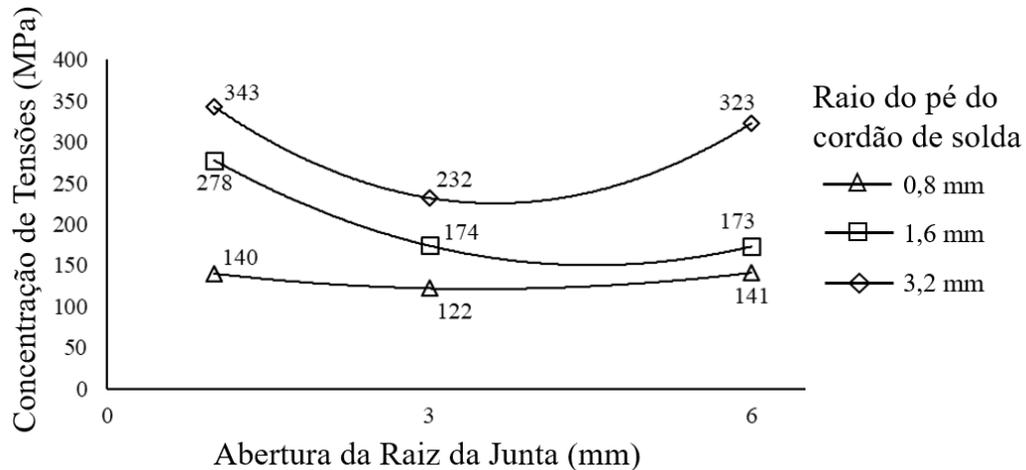
Assim como ainda não há um entendimento completo do comportamento de juntas soldadas sob o efeito de fadiga, principalmente em função do número de variáveis e situações envolvidas, cada conclusão deve ser ponderada em relação às circunstâncias em que foi produzida, pois o número de variáveis que tem efeito sobre o resultado final do comportamento mecânico da junta é muito grande e é afetado pelo modo de carregamento, geometria da junta, processo de soldagem e materiais, tanto de base quanto consumíveis, entre outros aspectos de difícil controle como, principalmente, o fator humano.

3.5.4 Abertura de Raiz da Junta

De forma geral a abertura de raiz da junta tem relação direta com a penetração da solda, afetando diretamente sua profundidade e, conseqüentemente, sua resistência a fadiga. Assim como na penetração, a padronização na abertura de raiz permite que o cordão seja depositado

de maneira mais uniforme e metalurgicamente homogêneo, diminuindo a necessidade de alterar parâmetros durante o processo, ou mesmo ignorá-los, em função da complexidade para ajustá-los devido à variação na abertura de raiz.

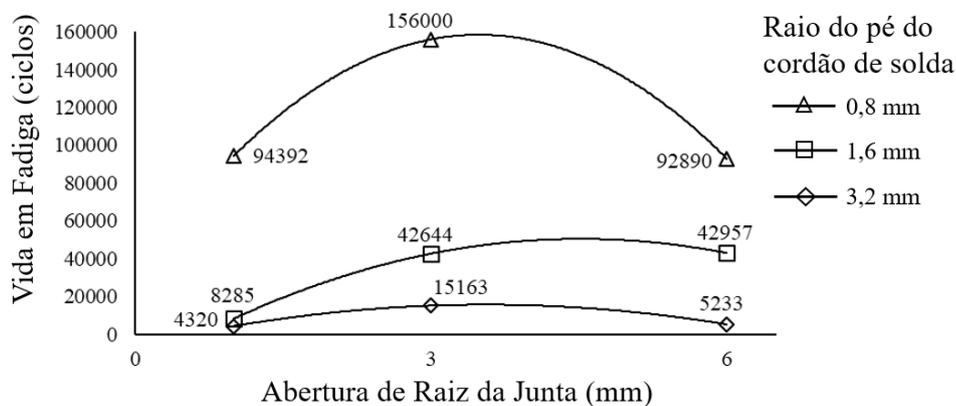
Figura 14 - Efeito da abertura de raiz da junta e do raio do pé do cordão na concentração de tensões na junta.



Fonte: Adaptado de MERT (2009).

Em simulações realizadas por Mert (2009) foi evidenciado que há uma relação importante entre a abertura de raiz com a concentração de tensões na junta, havendo limites além dos quais ela perde eficiência. A figura 14 mostra esse comportamento, avaliando também o efeito que o raio do pé do cordão tem sobre a concentração de tensões, podendo ser observado que tanto para pequenas quanto para grandes aberturas de raiz há uma tendência para o aumento da concentração de tensões, afetando diretamente a vida em fadiga do componente.

Figura 15 - Efeito da abertura de raiz da junta e do raio do pé do cordão na vida em fadiga da junta.



Fonte: Adaptado de MERT (2009).

Neste sentido a norma AWS D1.1/D1.1M (2004) especifica as aberturas de raiz recomendadas para cada configuração de junta em função da espessura das peças. Seguindo estas recomendações há uma diminuição dos riscos de falhas em função de variáveis que afetam sensivelmente a resistência mecânica do componente, utilizando parâmetros obtidos por ensaios e estudos científicos com resultados positivos comprovados.

A figura 15 mostra o efeito que a abertura de raiz da junta tem sobre a vida em fadiga do componente, permitindo também a observação sobre o efeito no número de ciclos resistidos para 3 diferentes dimensões de abertura de raiz. Pode ser observado que, embora a abertura de raiz tenha efeito significativo na resistência da junta, o efeito do raio do pé do cordão é mais significativo, sendo que para a resistência à fadiga os melhores valores obtidos para um raio de 0,8 mm estão significativamente distantes dos piores valores obtidos para um raio de 3,2 mm. As figuras 14 e 15 se complementam em relação ao efeito que a concentração de tensões tem sobre a vida em fadiga, permitindo obter um parâmetro sobre as melhores condições de projeto de um componente que esteja submetido a carregamentos flutuantes.

A influência do raio do pé do cordão de solda (MERT, 2009) na resistência mecânica pode ser avaliada em conjunto com o estudo realizado por Lancaster (1980), onde seu aumento induz à um aumento no ângulo do pé do cordão, situação onde ambos os estudos apresentaram aumentos significativos na vida em fadiga.

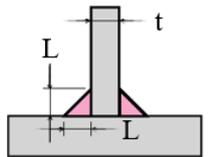
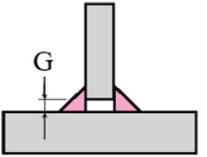
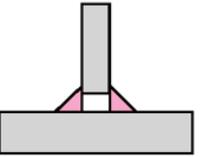
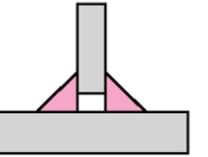
O raio do pé do cordão de solda é um parâmetro de controle impraticável durante o processo de soldagem, porém seu ajuste pode ser realizado mediante ações pós solda, como esmerilhamento ou aplicação de alívio de tensões pelo processo chamado HFMI (*High Frequency Mechanical Impact*), as quais eliminam as imperfeições e adicionam um raio mínimo ao pé do cordão. O efeito do raio do pé do cordão evidencia a importância dos concentradores de tensões na junta, onde a suavização de cantos e arestas têm efeito significativo na melhora da resistência mecânica.

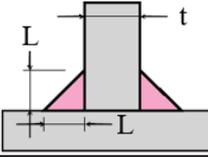
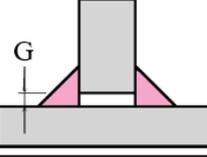
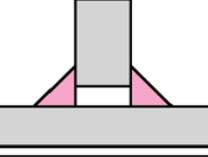
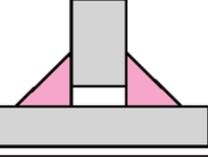
Outro estudo realizado por Sujitani (2013) avaliou a resistência estática da junta em relação à abertura de raiz, adicionando um parâmetro extra que foi o tamanho do cordão de solda. Foi caracterizado um aumento na resistência da junta com o aumento da abertura de raiz e penetração, porém não foi observado aumento na resistência em função do aumento do cordão de solda. A figura 16 mostra os detalhes das amostras avaliadas no estudo.

Neste estudo Sugitani (2013) também afirma a importância da penetração da junta na resistência mecânica do componente, onde maiores penetrações representam maiores

resistências mecânicas. Entretanto outro fator de importante influência foi a abertura de raiz, onde as amostras obtidas com a presença da mesma mostraram maiores resistências mecânicas em comparação com as amostras sem ela.

Figura 16 - Estudo comparativo da resistência de juntas com variação na abertura de raiz e tamanho da solda.

Junta	I	J	K	L
Detalhe				
G	0 mm	3 mm	5 mm	
L	6 mm	6 mm	6 mm	9 mm
t	12,5 mm			

Junta	M	N	O	P
Detalhe				
G	0 mm	3 mm	5 mm	
L	9 mm	9 mm	9 mm	12 mm
t	25 mm			

Fonte: Adaptado de SUJITANI (2013).

A conclusão é que para a abertura de raiz com valores abaixo do recomendado por normas, tendendo a zero, e acima desse, aproximando-se ou ultrapassando a metade da espessura da chapa, as tensões residuais tendem a elevar-se ocasionando a redução da resistência mecânica da junta, afetando consideravelmente a resistência à propagação de falhas por fadiga.

Este efeito heterogêneo, que apenas alguns dos aspectos da junta soldada têm sobre sua resistência mecânica sob carregamentos cíclicos, dão uma amostra da complexidade do assunto, evidenciando a importância em atuar sobre fatores de controle do processo de soldagem que, até o presente momento, não foram abordados.

3.6 CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM MAG

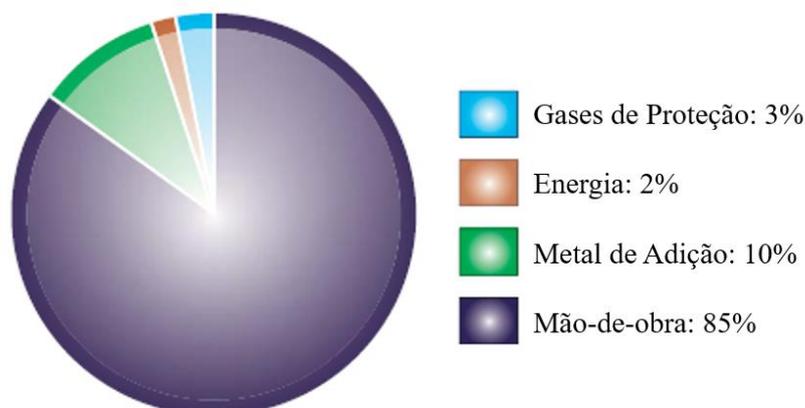
O processo de soldagem MAG, por ser operacionalizado de forma semi-automática, implica em uma significativa interação do soldador sobre algumas etapas do processo, como

a movimentação da tocha de solda, influenciando diretamente no seu posicionamento em relação à junta. Esta operação pode causar, em níveis reduzidos quando comparados com a soldagem manual, defeitos como falta de penetração e porosidades, geralmente originadas pela falta de experiência do soldador (MOORE, 2015).

A redução da interferência humana no processo de soldagem é um fator que, além de mitigar a presença de defeitos, resulta na otimização dos tempos e, conseqüentemente, nos custos de fabricação (SOARES, 2016; BLANCO et al, 2015), além de melhorias nas propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta (HAN et al, 2019; ALBUQUERQUE et al, 2011). Em função dos impactos econômicos impostos pela operação manual e semiautomática do processo de soldagem, estudos são realizados para caracterizar os efeitos no produto final, que neste caso é a junta soldada, comparando soldas manuais e mecanizadas (SOARES, 2016; HAN et al, 2019), a fim de justificar o desenvolvimento de tecnologias e práticas de soldagem que minimizem os impactos causados por defeitos e custos no produto final.

Em estudo realizado por Miller (2007) foi evidenciado que a mão-de-obra tem importância significativa sobre o custo de fabricação de componentes soldados, ressaltando o potencial econômico que a aplicação das marcações tem sobre o setor industrial. Neste estudo salientam-se os esforços do setor metal-mecânico na redução de custos operacionais em máquinas e equipamentos, porém o efeito do elemento de maior impacto, a mão-de-obra, acaba sendo negligenciado.

Figura 17 - Percentual de custos envolvidos no processo de soldagem.



Fonte: Adaptado de Miller (2007).

A figura 17 mostra o percentual de participação da mão-de-obra na composição do custo do processo de soldagem, comparando com os consumíveis utilizados na operação. É visível a

importância significativa do soldador na análise de custos em processos manuais ou semiautomáticos.

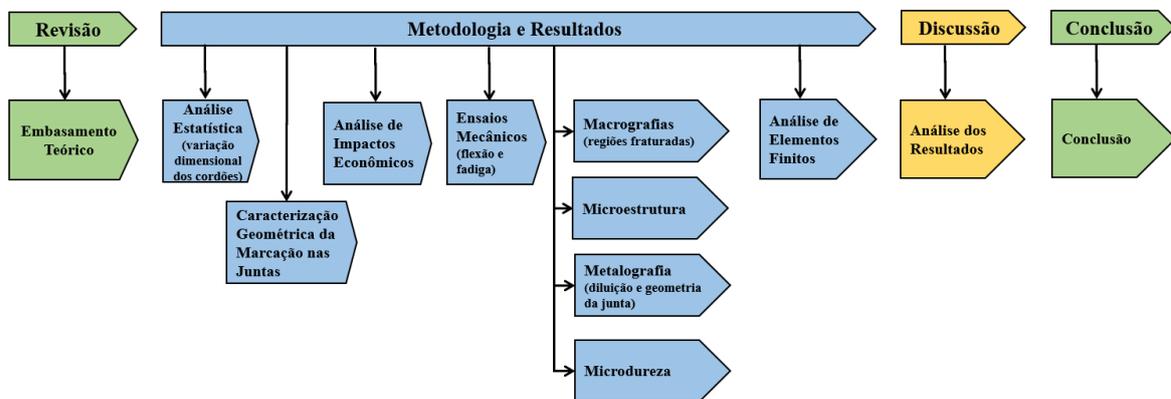
A automação do processo de soldagem é cada vez mais comum, porém a utilização de processos semiautomáticos ainda é economicamente vantajosa visto a versatilidade destas técnicas. Para manter ativa a viabilidade na utilização desses processos são necessários estudos e soluções para mitigar os problemas causados pela presença do soldador (MOORE, 2015), permitindo que as juntas oriundas destas técnicas de soldagem sejam competitivas, mecânica e economicamente, frente à popularização da robotização.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia deste trabalho teve como premissa a avaliação comparativa dos resultados tanto para as análises mecânicas quanto para as verificações dimensionais dos cordões de solda, tendo como base de referência o comportamento mecânico e dimensional da solda executada de acordo com os processos atuais, aplicada de forma semi-automática em faces de solda lisas, chanfro reto e sem bisel. Os resultados foram comparados de forma quantitativa, avaliando as informações obtidas entre as amostras com e sem o uso das marcações na junta.

Foram, primeiramente, realizados estudos estatísticos para caracterizar as condições dimensionais do comprimento e espaçamento dos cordões de solda em juntas executadas pelo método atual, sem marcação, comparando com os resultados obtidos em juntas executadas com o uso das marcações. O uso das marcações impacta na adição de características não presentes no processo atual de soldagem, levando a uma análise de viabilidade econômica sobre sua utilização, observando os impactos em projeto, fabricação das peças individuais e execução do processo de soldagem. A figura 18 mostra o fluxograma estrutural da pesquisa desenvolvida neste trabalho.

Figura 18 – Fluxograma estrutural de pesquisa e análise.



Os corpos de prova foram fabricados de acordo com os requisitos necessários para executar os ensaios mecânicos de fadiga, observando as delimitações da máquina servo-hidráulica a ser utilizada em relação às dimensões e geometrias das amostras. Previamente aos ensaios de fadiga um grupo de corpos de prova foram submetidos a ensaios destrutivos de flexão em quatro pontos, caracterizando os limites de resistência das juntas. Os valores desses ensaios foram utilizados para definir os carregamentos aplicados nos ensaios de fadiga, separados em três níveis, obtendo as curvas de fadiga para ambas as amostras, com e sem marcação.

Após os ensaios de fadiga as amostras passaram por análises fractográficas, caracterização microestrutural e geométrica das juntas, análise de microdureza e, por fim, análise de EF, comparando os níveis de concentração de tensões atuantes em uma amostra contendo juntas de espaçamento equidistante e outra com espaçamento desigual.

4.1 VARIAÇÃO DIMENSIONAL DOS CORDÕES DE SOLDA

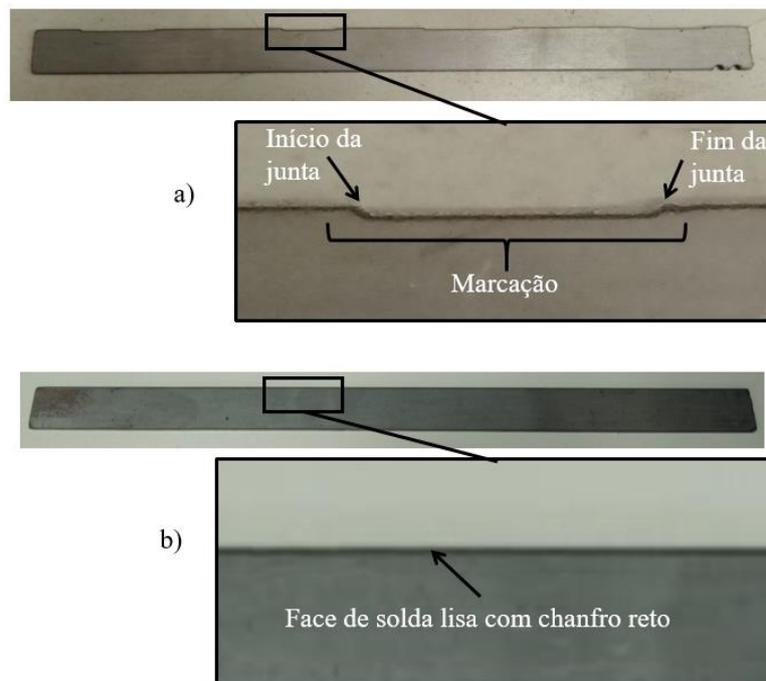
A verificação da variação dimensional dos cordões de solda foi realizada usando o projeto de experimentos 3^k pela análise estatística de dois fatores, $k = 2$, sendo eles o comprimento do cordão de solda – L_p e espaçamento entre os cordões – L_e , em três níveis para cada fator e com três réplicas, analisando a interação entre eles e o efeito de cada combinação na variação do comprimento do cordão de acordo com a matriz experimental. Ambos os parâmetros, L_p e L_e , foram avaliados de forma quantitativa com o objetivo de comparar os ganhos em relação à melhoria dimensional obtida com o uso das marcações na junta. O projeto de experimentos é mostrado na tabela 1.

Tabela 1 - Projeto de experimentos fatorial completo com dois fatores, três níveis e três réplicas.

Sequência do ensaio	L_p (mm)	L_e (mm)	Sequência do ensaio	L_p (mm)	L_e (mm)
1	30	30	15	40	70
2	50	30	16	50	70
3	30	50	17	50	70
4	40	70	18	30	50
5	50	50	19	40	30
6	30	70	20	30	30
7	40	50	21	40	30
8	50	50	22	30	70
9	50	70	23	30	50
10	50	30	24	30	70
11	40	30	25	40	50
12	40	70	26	30	30
13	50	30	27	50	50
14	40	50			

A figura 19 mostra os detalhes da junta nas peças para as avaliações estatísticas, sendo a figura 19a a representação da peça base contendo as marcações e a figura 19b a peça com face de solda lisa e chanfro reto, ambas sem bisel, representando o processo atual, sem marcação.

Figura 19 - Detalhe das faces de solda das amostras avaliadas a) com marcação e b) sem marcação.



Ambos os parâmetros avaliados, L_p e L_e , foram obtidos em amostras fabricadas pelas duas configurações de junta, com e sem marcação, através do processo MAG. Para as amostras fabricadas pelo processo atual, sem marcação, as soldas foram aplicadas de forma intermitente e diretamente na junta de topo com chanfro reto, sem o uso de ferramentas ou dispositivos auxiliares ao soldador para o posicionamento dos cordões. Para as amostras contendo as marcações a solda foi aplicada com o auxílio das próprias marcações nas juntas, obtidas durante o processo de corte laser dos componentes.

Os resultados foram processados pela análise de variância – ANOVA, e concluídos com uma análise pela metodologia de inferência estatística. Anteriormente aos procedimentos experimentais foram realizados ensaios para verificar o controle de variáveis e níveis relevantes para a análise, os quais foram definidos em testes preliminares de soldagem e obtendo os comprimentos de cordões de 30, 40 e 50 mm com espaçamentos de 30, 50 e 70 mm, como mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Níveis codificados e naturais para os fatores de projeto.

Fatores (variáveis independentes)	Notação	Unidade	Níveis codificados das variáveis independentes		
			Baixo (-1)	Central (0)	Alto (+1)
Comprimento	L_p	mm	30	40	50
Espaçamento	L_e	mm	30	50	70

As amostras foram fabricadas a partir de chapas planas de aço, laminadas a frio e também com aço microligado de alta resistência mecânica ASTM A1011 Gr 50 Classe 2, obtidas em tiras com largura, comprimento e espessura de 25, 400 e 3,17 mm, respectivamente, obedecendo as sequências de soldagem descritos na tabela 1.

Figura 20 – Exemplos de peças individuais de amostras para análise estatística da variação dimensional dos cordões. a) especificações da peça básica; b) especificações de uma peça com as marcações na face de solda; c) peça cortada com as marcações.

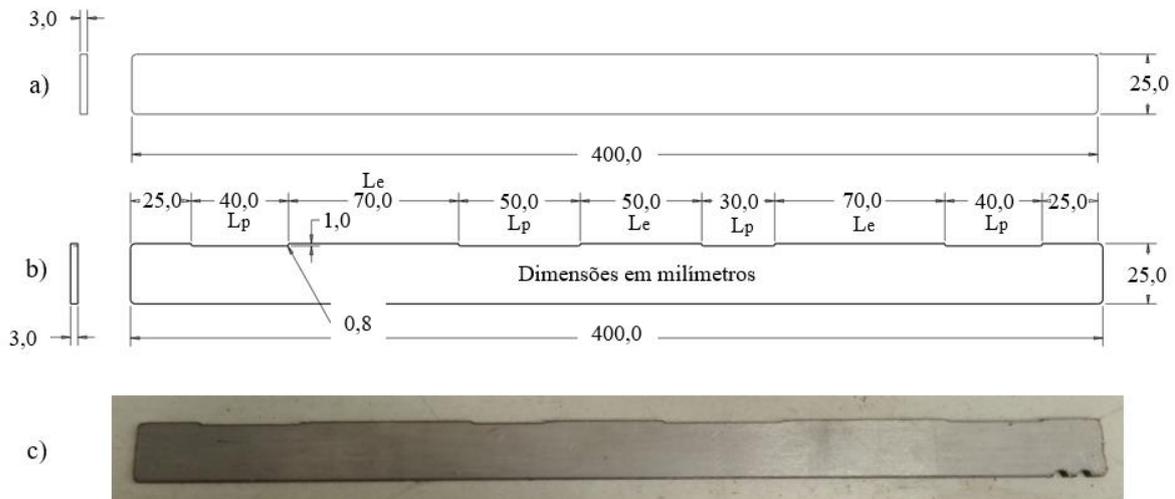


Tabela 3 - Parâmetros de soldagem para fabricação dos corpos de prova para a análise estatística e ensaios de fadiga.

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem	A	120
Tensão do arco elétrico	V	20,8
Velocidade de deslocamento da tocha	mm/s	4,5
Gás de proteção	-	Ar + 20%CO ₂
Fluxo de gás de proteção	l/min	20
Tipo do Arame	-	ER70S-6
Tamanho do arame (diâmetro)	mm	0,8
Ângulo de deslocamento da tocha	graus	60° (puxado)
Distância bico de contato-peça	mm	12
Cobre junta	-	Não
Posição de soldagem	-	1G
Tipo de junta	-	Junta de topo
Preparação da junta	-	Chanfro reto sem bisel
Abertura de raiz	mm	1,0

A figura 20 mostra a geometria das amostras antes do processo de soldagem. A figura 20a mostra as especificações utilizadas na peça básica, aplicada tanto para a junta fabricada pela técnica atual, sem marcação, quanto para a junta contendo as marcações. A figura 20b,

em combinação com 20a, é utilizada para fabricação das amostras com as marcações. A figura 20c mostra uma tira cortada com a aplicação das marcações. Para as amostras fabricadas sem as marcações são utilizadas duas peças da figura 20a.

Os parâmetros do processo de soldagem MAG utilizados na fabricação das amostras para análise estatística da variação dimensional dos cordões de solda são mostrados na tabela 3. Os cordões de solda foram medidos usando um paquímetro com resolução de 0,05 mm, avaliando o comprimento entre as duas extremidades visíveis do cordão, conforme mostrado na figura 21. O arame ER70S-6, aplicado nos processos de soldagem deste trabalho, possui as propriedades mecânicas e químicas mostradas na tabela 4, de acordo com as especificações da norma AWS A5.18/A5.18M (2005).

Tabela 4 – Propriedades mecânicas e composição química do arame de solda.

Propriedades Mecânicas - Mínimas									
Limite de Resistência à Tração (MPa)			Limite de Escoamento (MPa)			Alongamento (%)			
480			400			22			
Composição Química em Porcentagem de Peso (%)									
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0,06 - 0,15	1,40 - 1,85	0,80 - 1,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,50

Fonte: Adaptado de AWS A5.18/A5.18M (2005).

Figura 21 - Extensão verificada no cordão de solda.



4.2 DEFINIÇÕES GEOMÉTRICAS DAS MARCAÇÕES NAS JUNTAS

As marcações nas juntas soldadas são recortes existentes nas faces de solda dos componentes da junta obtidos durante a fabricação das peças por processo de corte, tendo como objetivo orientar o soldador sobre os locais corretos de aplicação dos cordões, além de melhorar

as condições geométricas da junta pelo ajuste do posicionamento relativo entre as peças. A marcação fica visível ao soldador mesmo com a presença da luminosidade do arco elétrico, pois é uma limitação física presente no material das peças, conforme exemplificado nas figuras 22 e 23.

As marcações são adicionadas durante a etapa de projeto do componente, sendo parte do grupo de características que definem os parâmetros de fabricação da peça e podem ser aplicadas em juntas do tipo topo, ângulo, canto, aresta e sobreposta. As condições de contorno definidas neste estudo para aplicação das marcações são:

- Chapas planas de aço;
- Corte das peças por laser, jato d'água ou qualquer outro processo que permita a obtenção das marcações sem alterações significativas no processo de corte;
- Cordões de solda intermitentes;
- Soldagem semiautomática.

As condições citadas são aplicadas de forma a não alterar as características básicas de operação dos processos de corte mais comuns, porém não estão limitadas a estas, ficando sob a responsabilidade do engenheiro optar por aplicar a marcação nos locais e sob as condições de fabricação que melhor se adaptem ao projeto do componente. Um exemplo pode ser dado com peças usinadas, onde o próprio processo de usinagem pode ser usado para obter a marcação na peça, entretanto essa operação pode tornar a fabricação mais complexa.

A figura 22 detalha os aspectos dimensionais da marcação aplicada nas amostras para os ensaios de fadiga executados nesse trabalho, onde sua a face de solda possui três marcações com comprimento de 30 mm e espaçamento de 20 mm entre elas. Esta mesma especificação pode ser aplicada diretamente em qualquer tipo de junta mencionado anteriormente, sem comprometer as características da união.

A abertura de raiz da junta, recomendada por normas (AWS D1.1/D1.1M, 2004; EN 1993-1-1, 1992) e o comprimento mínimo do cordão de solda (AWS D1.1/D1.1M, 2004; EN 1993-1-1, 1992), são definidos pela presença da marcação na junta. O raio de alívio interno presente nas extremidades da marcação é definido livremente, sendo sugerido como forma de suavizar a fusão da solda nesta região.

Em juntas sobrepostas e de aresta as marcações podem ter profundidades maiores em função da não existência de raiz na junta, sendo possível e recomendado adicionar recortes com

dimensões similares ao tamanho da perna do cordão de solda, embora esta definição esteja livre de restrições. Um exemplo é mostrado na figura 23.

Figura 22 – Detalhes dimensionais da marcação na junta.

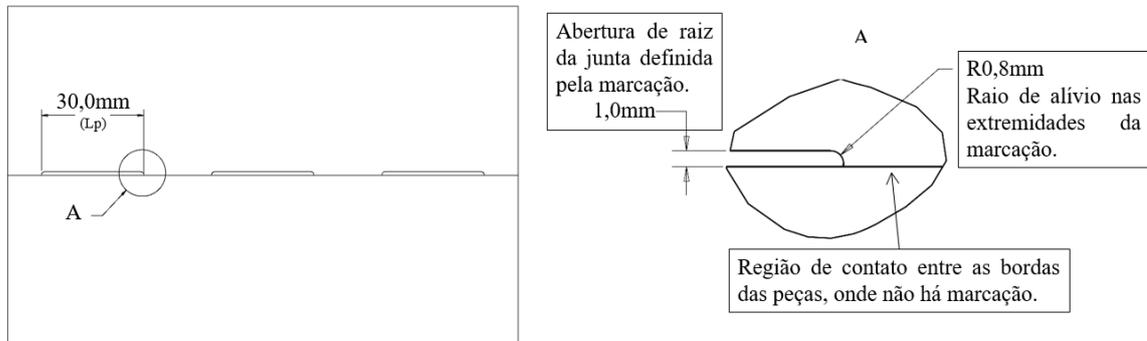
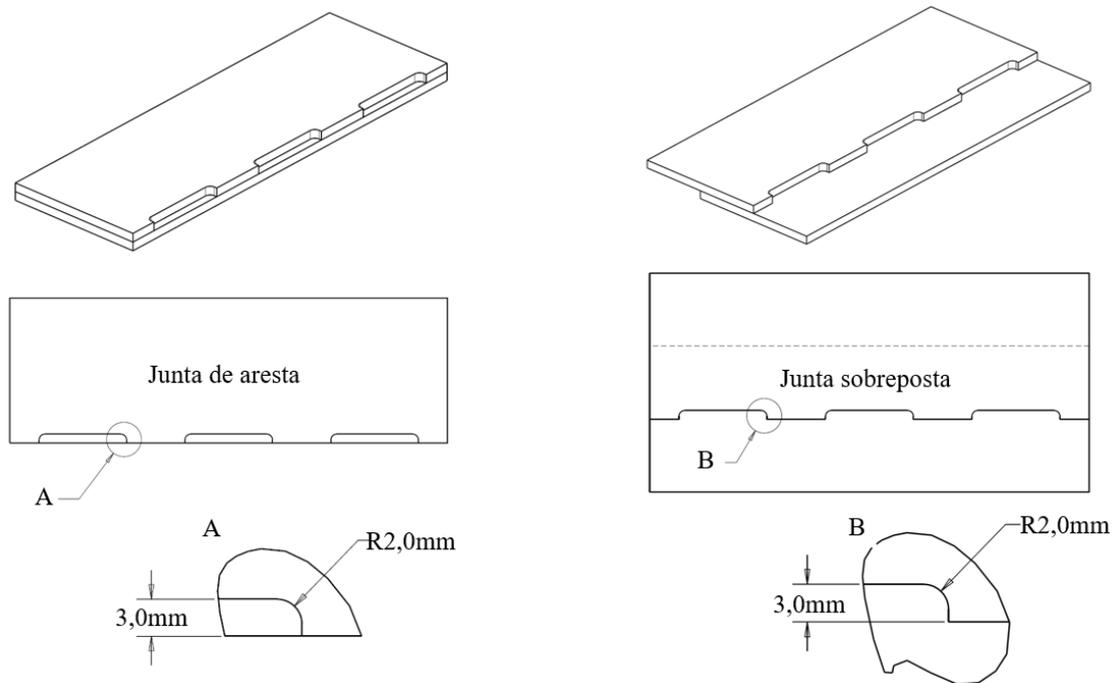


Figura 23 – Detalhes dimensionais da marcação para juntas de aresta e sobreposta.



Todas as especificações dimensionais mostradas nas figuras 22 e 23 são exemplos de recomendações para que as marcações sejam aplicadas sem a necessidade de alterações nos processos de fabricação das peças, porém cabe ao projetista definir estes valores de acordo com a necessidade de cada peça ou projeto.

4.3 ANÁLISE ECONÔMICA PARA A APLICAÇÃO DAS MARCAÇÕES NAS JUNTAS

A análise econômica levou em consideração os impactos da aplicação das marcações em projeto e seus efeitos nas etapas de desenvolvimento técnico, considerando o período de

projeto como uma etapa única⁷, passando pela obtenção das peças por processo de corte até sua finalização por soldagem, avaliando efeitos sobre os tempos de operação em cada etapa e os respectivos impactos no custo destas atividades.

Em relação ao desenvolvimento do projeto a avaliação foi feita sobre o tempo necessário para aplicar e especificar as marcações durante o desenvolvimento em CAD – do inglês *Computer Aided Design* – das peças.

A comparação foi realizada em 40 componentes, primeiramente desenvolvidos de acordo com as especificações atuais, sem as marcações, sendo que o tempo de desenvolvimento das peças foi cronometrado do início de seu esboço até sua finalização, disponibilizado em uma folha de desenho técnico 2D. Posteriormente, para cada posição das juntas no conjunto soldado, foram adicionadas as respectivas marcações na peça, sendo cronometrado o tempo necessário para adicionar essas características na modelagem 3D e posteriormente especificar no desenho técnico.

Para as etapas de fabricação foram avaliadas duas situações: a variação de tempo no processo de corte a laser das peças, fabricadas em chapas finas e planas de aço e a variação no tempo do processo de soldagem, onde as marcações atuam para especificar fisicamente os locais de execução das juntas.

Para a fabricação das peças por processo de corte foi avaliado o tempo de acréscimo para o corte laser dos mesmos componentes analisados na variação do tempo de projeto, comparando o tempo de processamento com e sem a presença das marcações na junta. A medição na diferença dos tempos é dada pelo aumento no perímetro de corte devido à presença da marcação.

Na avaliação do impacto que a presença da marcação tem sobre o tempo do processo de soldagem foi analisado um grupo de 34 conjuntos soldados, alguns derivados das peças avaliadas nas análises de tempos de projeto e corte laser e outros selecionados aleatoriamente para aumentar a amostragem, todos fabricados pelas técnicas atuais de soldagem, estratificando do processamento total o tempo gasto para a verificação e aplicação de marcas superficiais⁸, as

⁷ Etapa única refere-se a todos os processos envolvidos durante a elaboração e liberação de um desenho, envolvendo conceituação, modelagem 3D, detalhamento e revisão.

⁸Os métodos atuais de marcação dos cordões de solda envolvem a leitura das especificações de projeto, uso de trenas ou gabaritos e a posterior marcação dos limites de início e fim dos cordões com o uso de marcadores industriais ou giz, estando suscetíveis a falhas durante a soldagem devido à alta luminosidade gerada pelo arco elétrico, dificultando a visualização dessas limitações.

quais tem como finalidade orientar o soldador sobre o posicionamento dos cordões de solda pela técnica atual.

4.4 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE FADIGA

A fabricação dos corpos de prova para os ensaios de fadiga foi executada utilizando como metal de base o aço microligado de alta resistência mecânica ASTM A1011 Gr 50 Classe 2, largamente utilizado em componentes estruturais dos setores de fabricação de máquinas e equipamentos agrícolas e rodoviários. As propriedades mecânicas e químicas são mostradas nas tabelas 5 e 6, respectivamente, obtidas da norma ASTM A1011/A1011M (2008).

Tabela 5 - Composição química do metal de base. Valores percentuais máximos.

C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Cb	Ti
0,15	1,35	-	0,04	0,04	0,20	0,20	0,15	0,06	0,005	0,005	0,005

Fonte: Adaptado de ASTM A1011/A1011M (2008).

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do metal de base.

Tensão de escoamento MPa	Tensão máxima MPa	Alongamento mínimo % (50 mm)
340 (min)	450 (min)	22

Fonte: Adaptado de ASTM A1011/A1011M (2008).

As peças foram cortadas pelo processo laser por uma máquina de corte marca Cincinnati, modelo CL-7A, e soldadas pelo processo MAG convencional usando uma fonte de potência ESAB, modelo LAI 400. A aplicação dos cordões de solda, tanto no formato atual do processo quanto com o uso das marcações, seguiu a utilização de parâmetros e procedimentos listados na tabela 3.

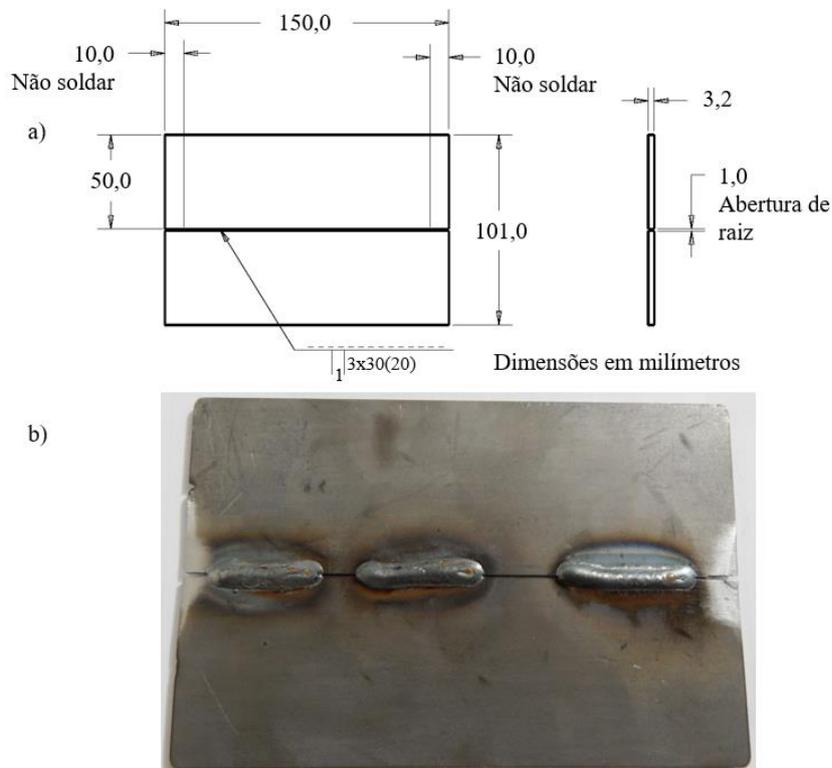
Foram fabricados 12 corpos de prova com a solda aplicada pelo método atual do processo de soldagem conforme mostrado na figura 24, com faces de solda lisas e chanfro reto sem bisel, e 12 com a utilização das marcações na face de soldagem conforme mostrado na figura 25. Ambas as amostras foram obtidas através da união de duas placas com largura e comprimento de 50,0 mm e 150,0 mm, respectivamente, mantendo uma abertura de raiz de 1 mm.

Para as amostras sem as marcações, a abertura de raiz foi definida com o uso de um espaçador de 1 mm de espessura inserido entre as placas durante o ponteamto das peças,

sendo removido para a posterior soldagem final. Para as amostras com as marcações a abertura de raiz já é definida pela presença da marcação, sendo ajustada através do simples contato entre as duas bordas das peças a serem unidas por soldagem, conforme detalhado na figura 22.

As placas soldadas possuem espessura de 3,17 mm, sendo unidas com três cordões de solda em junta de topo com comprimento de 30,0 mm, chanfro reto sem bisel e espaçamento entre cordões de 20,0 mm. As extremidades dos corpos de prova não receberam solda na região de 10,0 mm da borda lateral, conforme mostrado nas figuras 24 e 25.

Figura 24 – a) Desenho do corpo de prova sem marcação na junta para os ensaios de fadiga e b) corpo de prova soldado.

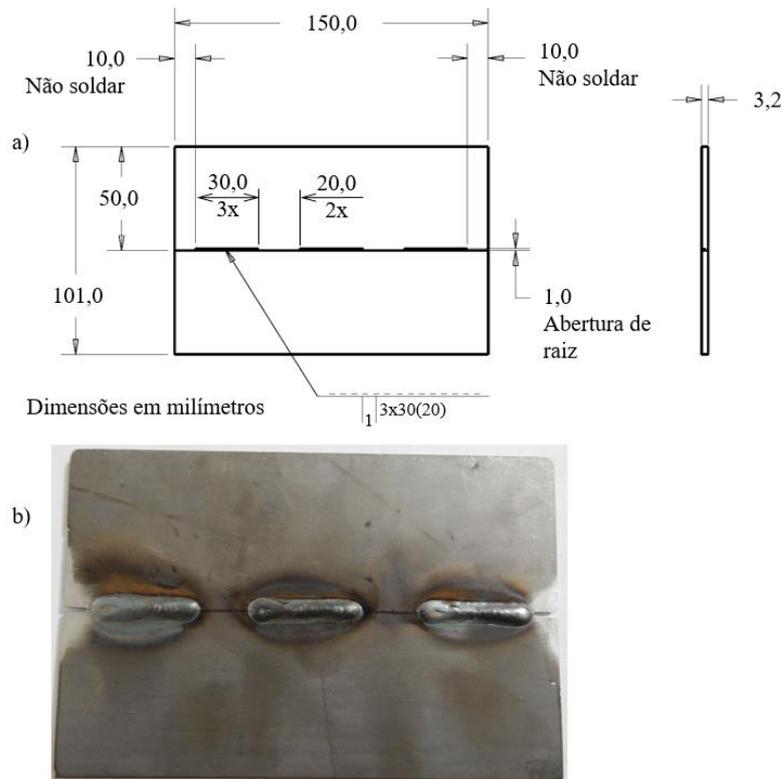


O corpo de prova da figura 24 foi definido para representar um componente soldado com as características dos processos de soldagem atuais, contendo faces de solda lisas e com abertura de raiz uniforme ao longo da borda das peças.

As dimensões dos corpos de prova, tanto sem e com as marcações, foram definidas em função da necessidade de aplicar cordões de solda intermitentes, bem como permitir a realização de ensaios de fadiga que pudessem submeter as juntas a carregamentos cíclicos de tração e com fácil acoplamento a uma máquina servo-hidráulica. A presença de três cordões foi definida para melhorar a amostragem e obtenção de valores confiáveis em

relação ao efeito das variações no processo de soldagem, uma vez que um corpo de prova simples, com apenas um cordão, limitaria o efeito da existência de soldas intermitentes nas amostras.

Figura 25 – a) Desenho do corpo de prova com marcação na junta para os ensaios de fadiga e b) corpo de prova soldado.



As amostras contendo as marcações nas juntas possuem as mesmas dimensões externas das amostras sem as marcações, entretanto possuem as respectivas delimitações físicas para indicar o posicionamento dos cordões de solda, orientando o soldador sobre as posições de início e fim da junta, conforme mostrado na figura 25.

Na figura 25 pode ser observado o contato existente entre as bordas do metal de base onde não haverá deposição de solda, assim como a presença da abertura de raiz onde há marcação, garantindo a uniformidade tanto do posicionamento das peças quanto da abertura de raiz da junta através do simples contato entre as bordas das peças a serem soldadas.

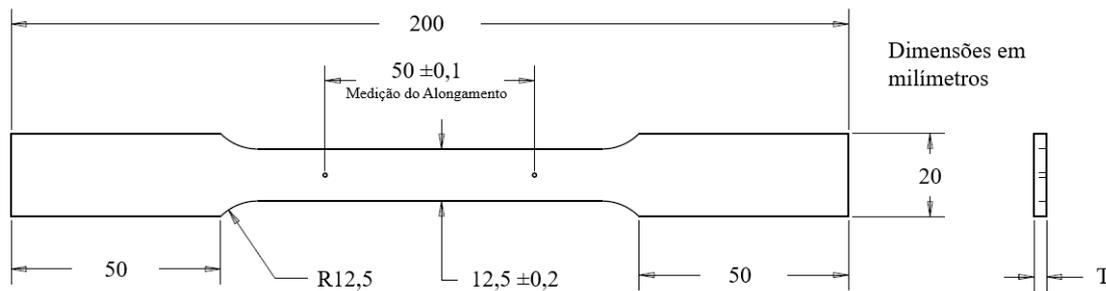
4.5 ENSAIOS PARA DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS BÁSICAS DAS JUNTAS

A primeira etapa dos ensaios consistiu em caracterizar as propriedades mecânicas básicas dos corpos de prova para aplicação dos carregamentos nos ensaios de fadiga, obtendo

o limite de resistência do material sob cargas de flexão em 4 pontos, conforme mostrado na figura 27.

O ensaio de tração é normalmente utilizado para definir as propriedades mecânicas do material de base, incluindo a UTS, sendo comumente ensaiado um corpo de prova padronizado, conforme mostrado na figura 26.

Figura 26 – Corpo de prova padronizado para a definição das propriedades mecânicas dos metais.



Fonte: Adaptado de ASTM E8/E8M (2015).

Para este estudo o corpo de prova padronizado pela norma ASTM E8/E8M não pode ser aplicado em função da presença de cordões de solda intermitentes, pois se a solda é aplicada em uma amostra conforme as recomendações da norma a representatividade da intermitência entre as juntas seria perdida. Os corpos de prova foram, portanto, definidos para possibilitar a aplicação de três cordões de solda, aumentando a representatividade do início e fim da junta e serem avaliados em relação à influência da variação dimensional entre os elementos, conforme ilustrado nas figuras 24 e 25.

Outra característica importante é em relação à forma de aplicação da carga pretendida para os ensaios de fadiga deste trabalho, os quais são solicitados em flexão, e não em tração como normalmente é feito. Esta flexão faz com que somente o reforço do cordão seja submetido a esforços de tração, conforme mostrado na figura 27.

As cargas para os ensaios de fadiga foram calculadas com base na média simples das tensões obtidas nos ensaios de flexão em quatro pontos através da equação 1, onde o valor da carga inicial para os ensaios de fadiga foi considerado em 90% da resistência máxima – UTS (*Ultimate Tensile Strength*) - sob flexão. As análises tiveram como escopo a aplicação de cargas para fadiga de baixo ciclo, com os carregamentos indo de 0 à tensão máxima ($R = 0$) e constantes ao longo do tempo.

A avaliação da fadiga de baixo ciclo foi definida em função da presença de cordões de solda nos corpos de prova, visando a caracterização do efeito de defeitos grosseiros no comportamento mecânico das amostras, comparando quantitativamente os resultados entre os dois métodos de soldagem, com e sem marcação na junta.

A equação 1 define a carga máxima para iniciar os ensaios de fadiga, onde:

$$P = \frac{\sigma \times 4W_x}{L - L_o} \quad (1)$$

P = carga de prova;

σ = tensão atuante;

W_x = módulo de resistência;

L = distância entre apoios (ver figura 27);

L_o = distância entre cutelos (ver figura 27).

4.6 ENSAIOS DE FADIGA

Os ensaios de fadiga foram realizados em 3 níveis de cargas, com razão de carregamento de 0,1, sendo que para cada nível foram avaliadas 3 amostras de cada configuração de junta, com e sem a marcação, seguindo as recomendações da norma ISO/TR 14345 (2012). No total foram avaliados 18 corpos de prova, 9 para cada configuração de junta (ISO-12107, 2003).

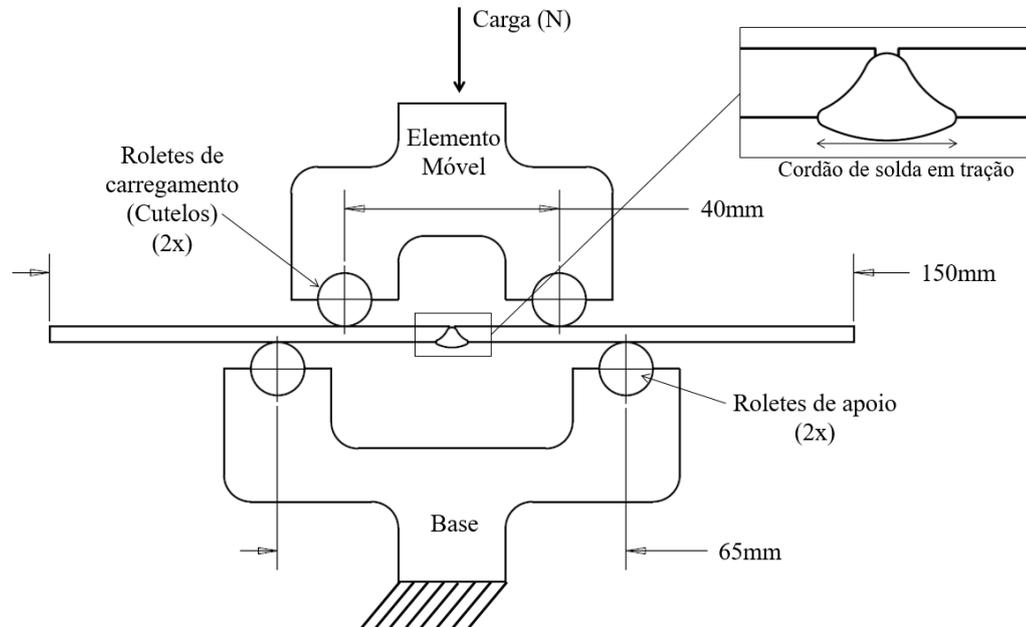
O equipamento utilizado para os ensaios de fadiga foi uma máquina servo-hidráulica marca MTS, modelo 810, com capacidade para 100 kN. A frequência dos ensaios foi de 16 Hz.

Os corpos de prova foram designados para avaliar a fadiga por flexão em 4 pontos, sendo este o modo de carregamento esperado para o tipo de solda a ser avaliada. A figura 27 mostra a esquematização do ensaio, ilustrando a configuração do dispositivo para aplicação da carga e o posicionamento dos cordões de solda em relação à forma como serão solicitados durante os ensaios.

Os cordões de solda foram posicionados com a sua face na parte inferior do dispositivo de aplicação de carga com o objetivo de submeter a região do reforço do cordão a esforços de tração. O elemento móvel de aplicação da força está posicionado no lado oposto do

reforço, com as cargas limitadas para os ensaios ocorrerem dentro do regime de carregamento linear elástico.

Figura 27 - Dimensões e posicionamento dos elementos utilizados nos ensaios de fadiga.



A tabela 7 mostra o planejamento dos ensaios de fadiga descrevendo a sequência dos testes e as respectivas cargas de prova. A sequência dos testes foi definida de forma que não houvesse repetição sequencial de carregamentos para um mesmo tipo de corpo de prova.

Tabela 7 - Plano de testes para os ensaios de fadiga.

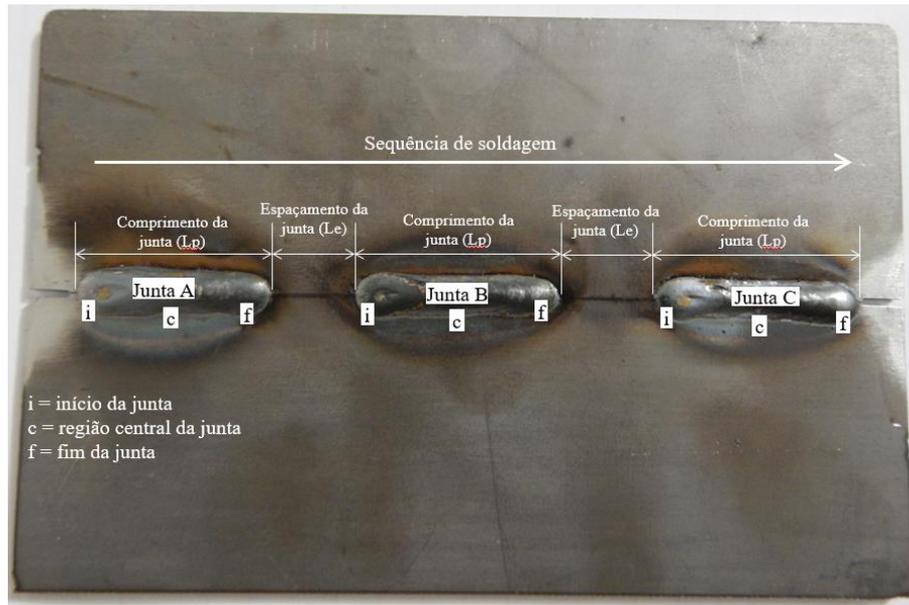
Corpos de Prova Sem Marcação		Corpos de Prova Com Marcação	
Sequência do teste	Carga (N)	Sequência do teste	Carga (N)
1°	90% UTS	4°	80% UTS
2°	80% UTS	5°	70% UTS
3°	70% UTS	6°	90% UTS
10°	70% UTS	7°	80% UTS
11°	90% UTS	8°	90% UTS
12°	80% UTS	9°	70% UTS
13°	70% UTS	16°	90% UTS
14°	80% UTS	17°	70% UTS
15°	90% UTS	18°	80% UTS

4.7 ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

Posteriormente aos ensaios de fadiga as amostras tiveram a área da fratura avaliada com o objetivo de caracterizar as regiões das falhas e identificar possíveis defeitos

macroscópicos, conforme descritos pela norma EN ISO 5817 (2007), que pudessem ser associados à inclinação das curvas de fadiga. As imagens foram obtidas através de uma máquina fotográfica marca Nikon, modelo L820. A fractografia foi realizada em duas amostras de junta para cada configuração, com e sem marcação, representando de forma geral as falhas ocorridas pelos ensaios de fadiga.

Figura 28 – Posicionamento e descrição das informações avaliadas na análise fractográfica das amostras ensaiadas por fadiga.



Uma análise geral de falhas foi realizada para caracterizar todas as regiões em que ocorreram falhas ao longo de todas as juntas ensaiadas por fadiga, identificando em cada amostra o posicionamento das juntas e separando-as em três regiões: início da junta (i), região central da junta (c) e fim da junta (f). Foram verificados também o comprimento L_p e espaçamento L_e entre as juntas conforme mostrado na figura 28.

4.8 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

As análises microestruturais foram realizadas com a finalidade de identificar possíveis defeitos ou características microscópicas do processo de soldagem, descritos pela EN ISO 5817 (2007) e que possam ter relação com as curvas de fadiga. Para esta avaliação foram analisadas as seções transversais de dois cordões de solda, um com marcação e outro sem. A localização da seção transversal analisada é mostrada na figura 29 pela linha X' do cordão B.

As amostras para a caracterização microestrutural foram embutidas e lixadas com lixas d'água de granulometrias sequenciais de 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200, usando água

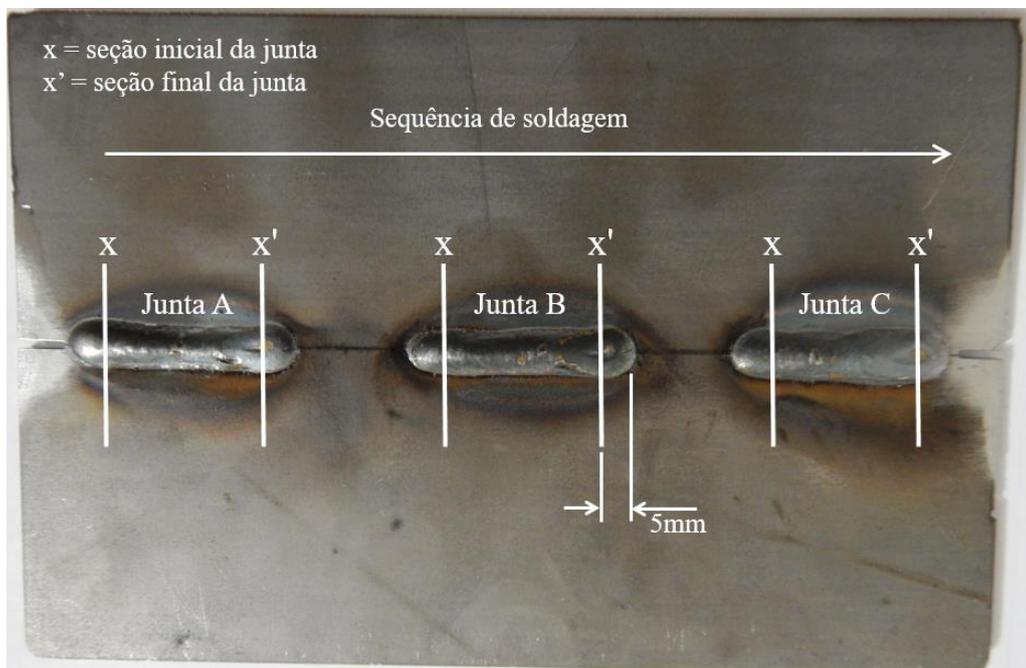
como fluido lubrificante. As amostras foram posteriormente polidas em uma politriz marca Struers, modelo DP-10, utilizando pasta diamantada, marca Roder, na sequência de 4, 1 e 0,5 micra e posteriormente atacadas com Nital 2% por cerca de 3 segundos. As micrografias foram obtidas utilizando um microscópio marca Zeiss, modelo Axio Imager 2, com câmera acoplada para aquisição de imagens.

4.9 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORDÕES DE SOLDA

Para a caracterização geométrica das juntas foram avaliadas a altura do reforço, penetração, comprimento e espaçamento dos cordões de solda, abertura de raiz da junta, diluição e área total do cordão.

As características de comprimento e espaçamento médio entre os cordões foram verificadas diretamente nas amostras ensaiadas por fadiga, uma vez que são dimensões não afetadas pela deformação ou fratura das amostras durante os ensaios. Os valores foram obtidos através da análise dos 18 corpos de prova ensaiados para ambas as configurações de junta, com e sem as marcações, representando 100% das amostras ensaiadas em fadiga.

Figura 29 - Posicionamento das seções transversais nos cordões de solda para caracterização da diluição da junta.



As características de altura do reforço, penetração, abertura de raiz da junta e diluição foram verificadas em amostras íntegras, não ensaiadas mecanicamente, analisando três cordões de solda obtidos de uma amostra para cada configuração, com e sem as marcações, observando os locais de seccionamento x e x' mostrados na figura 29. As medições foram

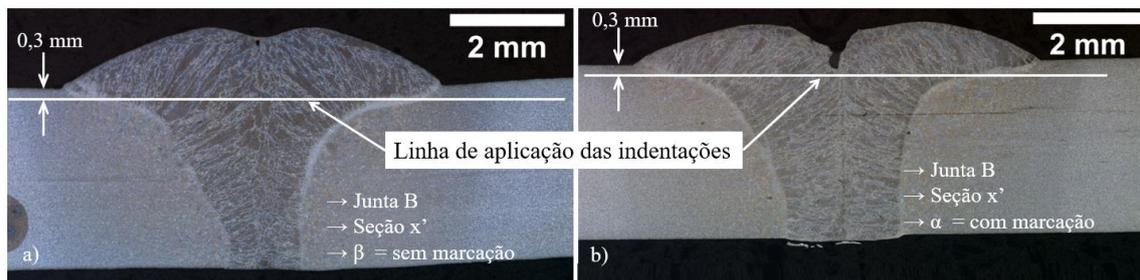
realizadas na seção transversal de três cordões de solda e avaliando pontos distantes a 5 mm das extremidades das juntas. As medições foram realizadas com o auxílio do software *ImageJ* (RASBAND, 2020).

4.10 MICRODUREZA

Para a caracterização do perfil de microdureza foi retirada uma amostra de cada tipo de corpo de prova, com e sem marcação, obtidas pelo corte transversal da porção final do cordão de solda central, representado pela seção x' no cordão B da figura 29.

O equipamento utilizado para os ensaios de microdureza foi um Verificador de Dureza Vickers/Knoop, modelo Tukon 2100B, marca Instron®. A carga de prova foi de 0,5 kgf com espaçamento de 0,3 mm entre pontos, sendo que o perfil foi aplicado a 0,3 mm de distância da superfície da amostra, conforme mostrado na figura 30, visando a abrangência da maior área possível da zona fundida.

Figura 30 - Posicionamento do perfil de microdureza na seção transversal das amostras: a) sem marcação; b) com marcação.



4.11 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

As análises por Elementos Finitos - EF tiveram como objetivo identificar mudanças na concentração de tensões ao longo do cordão de solda em função dos efeitos dimensionais impostos pela presença das marcações na junta, comparando seu comportamento com as tensões presentes nos cordões aplicados pela técnica atual, sem marcação.

Foram realizadas simulações comparativas avaliando de forma quantitativa dois corpos de prova, representando geometricamente as amostras ensaiadas por fadiga. Um dos modelos possui comprimentos e espaçamentos uniformes dos cordões de solda e outro contém variações dimensionais no posicionamento deles, alterando, conseqüentemente, o espaçamento das juntas.

Os parâmetros relacionados à geometria da seção transversal dos cordões de solda permaneceram iguais para ambas as amostras, desconsiderando o efeito da abertura de raiz resultante da marcação sobre as propriedades da junta, levando em consideração somente a variação dimensional.

Os corpos de prova foram modelados de acordo com as especificações de projeto, considerando os cordões com comprimento de 30 mm. Em uma das amostras o espaçamento foi mantido de forma equidistante, com extensão de 20 mm conforme mostrado na figura 25a. Na outra amostra os espaçamentos foram alterados para 10 e 30mm, conforme mostrado na figura 56. Esta variação de 10 mm no espaçamento entre os cordões representa, aproximadamente, a média⁹ das variações do comprimento dos cordões para as amostras sem as marcações na junta, obtidas na análise estatística.

Tabela 8 - Medições dos espaçamentos dos cordões de solda das amostras ensaiadas por fadiga.

Corpo de prova com marcação (α)		Corpo de prova sem marcação (β)	
Amostra	Valor (mm)	Amostra	Valor (mm)
α -01	16	β -03	9
	16		18
α -02	16	β -04	10
	16		17
α -03	14	β -05	11
	16		17
α -04	16	β -06	9
	15		21
α -05	17	β -07	5
	15		18
α -06	16	β -09	16
	12		16
α -07	16	β -10	9
	17		16
α -08	18	β -11	11
	16		16
α -09	15	β -12	11
	15		16
Média	15,7		13,7
Desvio padrão	1,28		4,31

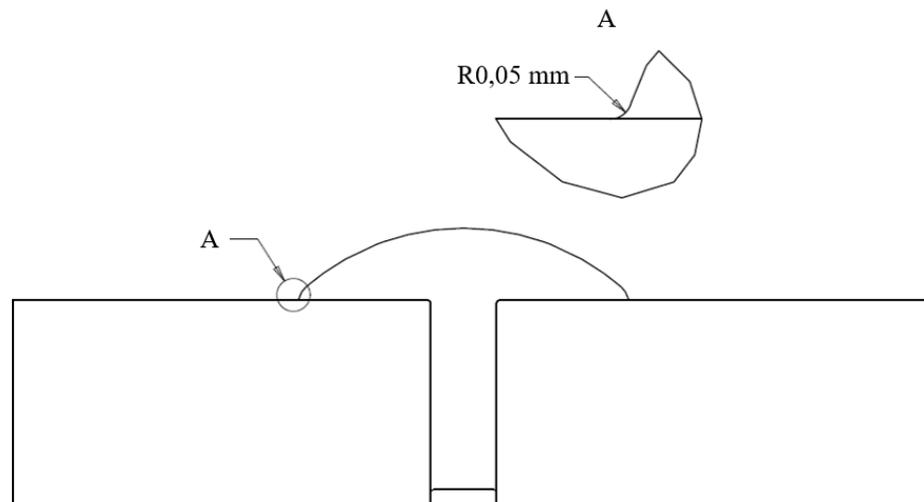
⁹Neste caso o valor definido para a variação nos espaçamentos dos cordões foi arredondado para 10 mm, pois a análise é apenas comparativa.

Os valores utilizados como referência para definir a variabilidade nos espaçamentos dos cordões de solda considerados nesta análise por EF são mostrados na tabela 8, verificados em todas as amostras ensaiadas em fadiga. As análises por EF foram executadas com o software *Creo Simulate*, da PTC, considerando elementos triangulares com tamanho máximo de 1 mm para a composição da malha.

A modelagem 3D das amostras reproduziu a geometria dos cordões de solda de forma teórica em relação ao elemento real, sendo que o modelo foi submetido à esforços e restrições equivalentes aos ensaios de fadiga reais e considerando os mesmos pontos de apoio e aplicação das cargas, conforme mostrado na figura 27. O carregamento foi aplicado de forma monotônica, com intensidade equivalente aos 70% da UTS, mantendo as tensões dentro da zona elástica da amostra e o cordão de solda sob esforços de tração.

Entre as intersecções do metal fundido e metal base foram adicionados raios de concordância de 0,05 mm, conforme mostrado na figura 31, permitindo que haja coerência entre as tensões atuantes nesta região, facilitando sua análise em relação à transição de forças entre o cordão de solda e o metal de base.

Figura 31 - Detalhe da região de intersecção do cordão de solda com o metal de base da junta soldada.



Como base de referência para as tensões limites de fadiga foi utilizada a norma IIW-1823 (2008), a qual determina que, para juntas soldadas transversalmente com um único passe e sem cobre-junta, similares às amostras fabricadas para este trabalho, a tensão limite de fadiga é de 36 MPa, porém vale destacar que essa tensão é determinada para uma vida

em fadiga de 10^6 ciclos. Desta forma, à medida que o número de ciclos é diminuído as tensões limites tendem a ser consideravelmente mais elevadas¹⁰.

As tensões avaliadas foram as máximas principais e a razão de carregamento foi de $R = 0$, excluindo as regiões de singularidade próximas ao pé do cordão de solda.

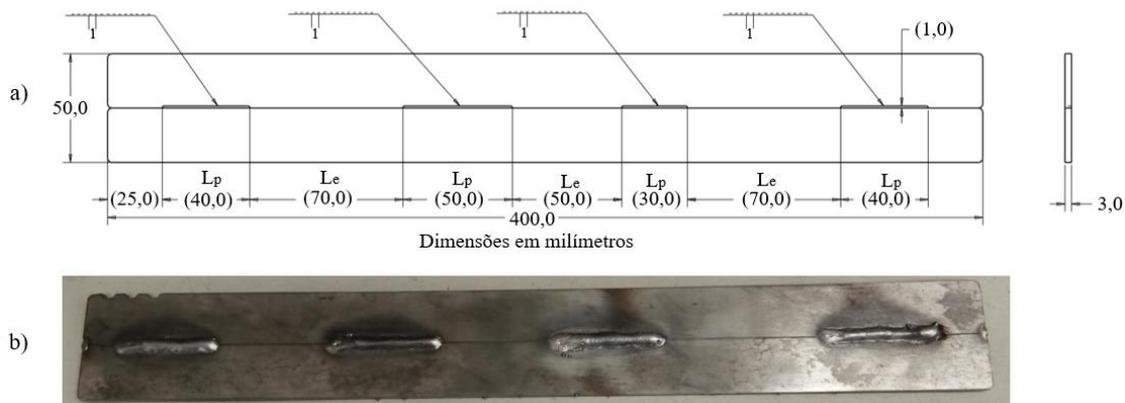
¹⁰De acordo com DOWNLING (2013) o limiar de ciclos que divide as fadigas de baixo e alto ciclo está entre 1000 e 10000 ciclos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 VARIAÇÃO DIMENSIONAL DOS CORDÕES DE SOLDA

As amostras finais, após soldadas, tiveram largura, comprimento e espessura de 50, 400 e 3,17 mm, respectivamente, como mostrado na figura 32, sendo os resultados da coleta de dados para a análise estatística são mostrados na tabela 9.

Figura 32 – Exemplo de amostra para as análise dimensional da junta com as marcações. 31a: especificações para processo de soldagem. 31b: amostra após soldagem.



5.1.1 Análise Estatística

A partir dos resultados das medições dos cordões de solda definidos pelo projeto de experimentos da tabela 1, aplicando a metodologia de análise ANOVA, foram obtidos os resultados dimensionais mostrados na tabela 9 em relação à técnica atual de solda e à proposta de utilização das marcações nas juntas.

O objetivo desta análise é identificar a significância dos fatores avaliados em relação às variações nas dimensões L_p e L_e dos cordões de solda com base em seus respectivos resultados L_{pm} – comprimento do cordão de solda aplicado com a marcação – e L_{psm} – comprimento do cordão de solda aplicado sem a marcação, considerando que as juntas soldadas contendo as marcações ofereceram ao soldador um recurso novo ao processo de soldagem, possibilitando a obtenção de uma junta com características dimensionais melhoradas.

Tabela 9 – Respostas para o comprimento e espaçamento do cordão de solda.

Sequência experimental	L_p (mm)	L_e (mm)	L_{pm} (mm)	L_{psm} (mm)
1	30	30	36	29
2	50	30	54	42
3	30	50	35	24
4	40	70	43	36
5	50	50	54	46
6	30	70	34	25
7	40	50	45	31
8	50	50	52	46
9	50	70	52	46
10	50	30	56	36
11	40	30	46	32
12	40	70	40	38
13	50	30	46	42
14	40	50	44	39
15	40	70	41	34
16	50	70	51	45
17	50	70	43	46
18	30	50	37	24
19	40	30	40	36
20	30	30	34	27
21	40	30	44	36
22	30	70	37	31
23	30	50	38	29
24	30	70	37	26
25	40	50	45	34
26	30	30	36	29
27	50	50	51	45

5.1.2 Nova Técnica de Soldagem: Junta Com Chanfro Reto, Faces Lisas e Uso das Marcações

A tabela 10 mostra os resultados da análise ANOVA para a variável L_{pm} , onde pode ser observado que apenas o fator L_p é significativo¹¹ para o controle de L_{pm} , atuando de forma independente em relação a L_e , o qual não tem influência sobre as respostas avaliadas, o mesmo ocorrendo com a combinação $L_p \times L_e$.

A significância isolada de L_p indica a efetividade das marcações sobre o controle dimensional dos cordões de solda, uma vez que tanto o comprimento quanto o espaçamento

¹¹Neste caso considera-se um fator significativo quando atinge 5%.

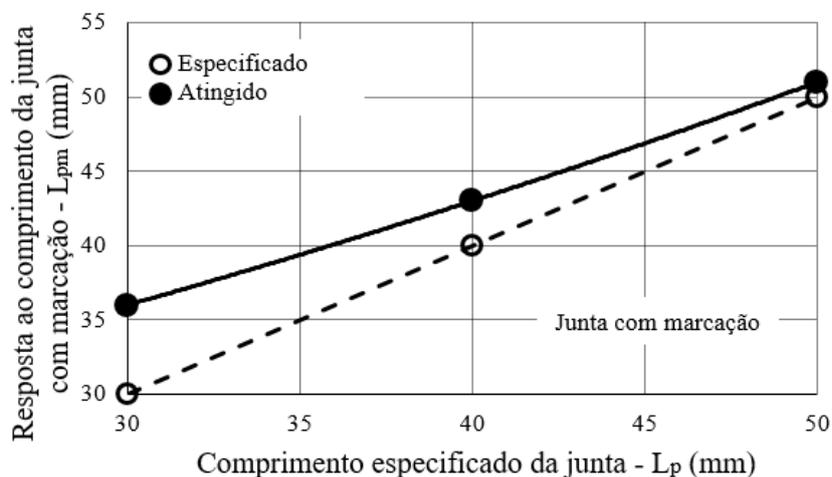
não sofrem influência um do outro. A única influência no dimensional dos cordões ocorre em relação ao seu próprio comprimento, sendo afetado diretamente pelo valor especificado em projeto.

Tabela 10 - ANOVA para L_{pm} em função de L_p e L_e (com marcação).

Referência	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Valor F	Valor p	Significância	Contribuição %
L_p (mm)	1013,41	2	506,70	62,19	0,00	<u>significante</u>	84,1%
L_e (mm)	29,85	2	14,93	1,83	0,19	não significante	2,5%
L_p (mm) L_e (mm)	14,37	4	3,59	0,44	0,78	não significante	1,2%
Erro	146,67	18	8,15				
Total SS	1204,3	26					87,8%

As figuras 33, 34 e 35 mostram os resultados dimensionais da tabela 9 para as amostras com marcação, comparando a interação entre cada combinação: L_{pm} x L_p , L_{pm} x L_e , L_{pm} x L_p x L_e , respectivamente. A figura 33 representa o posicionamento de L_{pm} de acordo com o valor especificado L_p ¹², expondo a influência da marcação na diminuição das variações dimensionais das juntas em relação às especificações de projeto.

Figura 33 - Efeitos da combinação L_{pm} x L_p sobre as variações dimensionais da junta com marcação.



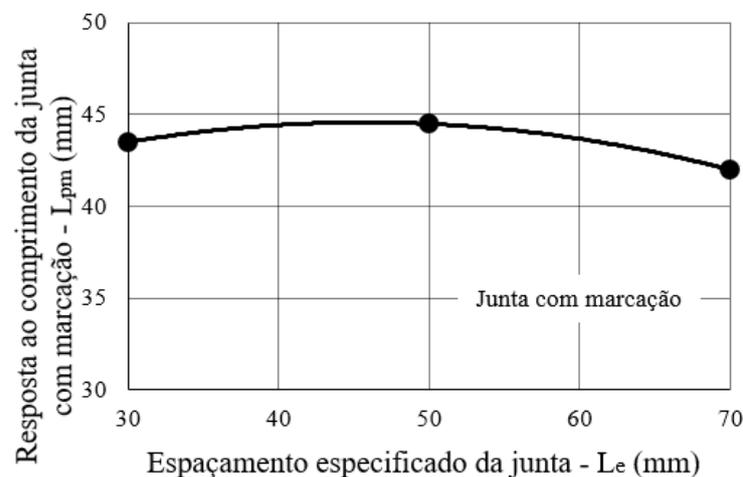
Pode ser observado que em todos os pontos verificados o parâmetro L_{pm} permaneceu acima dos valores especificados para L_p , variando proporcionalmente ao aumento de L_p , ou seja, quanto maior for o comprimento do cordão de solda maior é sua precisão dimensional,

¹²Neste caso os valores atribuídos a L_p e L_e equivalem a valores do comprimento e espaçamento de solda especificados em projeto.

mantendo valores que não ultrapassam 20% para $L_p = 30$ mm, 7,5% para $L_p = 40$ mm e 2% para $L_p = 50$ mm.

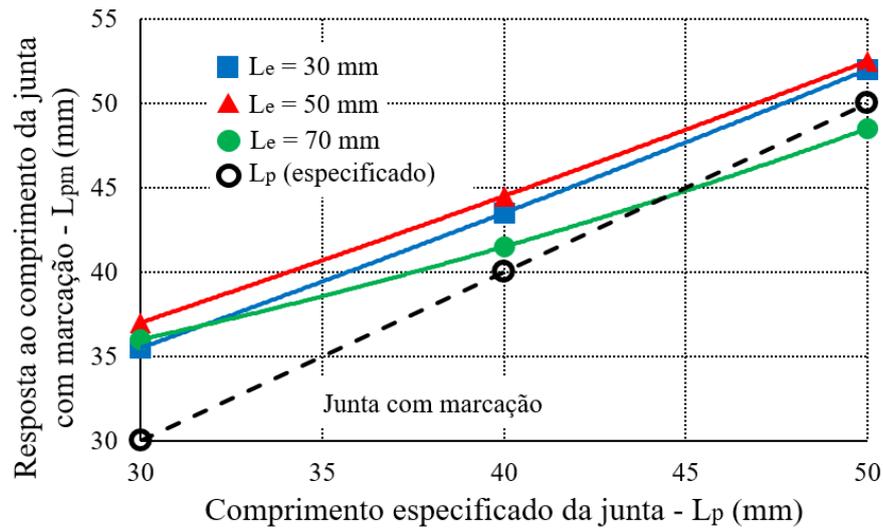
A figura 34 mostra a variação de valores médios de L_{pm} em função de L_e , onde pode ser observado que L_{pm} tem uma tendência em manter-se dimensionalmente constante à medida que L_e aumenta, mostrando uma relação direta entre L_p e L_{pm} , sem a influência de elementos vizinhos na variação do comprimento do cordão. É notado um leve decréscimo de L_{pm} à medida que L_e aumenta, reforçando as observações da figura 33 em relação ao aumento da precisão dimensional de L_{pm} à medida que L_p aumenta, pois L_e acaba sendo uma consequência de L_p .

Figura 34 - Efeitos da combinação L_{pm} x L_e para amostras com marcação.



A figura 35 mostra, complementarmente às figuras 33 e 34, a variação de L_{pm} de acordo sua referência L_p em relação à L_e . É observado que L_{pm} segue uma variação proporcionalmente constante com L_p , independente L_e , reforçando a influência de L_p sobre a significância do valor p mostrado na tabela 10.

Pode ser observado pelas figuras 33, 34 e 35 que as respostas de L_{pm} para cada nível avaliado mostram uma variação dimensional estável, tendendo levemente a diminuir à medida que os valores de L_p aumentam, sendo pouco afetadas pelo fator L_e . Neste caso as respostas de L_{pm} , na maioria das situações, ficam acima do valor especificado, confirmando a significância de L_p como único fator responsável pela variação nos valores do comprimento do cordão de solda. Os valores de L_{pm} não são afetados pela variação dimensional de L_e devido à presença das marcações na junta, pois essas limitações garantem, para início e fim dos cordões, que o comprimento fique sempre dentro das tolerâncias dos valores especificados em projeto – L_p .

Figura 35 - Efeitos da combinação $L_{pm} \times L_p \times L_e$ para amostras com marcação.

5.1.3 Técnica de Soldagem Atual: Junta Com Chanfro Reto, Faces Lisas e Sem Marcação

A tabela 11 mostra os resultados da análise ANOVA para L_{psm} .

Tabela 11 - ANOVA para L_{psm} em função de L_p e L_e (sem marcação).

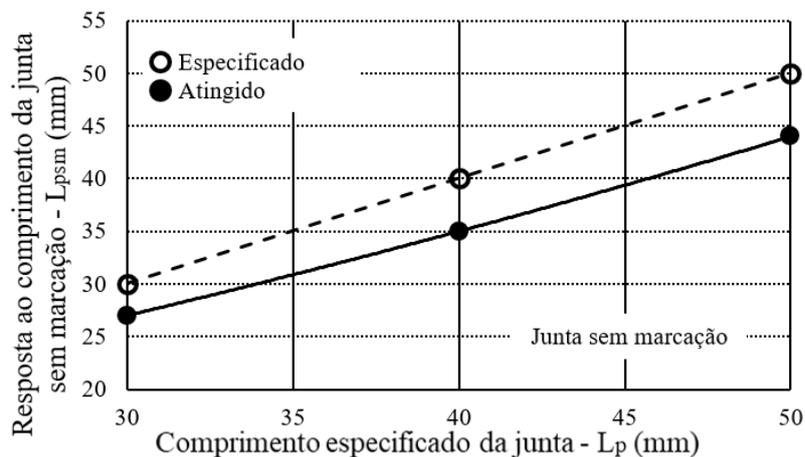
Referência	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Valor- F	Valor p	Significância	Contribuição %
L_p (mm)	1242,24	2	621,12	97,36	0,00	significante	86,3%
L_e (mm)	19,02	2	9,51	1,49	0,25	não significativa	1,3%
L_p (mm) L_e (mm)	63,48	4	15,87	2,49	0,08	não significativa	4,4%
Error	114,83	18	6,38				
Total SS	1439,57	26					92,0%

Pode ser observado que, para as soldas sem as marcações, o fator L_p também é significativo para o controle de L_{psm} , atuando de forma independente em relação a L_e . Entretanto L_e , apesar de estatisticamente não ter influência sobre as respostas de L_{psm} , está consideravelmente próximo da região de significância, contribuindo 4,4% para a variação de L_{psm} . Esta condição leva a concluir que sua representação estatística como não significativa pode ser questionada, sendo que nesta análise ele passará a ser considerado como significativo visto as respostas obtidas para as interações entre $L_{psm} \times L_p \times L_e$ e à presença de fatores que o situaram próximo da região limite de considerá-lo significativo, como a falta de referências para o correto posicionamento dos cordões de solda no processo atual.

A significância de L_p e L_e indica a influência de fatores externos relacionados com o as variações das dimensões não somente de L_p , mas também de L_e . Neste caso, como não há a presença de limitações físicas para definir o posicionamento de início e fim dos cordões de solda, sua posição é definida relativamente às geometrias próximas, sejam elas os cordões de solda vizinhos ou elementos da própria junta soldada, cabendo ao soldador definir de forma inexata o posicionamento do bocal de solda para o início e fim da operação.

As figuras 36, 37 e 38 mostram as comparações entre $L_{psm} \times L_p$, $L_{psm} \times L_e$, $L_{psm} \times L_p \times L_e$, respectivamente. A figura 36 representa o posicionamento de L_{psm} de acordo com o valor especificado L_p , mostrando a falta de precisão dimensional no comprimento das juntas conferidas pela técnica atual de soldagem, tendo como referência as especificações de projeto L_p .

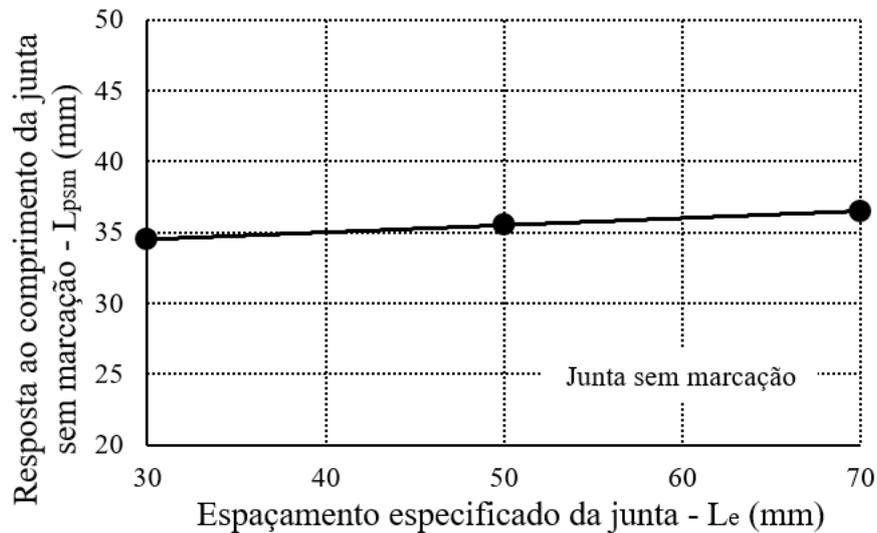
Figura 36 - Efeitos da combinação $L_{psm} \times L_p$ sobre as variações dimensionais da junta sem marcação.



Na figura 36 pode ser observado que todos os cordões de solda L_{psm} tiveram resultados dimensionalmente inferiores a L_p , mostrando que o método atual de soldagem possui uma forte tendência a não alcançar as especificações de L_p para o comprimento dos elementos. Fazendo uma comparação com a figura 33, as diferenças percentuais de L_{psm} ficaram abaixo de L_p em 18,3% para $L_p = 30$ mm, 12,5% para $L_p = 40$ mm e 12% para $L_p = 50$ mm, evidenciando que em nenhuma das situações as especificações de projeto foram atingidas.

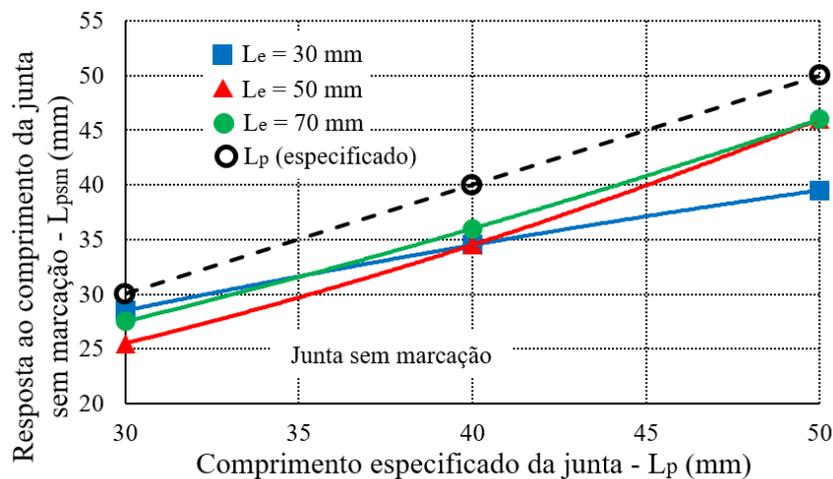
A figura 37 mostra a variação de valores médios L_{psm} em função dos valores de L_e . Pode ser observado que L_{psm} tem uma leve tendência em aumentar à medida que L_e aumenta, mostrando uma relação entre o efeito do comprimento do cordão de solda e seus elementos vizinhos, fato que reforça a consideração de L_e como fator significativo na tabela 11. Esta relação pode estar associada com o uso de L_{psm} como referência de posicionamento para o próximo cordão de solda, sendo que quanto maior for L_{psm} conseqüentemente maior será L_e .

Figura 37 - Efeitos da combinação $L_{psm} \times L_e$ para amostras sem marcação.



A figura 38 mostra, complementarmente às figuras 36 e 37, a variação de L_{psm} de acordo sua referência L_p e em relação à L_e .

Figura 38 – Efeitos da combinação $L_{psm} \times L_p$ e L_e para amostras sem marcação.



A figura 38 mostra que, para os valores de L_e igual a 50 e 70 mm, L_{psm} segue uma variação proporcionalmente constante com L_p , porém para o valor de L_e igual a 30 mm é observada uma dispersão na variação de L_{psm} que indica a influência de fatores externos, tendendo a diminuir L_{psm} à medida que L_p aumenta. Em ambos os níveis avaliados L_{psm} ficou abaixo dos valores especificados para L_p . Os fatores externos estão ligados à percepção do soldador durante a execução da solda, uma vez que a presença de características geométricas próximas à junta em execução tem influência sobre as decisões em relação aos pontos de início e fim da soldagem.

O fator L_p , observado através das tabelas 10 e 11, é estatisticamente significativa para ambas as técnicas de solda, com e sem marcação, e sua importância é reforçada pela análise das figuras 33 e 36, onde os valores especificados e resultantes possuem uma dependência intrínseca.

O fator L_e , de forma teórica, não tem influência sobre o comprimento do cordão de solda para ambas as amostras, com e sem marcação, porém um aspecto importante é observado na combinação $L_p \times L_e$ no método de soldagem sem marcação, onde L_e aparece significativamente próximo do limite de controle, apesar de não ultrapassar esta fronteira, conforme mostrado na tabela 11. Esta característica indica que a variabilidade dimensional dos cordões de solda aplicados pela técnica atual é, de alguma forma, afetada também pelo espaçamento, pois L_e é resultado e controlado pela habilidade do soldador em manusear o bocal de soldagem, com sua extensão influenciada pelo comprimento dos cordões vizinhos, fato não observado nas amostras fabricadas contendo as marcações. No método de soldagem com as marcações o fator L_e está diretamente relacionado com a presença da própria marcação.

A influência das marcações sobre os fatores avaliados é justificada pela sua presença na forma de uma limitação física, visível ao soldador e situada de forma independente às condições ambientais e geométricas próximas à tocha de solda. Quando presente, orienta o soldador como uma referência precisa para o início e fim da aplicação do cordão de solda. No processo de soldagem executado pelo método tradicional, sem a presença da marcação, o soldador não possui referência para o posicionamento do cordão, resultando na alta imprecisão dimensional em relação às posições de início e fim da junta, observado principalmente na figura 36.

Apesar dos resultados promissores é importante salientar que a importância dos dados obtidos é estritamente dependente do método de soldagem avaliado, com ou sem marcação, não havendo relação entre eles. Para analisar esta relação e comprovar a influência positiva do uso das marcações no processo de soldagem, os resultados foram analisados sob a abordagem da inferência estatística, olhando para o posicionamento efetivo e relativo dos resultados entre os dois métodos de soldagem avaliados.

Os dados analisados são mostrados na tabela 12, onde para cada nível de L_p é mostrada a média μ de cada técnica de soldagem, comparando seus posicionamentos entre si e verificando a efetividade da técnica com as marcações em relação ao processo atual, sem marcação.

Tabela 12 - Dados para a análise da inferência estatística.

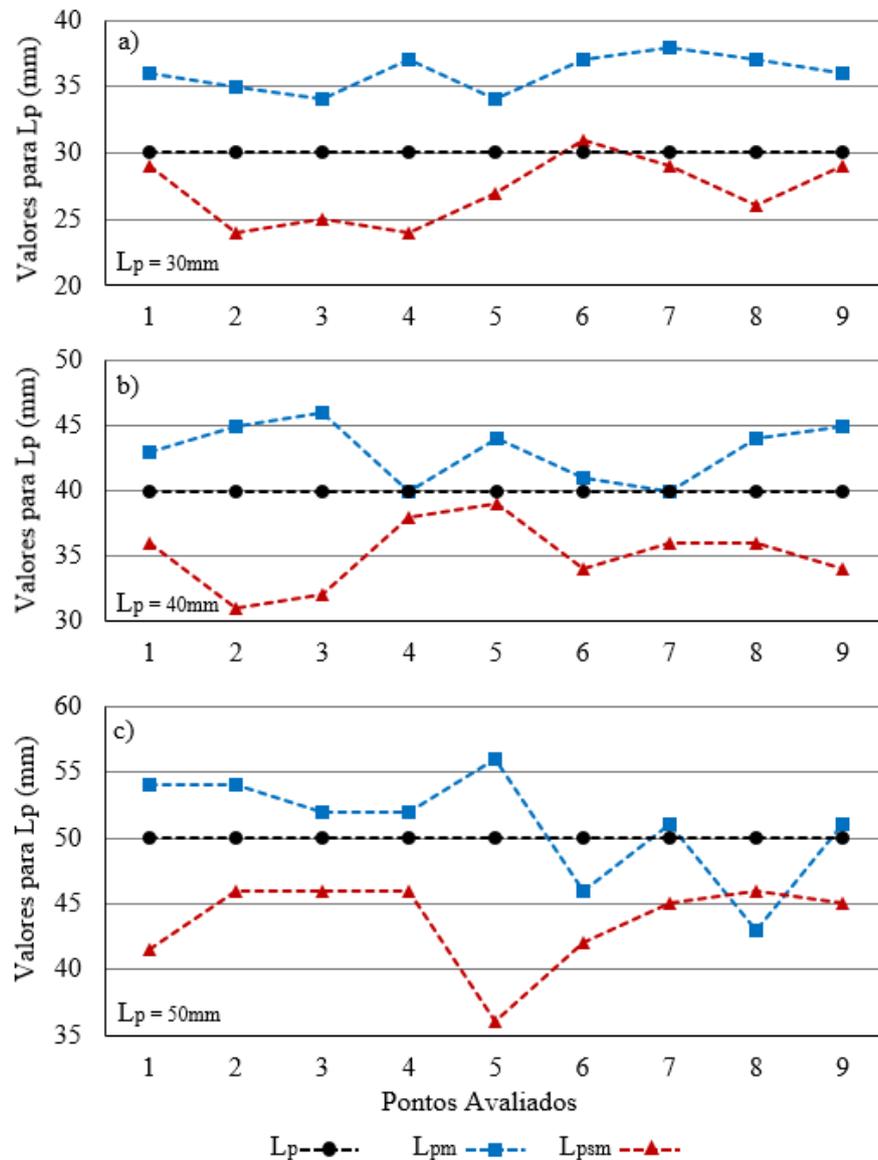
$L_p = 30 \text{ mm}$		$L_p = 40 \text{ mm}$		$L_p = 50 \text{ mm}$	
L_{pm}	L_{psm}	L_{pm}	L_{psm}	L_{pm}	L_{psm}
36	29	43	36	54	42
35	24	45	31	54	46
34	25	46	32	52	46
37	24	40	38	52	46
34	27	44	39	56	36
37	31	41	34	46	42
38	29	40	36	51	45
37	26	44	36	43	46
36	29	45	34	51	45
6,81	10,97	5,56	10,45	3,53	11,03
mm	mm	mm	mm	mm	mm
$(\mu 1 - \mu 2)$		$(\mu 1 - \mu 2)$		$(\mu 1 - \mu 2)$	

Pode ser observado que os valores das médias μ para os níveis de L_{pm} ficaram significativamente menores que L_{psm} , indicando de forma definitiva a superioridade dimensional, sob o ponto de vista estatístico, da utilização das marcações na melhora das características dimensionais para o comprimento dos cordões de solda. Nesta análise é novamente observada a tendência de a variação dimensional diminuir à medida que L_p aumenta, conforme mostrado na figura 39, onde são comparados os valores de L_{pm} e L_{psm} em cada nível avaliado.

As variações percentuais são similares entre os níveis quando avaliados exclusivamente dentro de cada grupo de amostras, mas proporcionalmente decrescentes à medida que L_p aumenta para as respostas de L_{pm} e crescentes à medida que L_p aumenta para as respostas de L_{psm} . Outro aspecto importante é observado no fato de que 92,6% dos valores de L_{pm} estão posicionados acima de L_p , enquanto que para L_{psm} apenas 37% estão na mesma situação. L_{pm} e L_{psm} estando acima de L_p significa o atendimento das especificações de projeto e as recomendações de códigos de soldagem sobre a integridade mecânica da junta.

Para as amostras contendo as marcações na junta uma região com cordões abaixo da especificação é observada para o nível de $L_p = 50 \text{ mm}$ (figura 39), onde 22% dos pontos ficaram abaixo do especificado, porém oscilando em torno dos valores nominais¹³. Na figura 39 para os três níveis avaliados em cada configuração de junta, com e sem marcação, foi observado que, em um nível de confiança de 95%, as médias de L_{pm} excederam L_{psm} .

¹³Esta variação pode ser considerada como pontual, visto a tendência predominante dos valores excederem o nominal.

Figura 39 - Comparação entre as diferenças das médias para L_{pm} e L_{psm} .

Com o uso das marcações nas juntas, quanto maior for o comprimento do cordão maior será sua precisão dimensional, o oposto observado para as soldas aplicadas com a técnica atual, sem marcação.

5.2 AVALIAÇÃO DE CUSTOS COM O USO DAS MARCAÇÕES NAS JUNTAS

5.2.1 Impacto do Uso das Marcações no Tempo de Projeto

Os valores mostrados na tabela 13 foram obtidos por meio da contagem dos tempos de projeto em 40 peças desenvolvidas a partir de chapas planas e cortadas por laser, possuindo geometrias e quantidade de marcações aleatórias.

Tabela 13 – Valores para os tempos de projeto com o uso das marcações.

Quantidade de Componentes Avaliados	Tempo Médio de Projeto dos Componentes (minutos)	Tempo Médio de Projeto das Marcações (minutos)	Aumento Médio no Tempo de Projeto (%)
40	286,8	17,4	6

Como pode ser observado pela tabela 13, a aplicação da marcação nas juntas aumenta o tempo de projeto em 6%, sendo que os tempos são relativos a componentes desenvolvidos pelo autor deste trabalho, podendo variar individualmente de acordo com a complexidade das peças.

5.2.2 Impacto do Uso das Marcações no Tempo de Corte Laser

A tabela 14 mostra os valores obtidos para a variação no tempo de corte a laser nas mesmas peças avaliadas na análise de tempos de projeto, mostrando o aumento médio no tempo de corte com a aplicação das marcações, sendo resultado direto do aumento no perímetro de corte.

Tabela 14 – Valores para os tempos de corte laser com o uso das marcações.

Quantidade de Componentes Avaliados	Aumento Médio no Perímetro de Corte (%)	Aumento Médio no Tempo de Corte (%)
40	1,8	0,8

Observa-se na tabela 14 que a presença da marcação nas juntas aumenta o tempo de corte laser dos componentes em 0,8%, porém é um tempo relativamente pequeno e com pouco impacto em custos em função da simplicidade na utilização do corte laser.

5.2.3 Impacto do Uso das Marcações no Tempo do Processo de Soldagem

A tabela 15 mostra os resultados do impacto que a aplicação de marcações pelo método atual¹⁴ tem sobre o tempo total do processo de soldagem, sendo importante considerar que os valores são relativos a componentes com geometria e complexidade variados, além das habilidades do soldador em executar a soldagem.

¹⁴Ver explicação sobre o método atual de marcação no capítulo 4.3.

Pode ser observado na tabela 15 que o tempo destinado à tarefa de aplicação de marcações¹⁵ pelo método atual impacta em 50% no tempo total da operação de soldagem, sendo uma tarefa que não agrega valor ao produto final e impacta significativamente no custo de fabricação do componente.

Tabela 15 – Valores para os tempos de soldagem atuais.

Quantidade de Componentes Avaliados	Tempo Médio Para a Operação de Soldagem (minutos)	Tempo Médio Utilizado Para a Aplicação das Marcações (%)
34	51	50

Todos os valores apresentados nas tabelas 13, 14 e 15 são aplicados diretamente sobre os cálculos de custos de desenvolvimento do produto, porém é importante observar que os aumentos de 6% no tempo de projeto (tabela 13) e 0,8% no tempo de corte (tabela 14) eliminam o aumento de 50% de tempo necessário para a aplicação das marcações durante o processo de soldagem pelo método atual. Esta redução no tempo do processo é importante visto o impacto significativo que a mão-de-obra tem sobre o custo total da operação, conforme mostrado na figura 17.

5.3 ENSAIOS DE FLEXÃO PARA DEFINIÇÃO DA UTS

A média obtida das forças para flexão em 4 pontos nos ensaios de deformação, conforme ilustrado pela figura 27, foi de aproximadamente 83300¹⁶ N, onde através da equação 1 foi definida a carga da UTS em 14800 N para os ensaios de fadiga, sobre a qual foi estipulada a carga inicial em 13300 N, representando 90% da UTS. As cargas subsequentes, reduzidas progressivamente em 10%, foram de 12000 N e 10800 N, respectivamente.

¹⁵É importante salientar que, em uma linha de produção seriada, grande parte dos componentes soldados com cordões intermitentes são executados sem o uso de marcações prévias ou dispositivos para a delimitação do comprimento e posicionamento das juntas, ficando estas características muitas vezes atreladas à experiência do próprio soldador.

¹⁶Todos os valores dos carregamentos obtidos nos ensaios mecânicos de flexão e fadiga foram arredondados para a dezena mais próxima, para mais ou para menos, com a finalidade de simplificar a interpretação dos resultados.

5.4 ENSAIOS DE FADIGA

Os resultados dos ensaios de fadiga são mostrados na tabela 16 e plotados na figura 40, representando o número de ciclos resistidos até a ruptura para cada nível de carregamento e tipo de amostra, com e sem marcação, conforme o plano de testes mostrado na tabela 7.

Tabela 16 – Resultados dos ensaios de fadiga.

Corpo de Prova Sem Marcação				Corpo de Prova Com Marcação			
Ordem do teste	Amostra	Carga (N)	Ciclos	Ordem do teste	Amostra	Carga (N)	Ciclos
1	β - 03	13300	65000	4	α - 01	12000	137571
2	β - 04	12000	102946	5	α - 02	10800	221668
3	β - 05	10800	102085	6	α - 03	13300	128186
10	β - 06	10800	176497	7	α - 04	12000	162989
11	β - 07	13300	86411	8	α - 05	13300	103175
12	β - 09	12000	80021	9	α - 06	10800	305249
13	β - 10	10800	73490	16	α - 07	13300	120809
14	β - 11	12000	116155	17	α - 08	10800	177458
15	β - 12	13300	62260	18	α - 09	12000	218305

Com os dados dos ciclos mostrados na tabela 16 pode ser observado, através da figura 40, que a resistência à fadiga dos corpos de prova contendo as marcações na junta foi visivelmente maior em comparação com as amostras soldadas pela técnica atual.

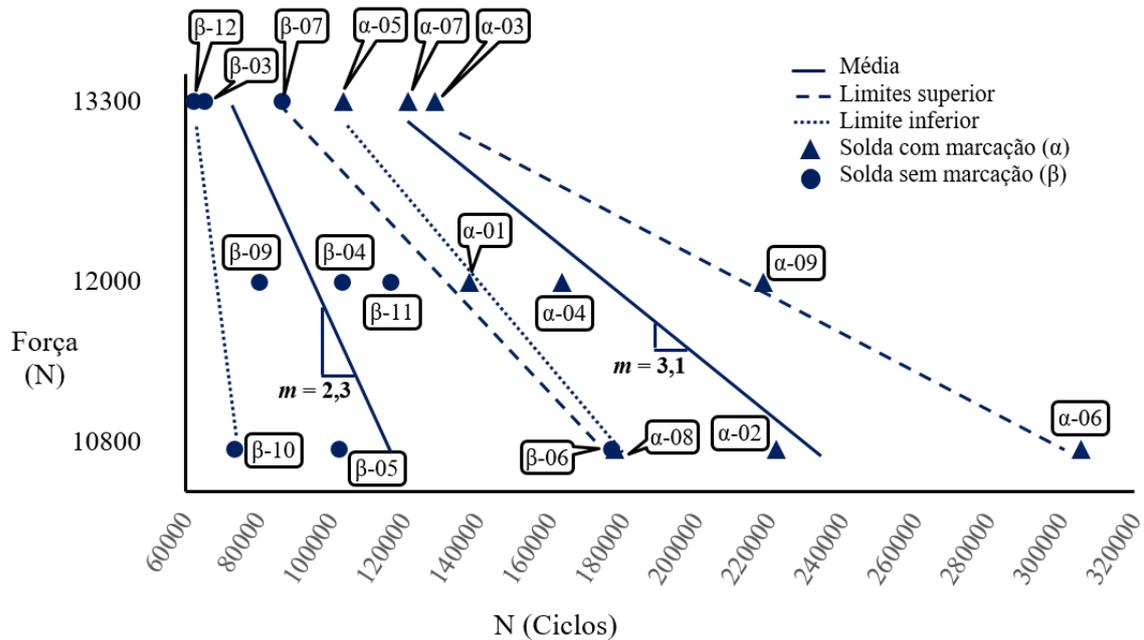
A dispersão inferior dos limites de fadiga das juntas com as marcações possui valores superiores em relação à dispersão superior dos limites de fadiga das juntas sem as marcações, alcançando valores 0,5% e 19,4% para o menor e maior nível de carregamento, respectivamente, caracterizando a superioridade mecânica das juntas fabricadas com este novo recurso de soldagem, independente das cargas aplicadas.

Em uma análise sobre o perfil e posicionamento das curvas de fadiga, tanto em valores médios quanto em relação a seus limites (dispersão), pode ser observado que há uma proporcionalidade entre os valores obtidos para as duas configurações de junta, com e sem marcação, mantendo os limites de fadiga para as amostras com marcação sempre acima dos valores para as juntas atuais, sem marcação.

Esta proporcionalidade tende a ampliar o número de ciclos resistidos para as amostras com as marcações à medida que o carregamento diminui, aumentando a diferença entre a

resistência à fadiga dos dois grupos de amostras, visto que a inclinação m da curva média de fadiga para as amostras com as marcações é inferior, cerca de 25,8%, à das amostras sem as marcações, indicando que a presença da marcação confere uma diminuição aos efeitos na vida em fadiga causados pela presença da solda.

Figura 40 - Curvas de fadiga para as amostras com e sem a marcação.



A tabela 17 traz um resumo comparativo da variação na resistência média à fadiga entre ambas as amostras avaliadas para cada nível de carregamento, mostrando situações onde a diferença chega a 100% de aumento para as juntas com as marcações. Esta variação representa a diferença entre o valor máximo e mínimo de ciclos obtidos para cada grupo de amostras de acordo com cada nível de carregamento e tipo de corpo de prova¹⁷.

Tabela 17 - Variação da resistência à fadiga em relação ao nível de carregamento avaliado para cada grupo de amostras.

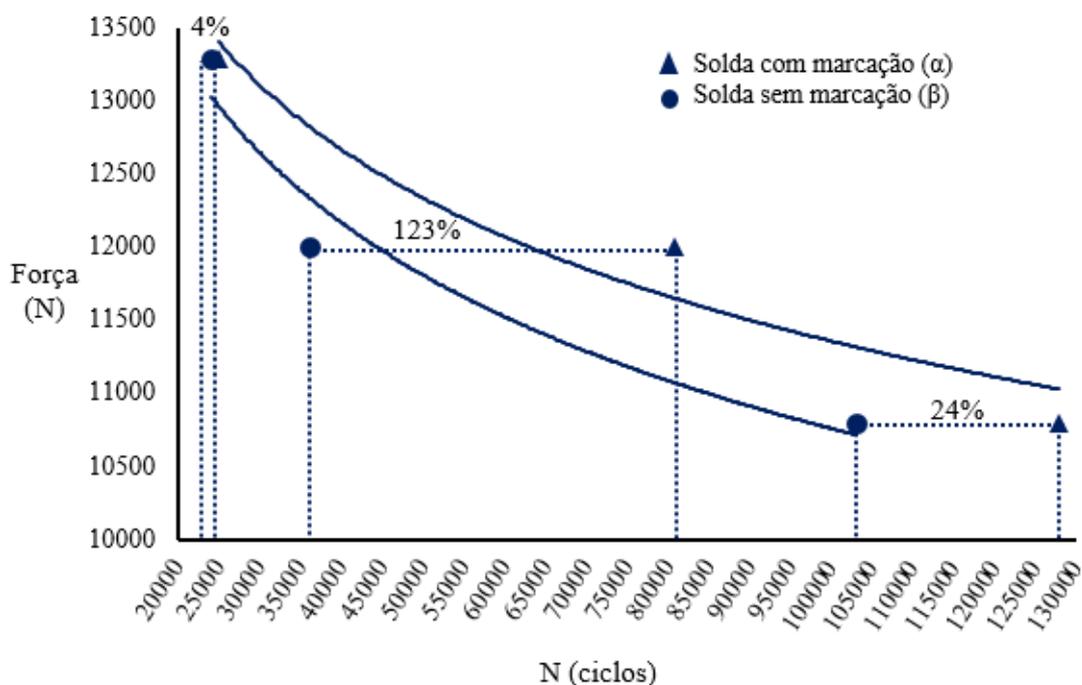
Nível de carregamento (N)	Variação no número médio de ciclos resistidos (N)		Variação da resistência à fadiga em amostras com as marcações
	Corpo de prova sem marcação (β)	Corpo de prova com marcação (α)	
10800	103007	127791	24%
12000	36134	80734	123%
13300	24151	25011	4%

¹⁷Representa, tomando como exemplo o nível de carregamento de 13300 N, a diferença absoluta entre os pontos β -12 e β -7 observados na figura 40.

É observado que, conforme a carga diminui, a diferença na resistência à fadiga segue uma tendência incremental positiva, representando a existência de fatores que influenciam positivamente as propriedades mecânica das juntas soldadas com as marcações à medida que os carregamentos se afastam de fadiga de baixo ciclo.

A figura 41 mostra os valores para os intervalos de ciclos verificados entre os limites mínimos e máximos das dispersões para cada um dos três níveis de carregamento, diferenciando-os para cada configuração de junta, com e sem a marcação, aplicado nos ensaios de fadiga.

Figura 41 - Intervalos de ciclos verificados em cada nível de carregamento nos ensaios de fadiga.



Considerando a dispersão dos resultados dos ensaios é observado que, comparando os valores das juntas soldadas com e sem as marcações sobre o intervalo de dispersão em relação ao seu posicionamento sobre o eixo das abcissas, a dispersão dos valores aumenta à medida que o carregamento diminui, indicando que fatores não relacionados às dimensões da junta, como os microestruturais, possuem maior influência sobre o processo de fadiga de alto ciclo à medida que a carga de prova diminui.

Este fato, mesmo importante, fica ofuscado quando é verificada a considerável diferença no intervalo de ciclos obtidos para as duas configurações de juntas, com e sem as marcações, para cada nível de carregamento analisado. A diferença entre os intervalos de resistência a fadiga chega a níveis que ultrapassam 100% de aumento para as juntas com as

marcações, indicando que essas amostras contêm características que as posicionam em classificação superior¹⁸ às curvas de fadiga já conhecidas.

A dispersão nos limites de fadiga caracterizada nas amostras com as marcações indica a influência de defeitos menores, atuantes no comportamento mecânico sob fadiga das juntas atuais através de características da zona fundida, como defeitos microestruturais e alterações na microdureza. Mesmo com carregamentos próximos à UTS, onde a presença de defeitos grosseiros faz com que as falhas sejam influenciadas de forma mais efetiva na vida em fadiga de baixo ciclo, o uso da marcação na junta teve efeito positivo na resistência do componente, retardando o surgimento das falhas.

5.5 FRACTOGRAFIA

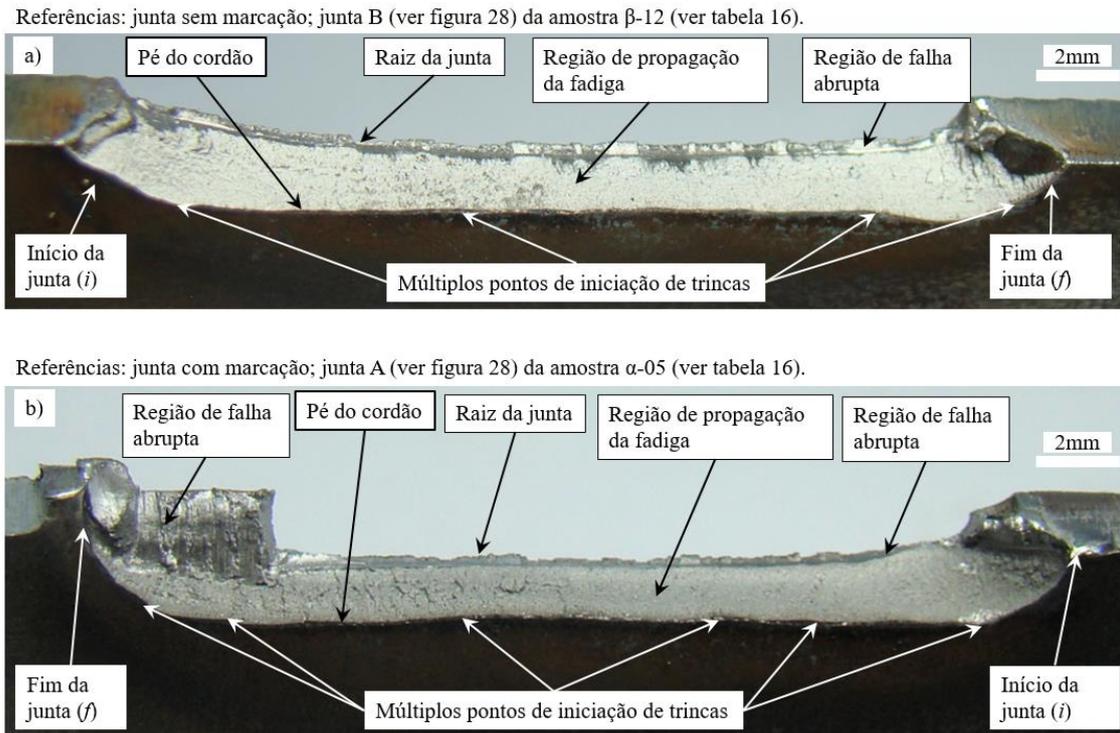
Na análise fractográfica considerou-se a avaliação de duas juntas ensaiadas por fadiga, uma para cada tipo de técnica de soldagem, com e sem marcação, visto que todas as falhas ocorreram de forma similar, sem a presença de características ou defeitos visíveis a olho nu que tivessem influência significativa sobre os limites de fadiga das amostras.

A figura 42 mostra duas regiões fraturadas de ambas as amostras, com e sem as marcações, mostrando de forma geral que as fraturas não apresentaram defeitos grosseiros, com as falhas iniciando predominantemente no pé do cordão de solda, região submetida a cargas de tração, e as fraturas percorrendo os limites da zona fundida da junta. Este modo de falha ocorreu sem exceção em todas as amostras fraturadas. Pode ser observado que não há diferenças significativas entre as falhas das duas amostras, embora houve variação nas regiões das fraturas ao longo das juntas em relação aos três cordões de solda de cada amostra avaliada. O início das trincas por fadiga também ocorreu de forma aleatória, porém predominantemente no pé dos cordões de solda.

A figura 43 mostra a esquematização da análise de falhas em todos os 18 corpos de prova ensaiados por fadiga, onde cada retângulo representa uma junta dentro de sua respectiva amostra. Alguns resultados das juntas B estão deslocados em relação à região central da amostra, significando que a variação dimensional entre os espaçamentos dos cordões foi superior a 3 mm. Em todas as juntas onde o espaçamento teve uma diferença menor que 3 mm a junta B permaneceu centralizada.

¹⁸Classificação das curvas de fadiga de acordo com a norma BS 7608 (2014).

Figura 42 - Fractografias das amostras avaliadas nos ensaios de fadiga. a) amostra com marcação nas juntas; b) amostra sem marcação nas juntas.



A avaliação da figura 43 resulta, basicamente, em três situações que descrevem a interação entre as juntas, onde a distância entre os cordões de solda é o principal fator de variação da ocorrência de falhas.

Situação 1: 98%¹⁹ das juntas centrais (juntas B) para as duas configurações, com e sem marcação, falharam em suas regiões inicial (*i*), central (*c*) e final (*f*), exceto a junta β 10 que não falhou em *i*, considerado como um caso pontual da análise. As penetrações das juntas B para as duas configurações de junta, com e sem marcação, foram predominantemente parciais em 92,5% das regiões avaliadas.

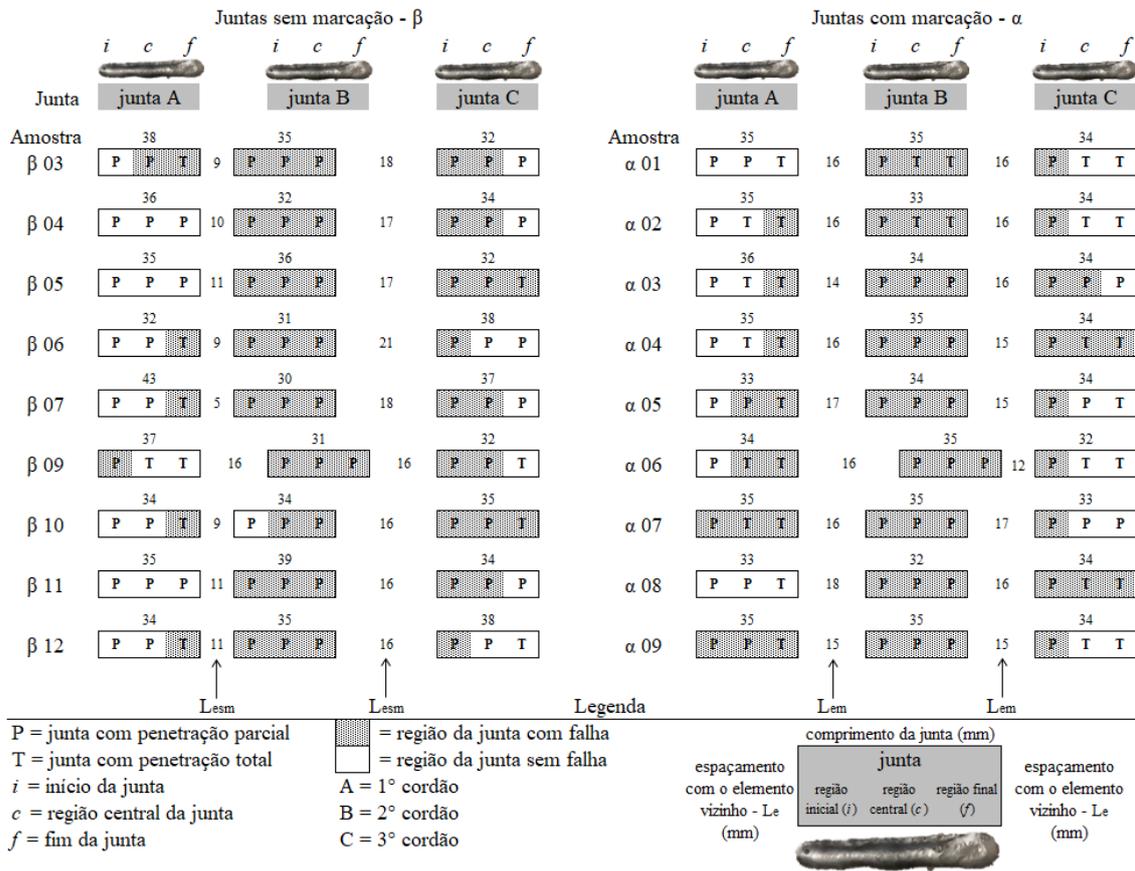
Situação 2: 100%²⁰ das amostras sem marcação apresentaram falhas nas regiões *f* e *i* das juntas B e C, respectivamente, representando as posições com maior espaçamento entre elementos, sendo que 100% dessas juntas possuem penetração parcial. Nas regiões com menor espaçamento entre elementos, representados por *f* e *i* das juntas A e B, respectivamente, houve um percentual de falhas de 72%, sendo que apenas a amostra β 09, representando 5% dos casos, estava com espaçamento equidistante. Nas amostras com

¹⁹A análise percentual das juntas falhadas considera, para cada junta, três regiões distintas: início da junta, região central e fim da junta. Neste caso foram avaliadas 18 juntas com 3 regiões cada, somando 54 regiões de análise. Como somente uma região (início) da junta β 10 não falhou, 98% representa 53 regiões com falha.

²⁰Nesta análise considera-se apenas as regiões iniciais e finais de cada junta para representar a interação entre os elementos vizinhos em função da variação no espaçamento entre os cordões de solda.

marcação a equidistância entre as juntas foi verificada em 95% dos casos, com uma ocorrência de falhas nas regiões *i* e *f* entre as juntas A-B e B-C de 6%.

Figura 43 – Representação esquemática das regiões avaliadas na fractografia das amostras avaliadas nos ensaios de fadiga para juntas com e sem marcação.



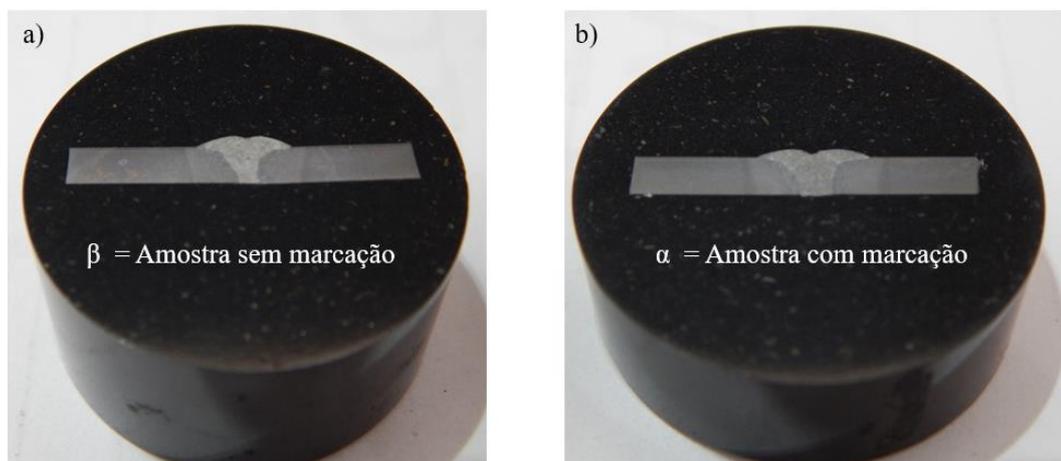
A variação na presença das falhas entre as juntas com maior e menor espaçamento entre elementos, assim como a predominância delas entre as juntas equidistantes, descrito na situação 2, mostra a influência que a variação dimensional no posicionamento dos cordões de solda tem sobre a resistência mecânica da junta, onde os elementos com maior afastamento apresentam menor resistência mecânica e maior incidência de falhas por fadiga. Para os casos com posicionamentos equidistantes entre os elementos as falhas ocorreram de forma mais homogênea, melhorando sua previsibilidade.

Situação 3: 80,5% das regiões externas das juntas A (região *i*) e C (região *f*) não sofreram falhas, reforçando a influência que elementos vizinhos presentes na junta, como um cordão de solda próximo, tem sobre o comportamento mecânico do componente. Uma comparação pode ser feita com as juntas B para ambas as configurações, com e sem marcação, onde a maior parte das regiões *i* e *f* falharam, conforme descrito na situação 1.

5.6 CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DAS JUNTAS SOLDADAS

As amostras avaliadas não apresentaram características microestruturais que pudessem justificar as diferenças de resistência mecânica obtidas nos ensaios de fadiga. Parâmetros como propriedades mecânicas dos metais de base e de adição, consumíveis e parâmetros de soldagem foram mantidos constantes para a fabricação de ambas as amostras, com e sem marcação, contribuindo diretamente para a uniformidade microestrutural da ZTA. A figura 44 mostra as duas amostras embutidas e preparadas para a caracterização microestrutural das juntas.

Figura 44 – Amostras embutidas de uma junta a) sem marcação e b) com marcação.



As figuras 45 e 46 mostram as microestruturas das amostras com e sem as marcações, respectivamente, conforme posicionamento das seções transversais Bx', representando o fim do cordão de solda, mostrado na figura 29.

Como pode ser observado, as microestruturas de ambas as juntas, com e sem as marcações, apresentaram o metal de base formado por ferrita poligonal, perlita fina e carbonetos dispersos nos grãos de ferrita. A mesma microestrutura é observada na região de refino de grão, porém com uma presença maior de precipitados nos contornos de grão. Na região de crescimento de grão é observada a presença de grãos grosseiros de ferrita poligonal, ferrita alotriomórfica nos contornos de grão, além de ferrita de Widmanstätten, ferrita acicular dispersa e pouca presença de carbonetos. A zona fundida apresentou veios de ferrita, ferrita poligonal, ferrita de segunda fase alinhada e carbonetos dispersos na matriz ferrítica.

O mesmo padrão microestrutural da ZTA foi encontrado para ambas as amostras avaliadas, com e sem marcação, em função da similaridade geométrica das juntas e do uso

dos mesmos parâmetros de soldagem para a fabricação dos corpos de prova, assim como as similaridades dimensionais da zona fundida e da ZTA.

Figura 45 – Caracterização microestrutural de uma junta soldada sem marcação.

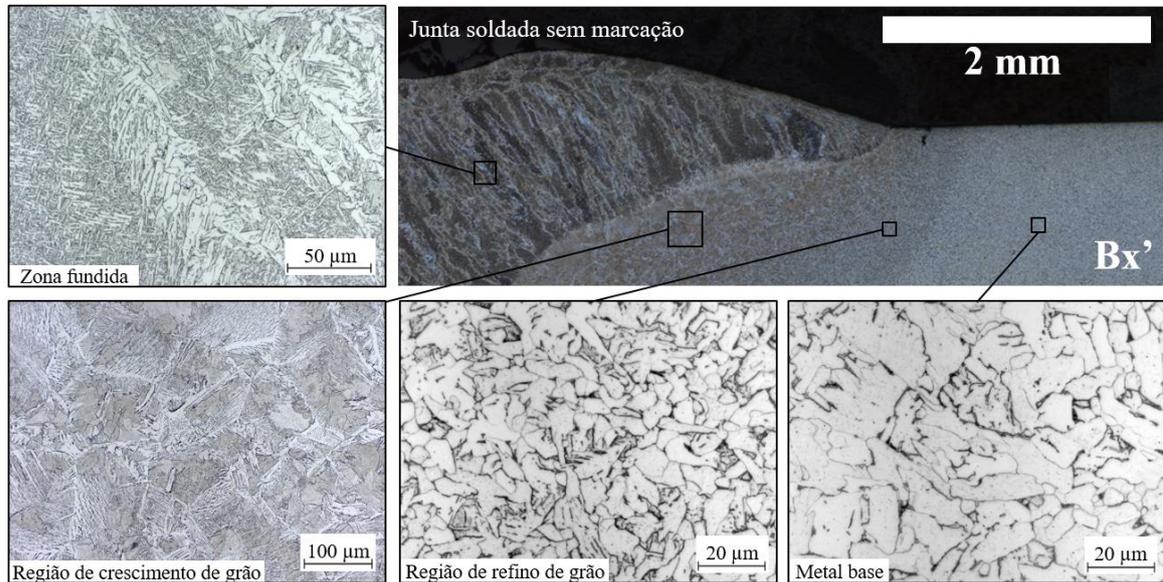
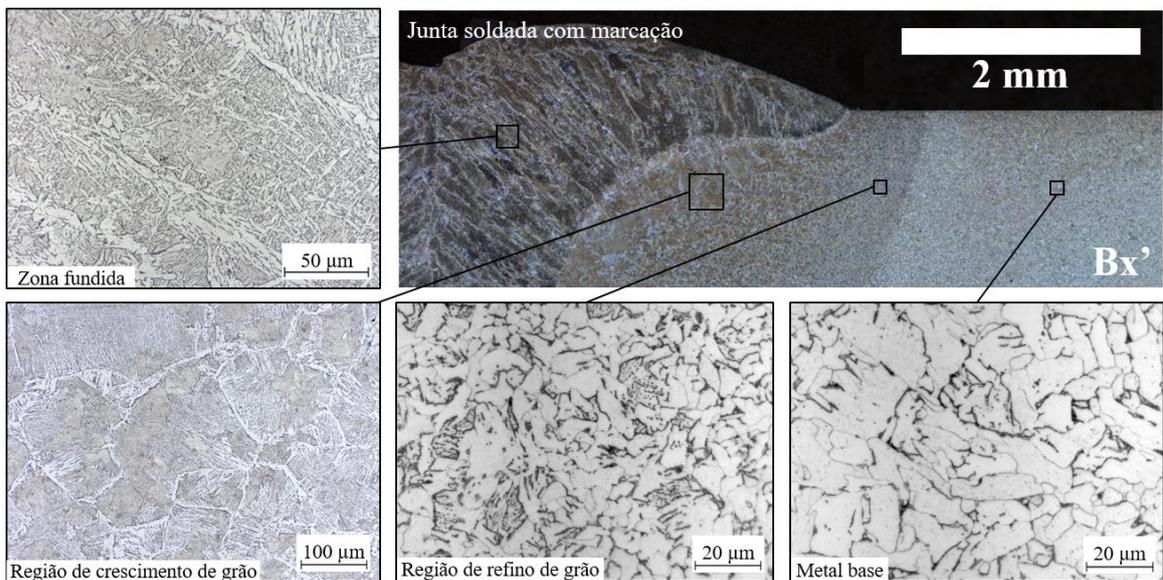


Figura 46 – Caracterização microestrutural de uma junta soldada com marcação.



O processo de soldagem ocasionou a formação de grãos colunares e alinhados com a direção de solidificação da poça de fusão, formada basicamente por ferrita e perlita fina. Não foram observadas a presença de defeitos macroscópicos, como porosidades, trincas ou inclusões de escória, os quais poderiam ocasionar o surgimento de trincas.

A similaridade entre as microestruturas das duas amostras, com e sem as marcações, mostra que a presença da marcação não impõe efeitos sobre a microestrutura do metal

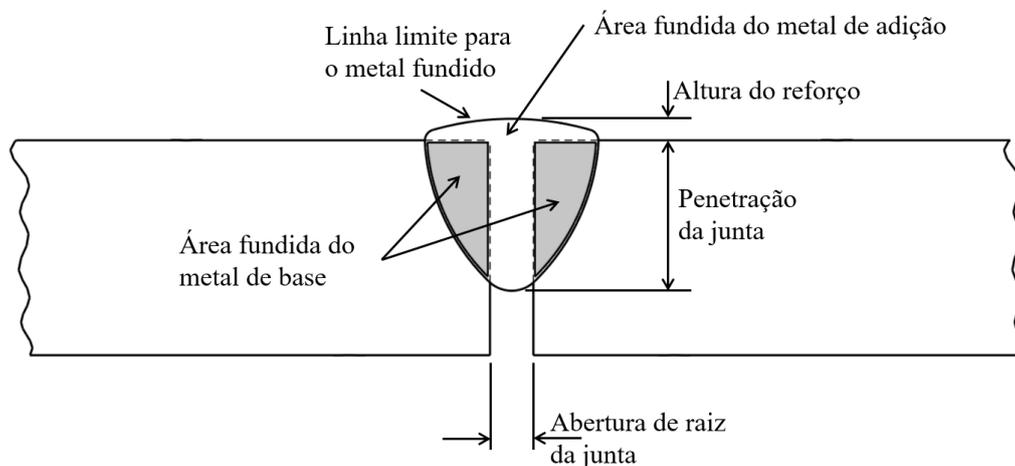
fundido, permitindo que ela seja aplicada em projeto sem riscos às propriedades mecânicas no material da junta soldada e, conseqüentemente, sem riscos estruturais.

5.7 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA JUNTA SOLDADA

A variação nas diferenças de resistência à fadiga entre ambas as amostras, com e sem marcações, podem ser parcialmente explicadas com a os resultados da análise dimensional das seções transversais dos cordões de solda, considerando os valores avaliados para o percentual da penetração da solda somados ao comprimento dos cordões, abertura de raiz da junta, área total fundida e espaçamento médio entre cordões, conforme mostrado na tabela 18. Além dos valores absolutos são caracterizados os desvios padrão para cada parâmetro analisado, somados à influência das dispersões dimensionais nos resultados dos ensaios mecânicos.

A tabela 18 mostra os valores verificados ao longo dos três cordões de solda para cada configuração de junta, com e sem marcação, conforme orientado pela figura 29, com os resultados individuais e as médias para a abertura de raiz da junta, diluição e penetração da solda, conforme descrito pela figura 47.

Figura 47 – Detalhes da junta soldada avaliados para caracterização geométrica.



Os corpos de prova contendo o prefixo (α) indicam as amostras com as marcações, assim como os corpos de prova contendo o prefixo (β) indicam as amostras sem as marcações. O apóstrofo presente após a identificação do corpo de prova indica que a medição ocorreu no fim do cordão de solda, assim como a identificação do corpo de prova sem o apóstrofo indica que a medição ocorreu no início do cordão de solda, conforme ilustrado na figura 29.

Tabela 18 – Caracterização geométrica das juntas soldadas para α) corpos de prova com marcação e β) corpos de prova sem marcação.

Corpo de prova	Abertura de raiz da junta (mm)	Área do metal fundido (mm ²)	Área fundida do metal de base (mm ²)	Diluição (%)	Penetração da junta (mm)	Penetração média (mm)	Penetração (%)
A Ax	1,02	12,52	9,45	75%	1,81		
α Ax'	0,72	11,22	5,72	51%	2,81	2,31	73%
α Bx	0,89	11,75	9,34	79%	1,71		
α Bx'	- ²¹	13,39	6,5	49%	3,17	2,44	77%
α Cx	1,04	9,63	5,48	57%	1,76		
α Cx'	0,80	13,33	8,78	66%	2,19	1,98	62%
Média (α)	0,89	11,97	7,55	0,63	2,24	2,31	73%
β Ax	0,69	5,98	5,29	88%	0,41		
β Ax'	0,84	9,69	4,24	44%	2,10	1,26	40%
β Bx	0,48	5,16	4,46	86%	0,39		
β Bx'	-	12,54	7,31	58%	3,17	1,78	56%
β Cx	0,47	15,11	11,47	76%	1,85		
β Cx'	0,65	10,94	5,16	47%	2,03	1,94	61%
Média (β)	0,63	9,90	6,32	67%	1,66	1,78	56%

Tabela 19 - Análise geométrica dos cordões de solda.

Característica	Dimensões Médias dos Cordões de Solda			
	Com marcação		Sem marcação	
	(α)	(β)	(α)	(β)
Altura do reforço dos cordões (mm)	1,5	1,5	0 ²²	0
Penetração (%)	72,9%	56,2%	0,56	0,98
Comprimento do cordão de solda (mm)	34,1	34,7	0,9	2,8
Abertura de raiz (mm)	0,89	0,63	0,12	0,14
Diluição (%)	63%	67%	0,12	0,18
Área total média fundida da junta (mm ²)	390,4	341,7	- ²³	-
Espaçamento médio entre cordões (mm)	15,7	13,7	1,3	4,3

²¹Valores para a abertura de raiz da junta para as amostras α B' e β B' não foram medidos pois nessas regiões a penetração da solda foi total, impossibilitando sua verificação a olho nu.

²²O desvio padrão para a altura do reforço é desprezível, pois foi detectada uma grande uniformidade na altura média dos reforços das soldas.

²³O desvio padrão para a área total média fundida das juntas não foi calculado, pois é função dos demais desvios padrão calculados na tabela 19. Os desvios padrão são apresentados individualmente para análise.

Utilizando os dados da tabela 18 foram calculadas as médias dos principais parâmetros dimensionais verificados nas juntas, analisando os valores médios e os respectivos desvios padrão de cada item, com os resultados mostrados na tabela 19. A figura 48 mostra as imagens das amostras avaliadas para as medições das características mostradas na tabela 18, com o posicionamento das seções transversais das juntas indicadas na figura 29.

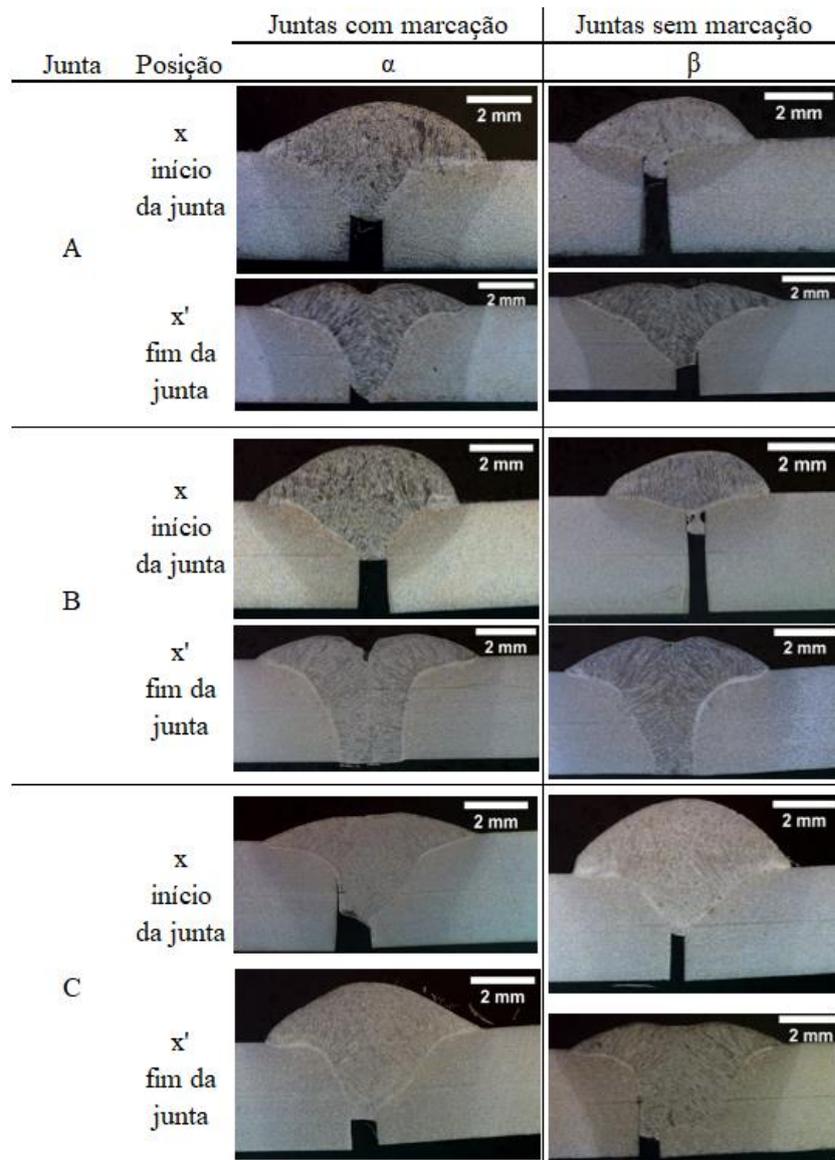
As amostras com as marcações nas juntas mostraram valores estatisticamente melhores em todos os parâmetros analisados, bem como no desvio padrão verificado para cada um deles. Aspectos com significativa influência mecânica como a penetração e a área total fundida das amostras com marcação tiveram resultados com valores maiores em relação às soldas sem as marcações, o que implica diretamente na melhora do comportamento mecânico e sua influência sobre a resistência à fadiga.

A diluição da solda mostrou-se uniforme para ambas as configurações de juntas, com e sem marcação, com valores de 63% para juntas com as marcações e 67% para juntas sem as marcações, conforme observado na tabela 18. A similaridade na diluição das amostras significa uma diminuição na presença de fatores metalúrgicos importantes e de difícil controle, como a variação na microdureza do metal fundido devido à variação volumétrica do metal de adição. Este parâmetro tem influência direta na variação das propriedades mecânicas da junta, como a microdureza, conseqüentemente aumentando as incertezas sobre a resistência mecânica do componente.

Pode ser observado que a penetração possui uma variação significativa entre as seções transversais avaliadas, inclusive entre seções do mesmo grupo de amostras, com e sem marcação. O que ocorre é uma maior uniformidade entre seções das amostras obtidas em juntas com as marcações, como pode ser observado pelos números mostrados na tabela 18. A marcação atua como uma limitação dessa variável, fazendo com que a junta esteja sempre posicionada com as faces de soldagem paralelas e equidistantes uma da outra, proporcionando maior uniformidade na abertura por onde o metal fundido deve fluir.

As diferenças na penetração entre os locais de início e fim da junta para ambas as situações, com e sem marcação, se devem ao fato de que, no início da junta, o arco elétrico está frio e o metal de adição é depositado predominantemente na superfície do metal de base. À medida que a soldagem é executada ela estabiliza termicamente, fazendo com que a fusão entre os metais de adição e base seja mais efetiva, atingindo, em alguns casos, a penetração total.

Figura 48 - Seções transversais das juntas avaliadas nas verificações geométricas dos cordões de solda.



De acordo com as recomendações da norma EN ISO 5817 (2007), a penetração, descrita pela norma EN ISO 6520²⁴ (1998), não atingiu os limites estabelecidos para as seções αAx , αBx e αCx (3 casos) para as juntas com marcação, bem como as seções βAx , $\beta Ax'$, βBx , βCx e $\beta Cx'$ (5 casos) para as juntas sem marcação, conforme pode ser visualizado na figura 48. É observado uma diminuição de 40% nos defeitos por falta de penetração nas juntas com marcação, fator que afeta significativamente a resistência mecânica do componente. Outras características das juntas como largura e altura do reforço, cratera de fim de cordão, ângulo do reforço e sobreposição da solda permaneceram dentro dos valores estabelecidos pela norma EN ISO 5817 (2007).

²⁴A penetração é referenciada pela norma EN ISO 5817 (2007) pelo item 1.6 e descrita pela norma EN ISO 6520-1 (1998) pelo item 4021.

Em relação à influência das variações dimensionais da junta sobre a diluição, a maior abertura de raiz para as amostras com as marcações não teve efeito significativo na resistência mecânica, uma vez que, tanto as variações nas geometrias do reforço do cordão e do metal fundido como a penetração e o comprimento dos cordões, fizeram com que esses valores se contrabalançassem em comparação às juntas sem as marcações, resultando em pouca variação volumétrica entre as duas configurações de junta.

Uma das características que teve grande variação entre as duas amostras avaliadas foi a penetração, sendo que o valor médio para as amostras sem marcação foi significativamente menor quando comparada com as amostras contendo marcação, conforme mostrado na tabela 19. Seu efeito sobre a resistência da junta é diretamente proporcional, pois afeta sua área de ligação e, conseqüentemente, a resistência mecânica do componente.

A diferença na penetração entre as duas amostras, com e sem a marcação, resultou em dois cenários importantes à medida que esta análise é realizada em componentes de maior tamanho, impactando em cordões de solda mais compridos e em maior quantidade. A análise a seguir combina os resultados mostrados nas figuras 39 e 43 em conjunto com a tabela 19.

Cenário 1. Junta com marcação: pela análise das figuras 39 e 43, as quais indicam uma diminuição na variação do comprimento do cordão de solda aplicado com marcação – L_{pm} à medida que ele aumenta de extensão, tendendo a ser igual do valor especificado L_p , quanto maiores forem as juntas melhor será a precisão sobre a previsibilidade da resistência mecânica da estrutura entre os valores calculados e os reais.

Cenário 2. Junta sem marcação: pela análise das figuras 39 e 43, que indicam um aumento na variação do comprimento do cordão de solda aplicado sem marcação - L_{psm} à medida que ele aumenta de extensão, tendendo a diminuir de comprimento em relação ao valor especificado L_p , quanto maior forem as juntas mais incertezas haverá sobre a resistência mecânica real da estrutura, afastando os valores teóricos dos reais.

Além da diminuição percentual da penetração para as juntas sem as marcações, aplicadas pelas técnicas atuais do processo de soldagem, o desvio padrão das medições é também visivelmente maior. Quando somados aos resultados do cenário 2, descrito acima, resultam em uma maior variabilidade dimensional das juntas e, conseqüentemente, em maiores incertezas sobre as propriedades mecânicas do componente avaliado, sendo o oposto observado para as juntas executadas com a presença das marcações.

É importante salientar que a penetração e a abertura de raiz da junta estão intimamente relacionadas, pois a abertura de raiz afeta sensivelmente a penetração. Este fato é comprovado pela análise comparativa destes dois parâmetros dos corpos de prova de ambas as amostras, com e sem marcação. Os casos que apresentaram maior abertura de raiz tiveram, conseqüentemente, uma maior penetração da junta, o que resultou em uma maior área de contato entre as peças soldadas. Estas melhorias ocorreram predominantemente nas amostras contendo as marcações, fato que auxilia a compreensão no aumento da vida em fadiga desse grupo de corpos de prova.

Os valores da abertura de raiz sofreram variações significativas em função da forma como ela é controlada no estado atual da técnica, sem a presença das marcações na junta. O que atualmente garante seu dimensional é a utilização de dispositivos calibrados para manter a abertura desejada, sendo, entretanto, difícil manter os calibradores montados na junta durante o processo de soldagem ou mesmo posicioná-los ao longo de toda a extensão da junta em determinadas situações. Este fato implica na deformação da junta durante a soldagem final, resultando na variação dimensional da abertura de raiz.

A junta com a presença da marcação mantém de forma constante a abertura de raiz, evitando que ocorram variações significativas na penetração devido às variações dimensionais da junta, melhorando significativamente a uniformidade das suas características dimensionais e propriedades mecânicas. Em relação à penetração da junta, as amostras sem as marcações apresentaram valor médio de 56%, enquanto que para as amostras com as marcações o resultado foi de 73%, representando um acréscimo de 30,4%. Os respectivos valores de desvios padrão foram de 0,98 para as juntas sem marcação e de 0,56 para as juntas com marcação.

Outro fator de cunho geométrico que confere à junta com a marcação uma característica de resistência mecânica superior está relacionado com a forma como suas peças se inter-relacionam através do cordão de solda. As juntas com as marcações possuem uma característica geométrica intrínseca e única, que é a existência de abertura de raiz somente na região onde a solda será aplicada, conforme mostrado na figura 49. Nas demais regiões as bordas das peças praticamente se tocam, formando, do ponto de vista estrutural quando a junta for submetida a carregamentos de flexão, um corpo rígido sob cargas de compressão, conforme mostrado na figura 50. Nesta situação a borda de contato entre as peças oposta ao reforço do cordão de solda serve como ponto de apoio para flexão da junta.

Figura 49 - Interface entre as faces de solda de uma junta contendo marcação.

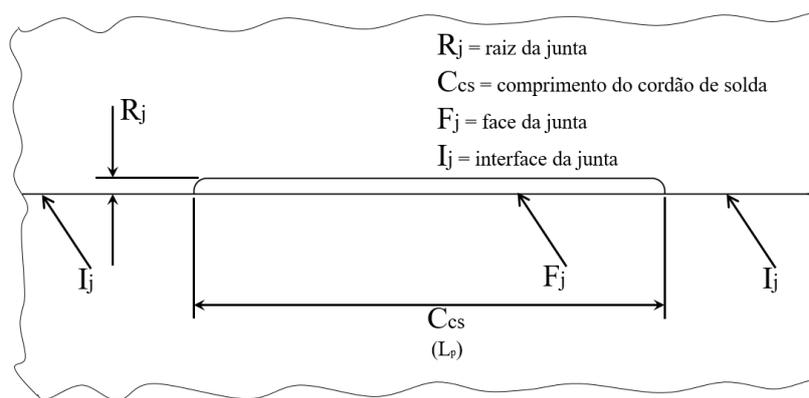
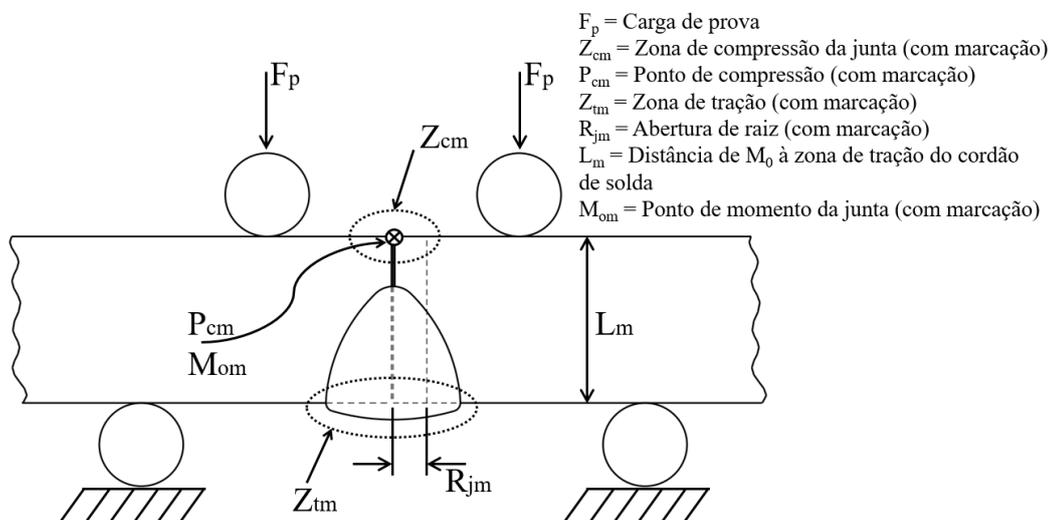


Figura 50 - Interface entre as partes da junta com marcação durante carregamentos de flexão.

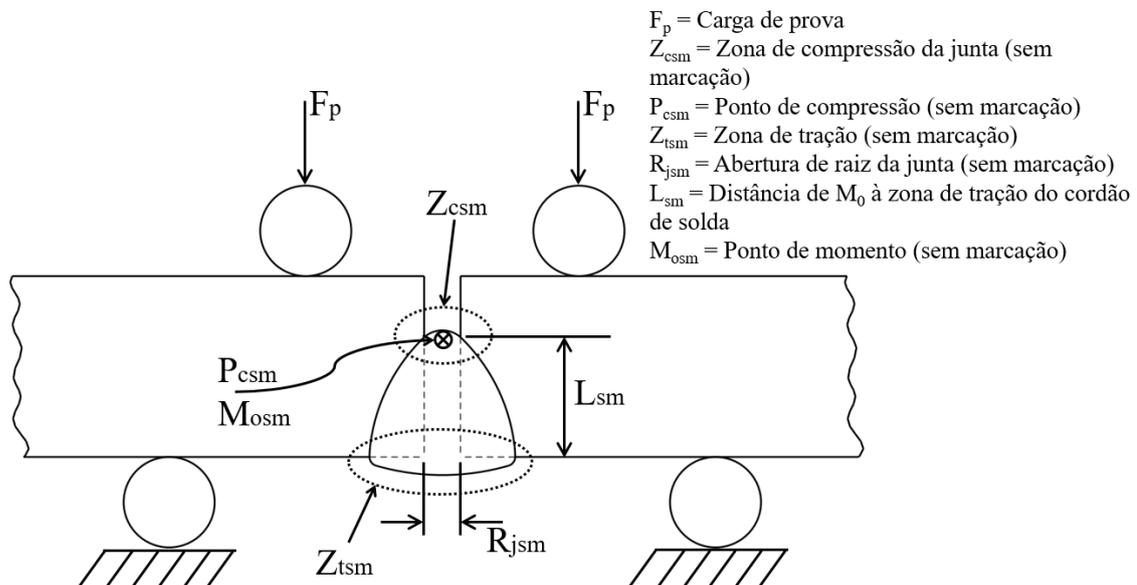


No modo de carregamento em flexão a borda de contato das peças, representado por Z_{cm} , oposta à superfície de deposição do cordão de solda, serve como ponto de apoio P_{cm} para flexão, afetando o efeito de alavanca sobre o comportamento mecânico do componente. Este efeito de alavanca tem sua magnitude alterada de acordo com a espessura da peça L_m , a qual define e mantém constante a distância entre a extremidade de conexão do cordão de solda Z_{tm} à extremidade de contato Z_{cm} , oposta à face do cordão.

A resistência da junta aumenta à medida que o cordão de solda tem suas dimensões aumentadas, tanto em comprimento quanto penetração, porém a junta com marcação confere uma característica específica que é a borda de apoio P_{cm} , definido unicamente pela espessura da peça L_m , melhorando a distribuição das tensões sobre o cordão de solda, especialmente na zona de tração da junta - Z_{tm} , pelo contato homogêneo das peças durante seu carregamento.

A distribuição das tensões quando a avaliação é feita sobre uma junta sem as marcações, fabricada pelas técnicas de soldagem atuais, mostra um cenário ligeiramente diferente para os esforços sobre o cordão de solda, conforme pode ser observado na figura 51. Esta configuração de junta faz com que o cordão de solda tenha um maior carregamento de tração durante a flexão da junta, pois o ponto de apoio para o momento torsor da junta é o ponto M_{osm} , definido pela penetração da junta e não mais pela espessura da peça, como ocorre em uma junta com marcação.

Figura 51 - Interface entre as partes da junta sem marcação durante carregamentos de flexão.



Para a junta sem a marcação o efeito da alavanca na junta é fortemente afetado pela penetração L_{sm} , e não pela espessura da peça L_m como ocorre na junta com marcação, sendo que o ponto de apoio para flexão do componente não ocorre mais no contato das bordas das peças no ponto P_{cm} , conforme verificado na figura 50, mas sim no ponto P_{csm} , localizado na base da raiz do cordão e solda. Esta característica faz com que a alavanca de flexão seja definida em função das cargas de trabalho e da profundidade do cordão L_{sm} , o qual possui grande variabilidade no processo de soldagem atual e difícil controle dimensional quando não possui penetração total.

As características da junta com a marcação resultam em uma maior distribuição das tensões atuantes sobre o componente, especialmente quando seu reforço estiver tracionado de forma transversal pelo efeito da flexão da estrutura, pois o contato entre as duas metades do corpo de prova mantém constante o momento atuante sobre o ponto de giro da junta (P_{cm} para junta com marcação e P_{csm} para junta sem a marcação). Nesse caso tem-se que:

$$\sum M_{osm} > \sum M_{om} \quad (3)$$

Com as características antes mencionadas, posicionando a utilização das marcações como elementos benéficos para a melhora das propriedades mecânicas da junta, sua presença contribui no aumento da vida em fadiga através da diminuição das tensões atuantes sobre o cordão de solda. É necessário salientar que as características até então avaliadas, quando verificadas em juntas soldadas fabricadas pelas técnicas atuais de soldagem e mostradas nas tabelas 18 e 19, são de difícil controle dimensional quando o objetivo for manter sua regularidade e uniformidade, visto que pequenas variações têm impacto significativo nas propriedades mecânicas do componente quando considerado o somatório desses fatores, como a penetração e a abertura de raiz da junta.

A utilização das marcações na junta soldada age de forma indireta na melhora da vida em fadiga da junta, atuando como um refinador de algumas das principais características que atuam para definir a resistência mecânica do componente soldado. Do ponto de vista dimensional da junta houve uma grande melhora com o uso das marcações, resultando no aumento do nível de certeza para todos os dados relacionados às características geométricas da junta, tendo como base o estado atual da técnica de soldagem para cordões intermitentes aplicados de forma semi-automática.

5.8 MICRODUREZA

A análise do perfil de microdureza mostrou características similares para as duas juntas avaliadas, com e sem a marcação, remetendo assim, como no caso da diluição, a propriedades mecânicas e microestruturais similares entre ambas. Os resultados das microdurezas são mostradas nas figuras 52 e 53, identificando as regiões de endentação com suas respectivas representações pictográficas na seção transversal de cada amostra. A linha horizontal, posicionada a 0,3 mm da superfície do corpo de prova para permitir uma maior abrangência da zona fundida, indica o posicionamento das endentações, passando transversalmente por todas as regiões microestruturais da junta, indo do metal de base até a zona fundida do metal de solda.

Nota-se que, embora haja uma leve diferença geométrica no perfil da zona fundida entre as amostras, com e sem marcação, as propriedades mecânicas relacionadas à microdureza são significativamente similares entre elas, alternando entre os valores de dureza de 130 a 220 Vickers para o metal de base e o centro da zona fundida, respectivamente. O perfil similar de microdureza entre as duas amostras comprova que a

marcação na junta não tem influência sobre as propriedades microestruturais da junta soldada.

Figura 52 - Perfil de microdureza para a junta com marcação.

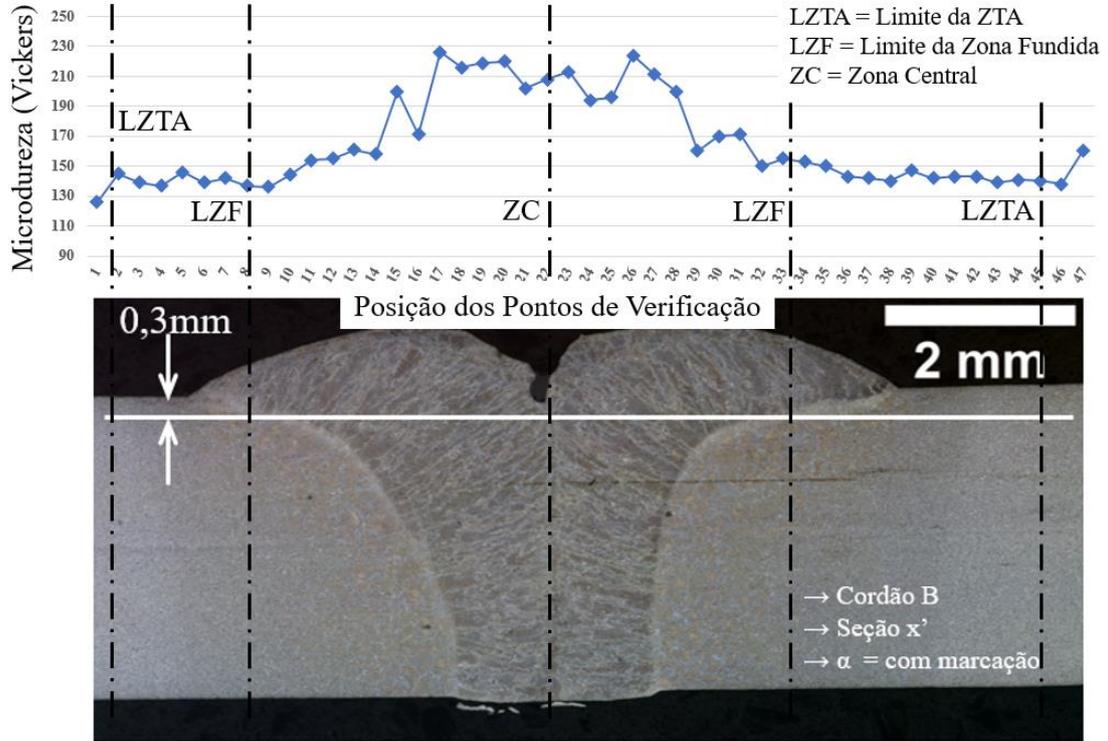
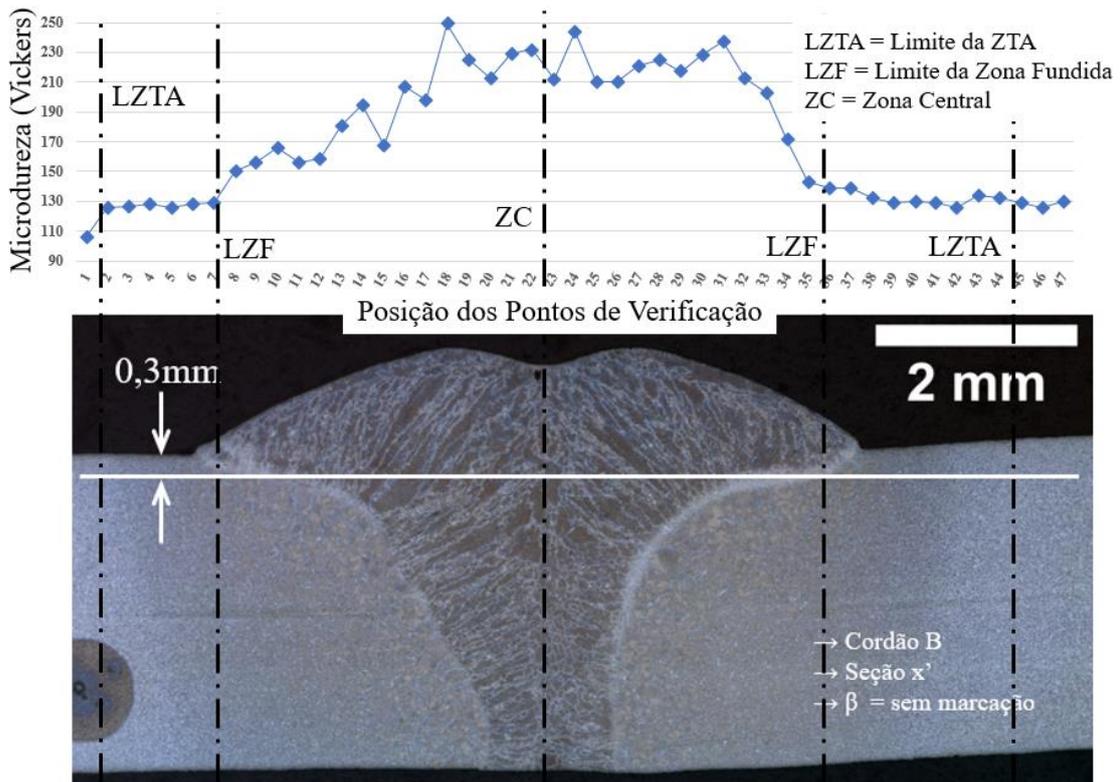


Figura 53 - Perfil de microdureza para a junta sem marcação.



O aumento da dureza observado na zona fundida deve-se à maior resistência mecânica do metal de adição em relação ao metal de base, sendo que o metal de adição e de base possuem tensão de escoamento mínima de 400 MPa e 340 MPa, respectivamente.

5.8.1 Aplicabilidade das Marcações nas Juntas

O fator L_p é significativamente dependente da técnica de soldagem aplicada, sendo necessária uma cuidadosa análise dos procedimentos operacionais que o afetam para o entendimento de seus aspectos de controle. Para os cordões aplicados com a técnica de soldagem tradicional, sem marcação, L_{psm} está diretamente relacionado e influenciado pela percepção do soldador sobre as geometrias das peças a serem unidas. Para os cordões executados com a utilização das marcações a percepção do soldador é refinada e guiada pelas marcações físicas presentes nas peças. O fator L_e é afetado e influenciado pelas mesmas condições de L_p , apesar de ser uma consequência e influenciado diretamente.

O uso das marcações nas juntas permite que o soldador se referencie por limitações físicas dedicadas exclusivamente a orientá-lo sobre o correto posicionamento do bocal de soldagem, garantindo de forma visual que a região de início da junta esteja posicionada ligeiramente anterior à marcação, assim como a região de fim da junta esteja ligeiramente após a marcação.

A utilização das marcações também se mostrou eficaz em relação à melhora das propriedades mecânicas do componente final, sendo um recurso com efeitos diretos sobre a performance mecânica da junta soldada e de baixo impacto em relação à sua aplicação no componente, uma vez que não resulta na necessidade de mudanças em equipamentos e materiais, mas somente na otimização da utilização deles através de melhorias nas especificações de projeto.

Os efeitos positivos da presença das marcações abrem precedentes positivos em relação às propriedades mecânicas de juntas soldadas com cordões intermitentes, conferindo ganhos sobre a resistência mecânica global da estrutura antes alcançados de forma isolada e com a necessidade de mudanças significativas em projeto, processos e equipamentos.

5.9 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

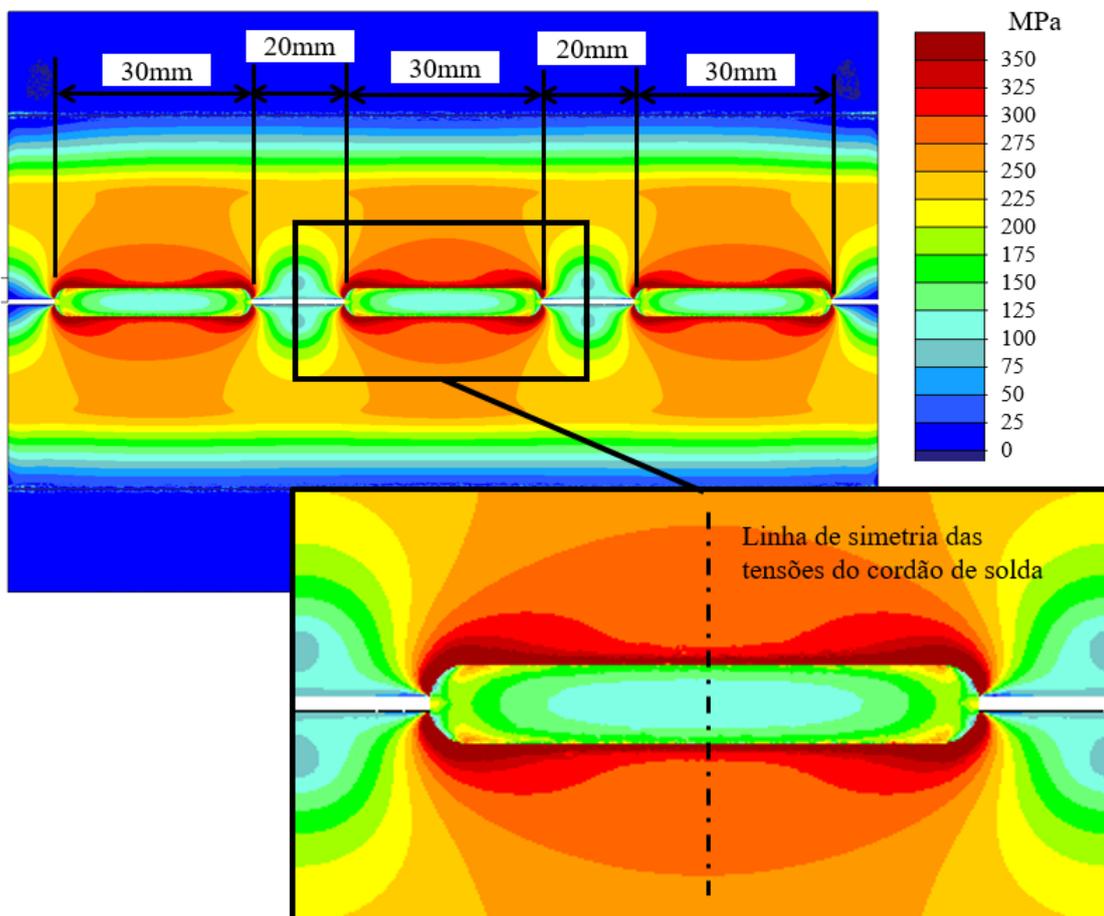
As juntas com e sem as marcações foram caracterizadas estatística e geometricamente, mostrando a superioridade das amostras contendo as marcações, porém o efeito mecânico da variação dimensional no comprimento e espaçamento dos cordões de solda foi verificada

através de análises de EF, concluindo os comparativos experimentais entre as duas técnicas de soldagem. Esta análise suporta a hipótese de que as variações dimensionais, tanto no comprimento quanto no espaçamento, dos cordões afetam as concentrações de tensões e, conseqüentemente, a vida em fadiga das juntas.

5.9.1 Cordões de Solda Equidistantes

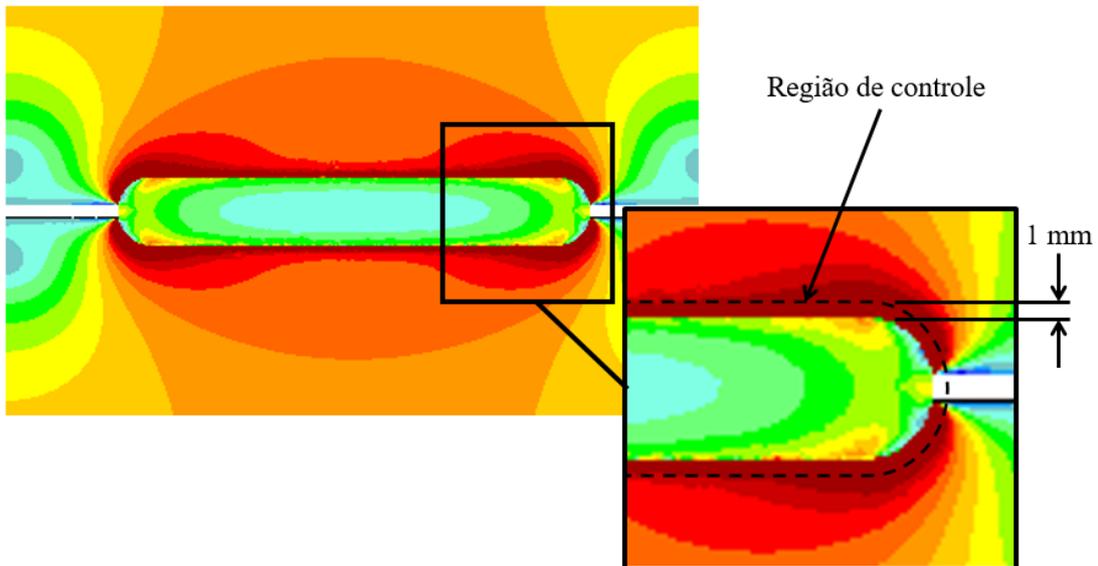
As análises de EF mostraram regiões de concentrações de tensões características da geometria avaliada, possuindo os maiores valores de tensões em regiões próximas às extremidades das juntas, conforme mostrado na figura 54, sendo os locais típicos para o surgimento de falhas por fadiga observados na figura 43. Não há distinção entre início e fim do cordão para as análises de EF deste trabalho, uma vez que os elementos são longitudinalmente simétricos, assim como não são relevantes os níveis de carregamento aplicados, pois o objetivo é obter uma análise comparativa entre as duas amostras. O nível de carregamento pode ser alterado, mas a proporcionalidade das tensões entre as duas amostras será constante.

Figura 54 - Tensões atuantes sobre a amostra contendo os cordões de solda distribuídos de forma equidistante.



As regiões centrais das juntas apresentam uma diminuição das tensões, entretanto todo o contorno do pé do cordão apresenta tensões relativamente elevadas em comparação com as demais regiões da junta, reproduzindo os locais que, na prática, são mais suscetíveis ao surgimento de falhas por carregamentos cíclicos.

Figura 55 - Limite da zona de verificação das tensões atuantes no cordão de solda.



Desta zona tensionada é preciso desconsiderar a região de singularidade, adjacente ao pé do cordão, levando em consideração o tamanho dos elementos da malha da junta. A figura 55 mostra a região do pé do cordão considerada para a verificação das tensões atuantes, sendo que a linha tracejada indica o limite de controle sobre a qual as tensões foram avaliadas em torno da junta, estando localizado a 1 elemento²⁵ de distância da região de transição entre o cordão de solda e o metal de base. Esta região é conhecida como zona de singularidade e foi desconsiderada do estudo.

Com os cordões de solda distribuídos de forma uniforme ao longo da amostra pode ser observada uma simetria na ocorrência das tensões, partindo das regiões centrais das juntas para suas extremidades, o que permite comprovar uma hipótese simples e clara de que a equidistância entre os cordões de solda possui aspectos relevantes sobre a distribuição das tensões atuantes na junta, mantendo o componente em equilíbrio sob a ação de carregamentos externos.

As tensões distribuídas simetricamente ao longo de um componente permitem que, sob a ação de esforços mecânicos, a peça se comporte estruturalmente de forma estável,

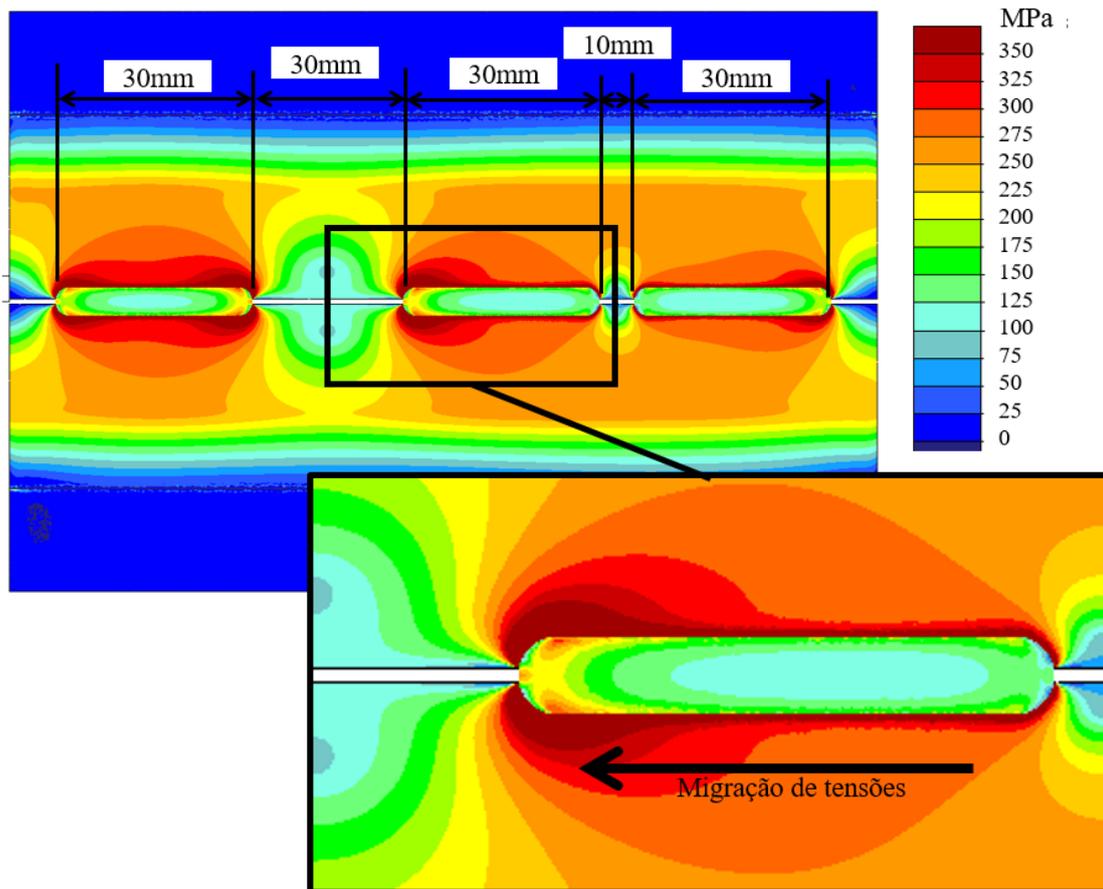
²⁵O elemento mencionado representa o tamanho das unidades que compõem a malha para a análise de EF.

assumindo que ela deve suportar as forças externas de maneira homogênea ao longo de sua extensão. Qualquer elemento que esteja fora dos padrões de equidistância resulta em uma situação de instabilidade estrutural, exigindo análises pontuais para caracterizar seus efeitos sobre o comportamento global do componente.

5.9.2 Cordões de Solda Desiguais

Na avaliação dos corpos de prova com as juntas posicionadas de forma não uniforme, com espaçamentos desiguais entre os cordões, houve um distúrbio importante no campo de concentração de tensões quando comparadas com os resultados obtidos nas amostras com cordões de solda uniformemente distribuídos. As tensões resultantes dessa análise são mostradas na figura 56.

Figura 56 - Tensões atuantes sobre a amostra contendo os cordões de solda distribuídos de forma desigual.



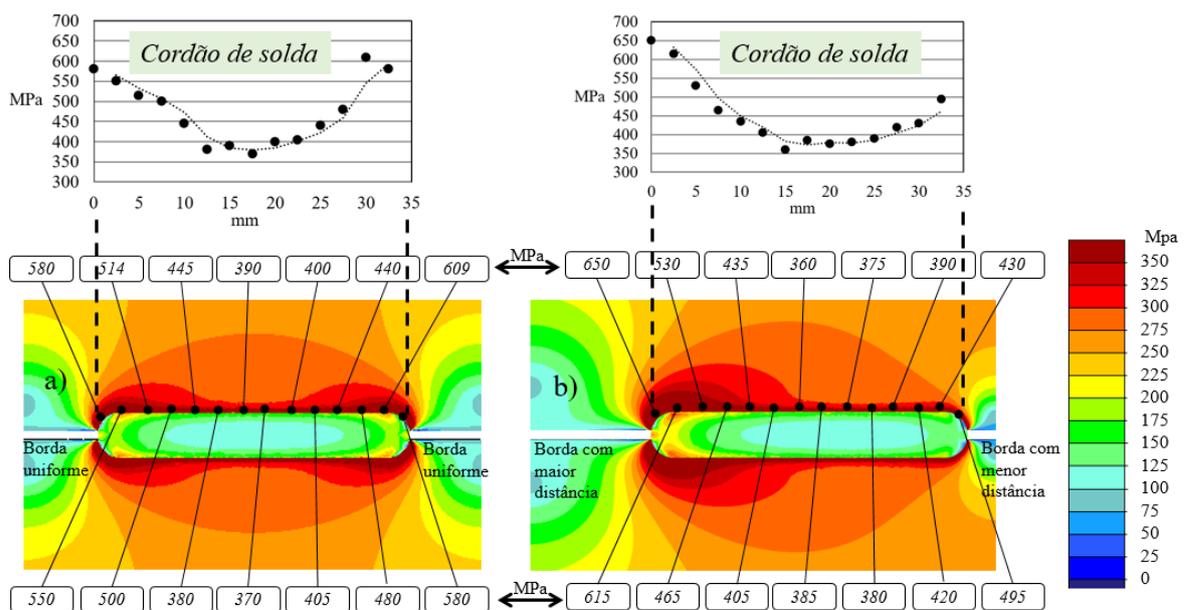
As tensões atuantes nas extremidades das juntas sofreram alterações relevantes em relação às juntas equidistantes, ocorrendo uma diminuição em regiões onde os cordões possuem uma maior proximidade com o elemento vizinho e o consequente aumento delas quando os cordões se afastam.

Estas diferenças de tensões nas extremidades dos cordões de solda são importantes quando avaliadas sob o aspecto do somatório de características que deterioram as propriedades mecânicas da junta, possuindo um grau de importância similar aos efeitos das características geométricas da junta avaliadas neste trabalho, onde a magnitude da individualidade passa a ser relevante quando observada de maneira conjunta, somando os efeitos de várias características que afetam a qualidade da junta soldada, como penetração, variação dimensional nos comprimentos dos cordões de solda e abertura de raiz.

Estas alterações nas concentrações de tensões para cordões com espaçamento não uniformes são resultado basicamente das mudanças na rigidez do componente, fazendo com que as tensões fiquem mais concentradas nas extremidades dos cordões com maior afastamento entre membros.

No cordão central da figura 56 é observada uma migração das tensões para a extremidade da junta onde há um maior afastamento com o elemento vizinho, ou seja, quanto mais afastado um cordão de solda estiver de um ligamento próximo maior será sua responsabilidade para suportar as cargas no componente, invariavelmente resultando no aumento das tensões atuantes sobre o membro e aumentando as chances da ocorrência de falhas sobre ele. A figura 57 mostra quantitativamente esta migração de tensões.

Figura 57 - Variação nas tensões atuantes no cordão de solda central para: a) juntas equidistantes; b) juntas desiguais.



O aumento das tensões observado nas juntas com cordões desiguais resulta, conseqüentemente, no aumento da suscetibilidade de falhas sobre o componente, aumentando a severidade das tensões em uma região crítica para falhas por fadiga.

Pode ser observado na figura 57 que o cordão de solda a), executado com a presença da marcação, possui uma simetria característica nas tensões atuantes ao longo de toda sua extensão, representando o equilíbrio estrutural conferido ao componente quando seus elementos estão uniformemente posicionados ao longo da face de solda. Para o cordão b), executado sem marcação, é observada uma variação importante nas tensões atuantes ao longo da extensão do elemento, ocorrendo uma diminuição das tensões na extremidade da junta onde há maior proximidade com o cordão de solda vizinho, assim como um aumento das tensões na extremidade oposta do elemento, onde houve afastamento com o cordão de solda vizinho.

Esta variação nas tensões ocorre em função do aumento na flexibilidade da junta com o maior distanciamento entre os cordões de solda, o oposto ocorrendo quando os cordões se aproximam, aumentando a rigidez da junta. Com a maior flexibilidade da junta há maior flexão e, conseqüentemente, maior sollicitação mecânica causando o aumento das tensões.

Outro aspecto que vale ser salientado é que a modelagem das amostras para as análises de EF foram feitas considerando as variações dimensionais dos cordões de solda obtidas das amostras ensaiadas por fadiga, fabricadas em ambiente controlado. Na prática as variações dimensionais dos cordões de solda são ainda maiores e podem atuar de forma a potencializar o aumento das tensões na junta. Neste caso, em situações práticas, a severidade das variações nas tensões pode ser consideravelmente maior, assim como qualquer um dos parâmetros avaliados até o momento em relação às variações dimensionais da junta, aumentando a criticidade dos seus efeitos sobre as propriedades mecânicas do componente, especialmente na resistência à fadiga.

A importância desta análise comparativa de EF se detém no efeito visível e importante que o aumento da precisão dimensional dos cordões de solda tem sobre a concentração de tensões da junta. Quando presente a marcação na junta favorece a uniformidade na extensão e posicionamento dos cordões de solda, atuando de forma direta, sem paralelos práticos e teóricos, para simplificar o processo de soldagem e melhorar a precisão dimensional das juntas, minimizando o efeito negativo de fatores, muitas vezes desconhecidos ou difíceis de serem controlados, atuantes na fabricação dos componentes.

Esta comparação é corroborada com os dados obtidos pela análise fractográfica das amostras ensaiadas por fadiga, mostradas na figura 43, onde as situações 2 e 3 descrevem os efeitos que o posicionamento relativo das juntas em relação a elementos vizinhos tem sobre o comportamento das falhas no componente. Na figura 56 é mostrado que o aumento no espaçamento das juntas causa um aumento na concentração de tensões, correlacionando com fato descrito na situação 2 da análise fractográfica da figura 43, onde as regiões das juntas que apresentaram maior espaçamento entre os elementos resultaram em falhas em 100% dos casos.

6 CONCLUSÃO

Tomando como base as amostras ensaiadas por fadiga, as características de comprimento e espaçamento dos cordões aplicados com a utilização das marcações tiveram aumento de 13,6% e diminuição de 21,5%, respectivamente, em relação aos valores especificados em projeto²⁶, comparando com a diminuição de 15,6% e 31,5%, respectivamente, para os mesmos fatores avaliados sem a aplicação das marcações. Comparando entre si o comprimento e espaçamento aplicados por ambos os processos, com e sem marcação, as juntas com marcação apresentaram aproximação de 1,7% e 14,6%, respectivamente, em relação aos valores especificados em projeto, representando o ganho relativo com o uso das marcações²⁷.

Entretanto os principais ganhos ocorreram no aprimoramento dos desvios padrão desses parâmetros, resultando em reduções de 67,8% e 69,7%, respectivamente, para as amostras com a marcação. Esta notável diferença teve seus efeitos representados nos ensaios de fadiga, onde foram observados ganhos importantes na resistência global dos componentes, sendo que as melhorias obtidas, assim como em outras características avaliadas, se tornam valorosas quando somadas às demais pequenas melhorias alcançadas através da melhora na qualidade geométrica dos cordões de solda.

A aplicação da marcação de solda em projeto resultou, em média, em um aumento de 6% no tempo de projeto, considerando todo o ciclo de definição geométrica do componente até seu detalhamento final, 0,8% no tempo de corte da peça pelo processo laser e redução de 50% no tempo do processo de soldagem, englobando a preparação das peças até sua finalização por solda.

O aumento de 6% no tempo de projeto pode ser considerado como único, pois é aplicado somente no desenvolvimento da peça, entretanto os tempos de corte e do processo de soldagem são aplicados a cada novo componente fabricado, considerados durante todo seu ciclo de vida produtiva. O aumento de 0,8% no tempo de corte é desprezível em comparação com a redução de 50% no tempo total do processo de soldagem, visto que o processo de corte a laser é bem difundido na indústria contemporânea e possui custos relativamente baixos em função de sua elevada produtividade. Já o processo de soldagem exige mão-de-obra qualificada e com aumentos reajustados ano a ano, representando,

²⁶Nesta análise o aumento percentual do comprimento do cordão de solda significa que ele se aproxima dos valores especificados em projeto.

²⁷As análises deste parágrafo foram feitas com base nos dados da tabela 19.

conforme apresentado por Miller (2007), o fator de maior impacto no custo do processo de soldagem.

A utilização das marcações na junta soldada melhorou suas propriedades mecânicas, aumentando a vida em fadiga em 65% para o maior nível de carregamento e 100% para o menor nível de carregamento avaliado neste trabalho. Pode ser observado um aumento progressivo da resistência à fadiga à medida que o carregamento diminui, indicando um favorecimento ao aumento da resistência em situações de fadiga de alto ciclo. Entretanto, para fadiga de baixo ciclo, os ganhos também são expressivos, resultando em 65% de aumento mesmo para carregamentos consideravelmente próximos à UTS do componente.

Em relação ao comportamento macrográfico das falhas, foi observada uma homogeneidade tal entre os resultados que corroboram os dados obtidos nas análises microestruturais, com ambas as amostras apresentando características semelhantes entre si, não apresentando aspectos que pudessem influenciar os aumentos significativos na resistência à fadiga para as amostras contendo as marcações.

Para as propriedades microestruturais do produto resultante dos dois métodos de soldagem não foram encontradas características importantes que pudessem diferenciar as amostras, fato reforçado pela uniformidade nos parâmetros utilizados durante a fabricação por soldagem. A presença da marcação não teve impacto significativo sobre a morfologia microestrutural das juntas, proporcionando segurança, do ponto de vista metalúrgico, para sua utilização visando a garantia das propriedades físicas e mecânicas da ZTA.

As observações sobre as características microestruturais valem também para as análises de microdureza da junta, onde pôde ser observado uma similaridade significativa entre as duas amostras, reforçando a homogeneidade das propriedades mecânicas e microestruturais entre as duas técnicas de soldagem.

Em relação à qualidade geométrica da junta, as amostras contendo as marcações tiveram aumentos na penetração e na área de ligação de 29,8% e 12,5%, respectivamente, em relação às amostras fabricadas sem as marcações, o que afeta diretamente os resultados da resistência à fadiga. Sobre esses parâmetros houve a respectiva redução de 75,6% e 235,9% no desvio padrão para as juntas com as marcações, fato que corrobora a efetividade das marcações no controle dessas variáveis, sensíveis ao processo de soldagem.

A fabricação de conjuntos soldados a partir de chapas planas de aço com o uso das marcações resultou em elementos com uma uniformidade dimensional superior aos

aplicados pelo processo atual, contribuindo para a melhoria nas condições dimensionais em relação às características geométricas da junta, o que invariavelmente resultou no aumento da vida em fadiga.

Na análise de EF pôde ser caracterizado que o uso das marcações resultou em efeitos positivos para a diminuição na concentração de tensões ao redor do cordão de solda, onde a variabilidade dimensional dos cordões, ocorrendo quando as marcações não são aplicadas, permite aumentos da ordem de 12%²⁸ (aproximadamente 67 MPa) em comparação com as tensões obtidas em cordões uniformemente distribuídos.

Os três cordões de solda uniformemente distribuídos apresentaram as mesmas tensões em relação a cada região avaliada, início, meio e fim, caracterizados com tensões maiores nas extremidades da junta e tensões menores no centro. Já para os cordões distribuídos de forma desigual o campo de tensões apresentou aumento de 12% (aproximadamente 70 MPa) nas regiões de afastamento das juntas, assim como diminuição de 15% (aproximadamente 85 MPa) nas regiões de maior proximidade das juntas.

Esta diferença nas tensões resulta de uma distribuição das forças mecânicas atuantes na junta para manter a resistência global do componente. Entretanto o deslocamento das tensões para regiões de maior afastamento dos cordões faz com que as falhas sejam preferencialmente iniciadas nessa região. Esta conclusão é reforçada pelos resultados obtidos através da análise da presença de trincas por fadiga nos ensaios mecânicos mostrado na figura 43, onde as falhas ocorreram predominantemente em regiões onde havia maior afastamento entre as juntas.

Esta característica não significa que juntas com maior afastamento, considerando a equidistância especificada em projeto, tendem a falhar mais rapidamente, mas que a variação no espaçamento das juntas, causada principalmente pelo posicionamento manual do bocal de solda, causa uma elevação nas tensões atuantes sobre os elementos com maior afastamento em comparação com os demais, propiciando o acúmulo de tensões e, conseqüentemente, antecipando possíveis falhas por fadiga.

A marcação na junta se mostrou um recurso viável e eficiente para melhorar a previsibilidade das propriedades mecânicas desejadas para o produto final, eliminando variáveis inerentes ao processo de soldagem e ligadas à intrinsecamente à operacionalização

²⁸ Comparação feita sobre os dois pontos de tensão atuantes na extremidade esquerda das juntas mostradas na figura 57.

da do processo, visto a comprovação do efeito negativo que a imprecisão dimensional no comprimento e espaçamento do cordão, de uma forma geral, tem sobre o comportamento mecânico de um componente submetido a carregamentos cíclicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, S. F. et al. Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Metais de Solda Obtidos por Processos de Soldagem Manual e Automatizado utilizado na Soldagem de Aço API 5L X80. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 322-332, dez. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A1011/1011M**: Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, Hot-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy, High-Strength Low-Alloy with Improved Formability, and Ultra-High Strength. Filadélfia, 2008.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.18/A5.18M**: Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielding Arc Welding. Miami, 2005.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M**: Structural Welding Code-Steel. Miami, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8M/E8M**: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials1. Filadélfia, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6656**: Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade – Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

BLANCO, A. J. *et al.* Microestrutura e Propriedades Mecânicas de uma junta Soldada obtida por Processo de Soldagem manual *Gas Metal Arc Welding*. **Unisanta Science and Technology**, Santos, SP, v. 4, n. 2, p. 55-63, dez. 2015. Publicado on line. Disponível em: <<https://periodicos.unisanta.br/index.php/sat>>. Acesso em: 29 janeiro 2021.

BRANCO, C. M.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, P. M. S. T. de. **Fadiga de Estruturas Soldadas**. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 7608**: Guide to fatigue design and assessment of steel products. Londres, 2014.

BRUDER, T; STÖRZEL, J. K.; BAUMGARTNER, H. H. Evaluation of nominal and local stress based approaches for the fatigue assessment of seam welds. **International Journal of Fatigue**, Holanda, v. 34, p 86-102, 2012.

CASAVOLA, C. C.; PAPPALETTERE, C. Discussion on local approaches for the fatigue design of welded joints. **International Journal of Fatigue**, Holanda, v. 31, p. 41-49. 2009.

CASTILLO, E.; CANTELI, A. F. **A Unified Statistical Methodology of Modeling Fatigue Damage**. [S. l.]: Springer, 2009.

CASTRO, J. T. P. de; MEGGIOLARO, M. A. Automation of The Fatigue Design Under Complex Loading. In: I SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE FADIGA DA SAE BRASIL, 2000-01-3334. 2000, São Paulo: 2000. Proceeding Engineering. [S. l.: s. n.], 2000.

DESHMUKH, A. R. et al. Effect of Weld Penetration on Fatigue Life. In: 12th GLOBAL CONGRESS ON MANUFACTURING AND MANAGEMENT. v. 97, 2014. **Procedia**

Engineering. [S. l.]: ELSEVIER, 2015. p. 783-789. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581403344X>>. Acesso em: 29 jan. 2021.

DIMITRAKIS, S. D.; LAWRENCE, F. V. Improving the fatigue performance of fillet weld terminations. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, [S. l.], v. 24, n. 6, p. 429-438, dez. 2001.

DOWLING, N. E. **Mechanical Behaviour of Materials**. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. 4th ed. Harlow, UK: PEARSON, 2013.

DUNG, C. V. et al. Investigations on the Effect of Weld Penetration on Fatigue Strength of Rib-to-Deck Welded Joints in Orthotropic Steel Decks. **International Journal of Steel**, Holanda, v. 15, n. 2, p. 299-310, dez. 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-1**: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Bruxelas, 1992.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN ISO 5817**: Welding – Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) – Quality levels for imperfections. Bruxelas, 2007.

FARAHMAND, B.; BOCKRATH, G.; GLASSCO, J. **Fatigue and Fracture Mechanics of High Risk Parts**: Application of LEFM & FMDM Theory. 1. ed. [S. l.]: SPRINGER, 1997.

FRICKE, W. Fatigue and Fracture of Ship Structures. **Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering**, Hamburg, mar. 2017.

FRICKE, W. Fatigue Analysis of Welded Joints: state of development. **Marine Structures**, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 185-200, 2003.

HAMMERSBERG, P.; OLSSON, H. Statistical evaluation of welding quality in production. In: SWEDISH CONFERENCE ON LIGHT WEIGHT OPTIMIZED WELDED STRUCTURES. 2010, Borlänge, **Proceedings**. Borlänge: [s. n.], 2010. P. 24-25

HAN, C. et al. The effects of robot welding and manual welding on the low– and high-cycle fatigue lives of SM50A carbon steel weld zones. **Advances in Mechanical Engineering**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 1-11, 2019.

IBRAHIM, M. F. E.; MILLER, K. J. DETERMINATION OF FATIGUE CRACK INITIATION LIFE. **Fatigue of Engineering Materials and Structures**, Great Britain, v. 2, p. 351-360, 1980.

INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING. **IIW-1823-07**: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. Paris, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. **EN ISO 6520-1**: Welding an allied processes – Classification of geometric imperfections in metallic materials – Part 1: Fusion welding. Genebra, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. **ISO-12107**. Metallic materials - Fatigue testing - Statistical planning and analysis of data. Genebra, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. **ISO/TR 14345**. Fatigue – Fatigue testing of welded components – Guidance. Genebra, 2012.

KAFFENBERGER, M. et al. Fatigue Resistance of Weld Ends. **Computacional Materials Science**, [S. l.], v. 52, p. 287-292, 2012.

KAH, P; MARTIKAINEN, J. Current Trends in Welding Processes and Materials: Improve in Effectiveness. **Reviews on Advanced Materials Science**, [S. l.], v. 30, n. 2, set. 2012.

KHEDMATI, M. R.; GHAVAMI, K.; RASTANI, M. A comparative study on three different construction methods of stiffened plates-strength behaviour and ductility characteristics. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 2, p. 365-379, jun. 2007.

KHEDMATI, M. R.; RASTANI, M; GHAVAMI, K. Ultimate strength and ductility characteristics of intermittently welded stiffened plates. **Journal of Constructional Steel Research**, [S. l.], v. 65, p. 599-610, 2009.

KIM, I. S. et al. An investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in GMA welding process. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 159, p. 113-118, 2005.

KIRKHOPE, K. J. et al. Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 1: review. **Marine Structures**, [S. l.], v. 12, p. 447-474, 1999.

KWOFIE, S; CHANDLER, H. D. Fatigue life prediction under conditions where cyclic creep-fatigue interaction occurs. **International Journal of Fatigue**, Holanda, v 29, p. 2117-2124, 2007.

LANCASTER, J. F. **Metallurgy of Welding**. 3rd ed. Londres: George Allen & Unwin LTDA, 1980.

LASSEN, T.; RECHO, N. Proposal for a more accurate physically based S-N curve for welded steel joints. **International Journal of Fatigue**, Holanda, v. 31. P. 70-78, 2009.

LENER, G, et al. A numerical method for determining the fatigue strength of welded joints with a significant improvement in accuracy. In: 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON FATIGUE DESIGN, 2017, Senlis. Procedia Engineering. Senlis, ELSEVIER, 2018. P. 359-373.

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre, 1997.

MADDOX, S, J. Fatigue Design Rules for Welded Structures. **Progress in Structural and Materials**. [S. l.], v 2, n. 1, p. 102-109, mar. 2000.

MERT, T. Finite Element Analysis of Effect of Weld Toe Radius and Root Gap on Fatigue Life of T-Fillet Welded Joint. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ARTS AND SCIENCES, 2009, v. 1, n. 20, Turkey. **CD-ROM**, [S. l.: s. n.], 2009. p. 119-127, 2009.

METTERNICH, J. et. al. Volume and Mix Flexibility Evaluation of Lean Production Systems. In: 2nd CIRP GLOBAL WEB CONFERENCE, 9. 2013. **Procedia CIRP**, [S. l.: s. n.], 2013. p. 79-84.

MILLER. **Understanding Key Welding Business Issues And Turning Them into Opportunities**. Nov. 2007. Disponível em: <<https://www.millerwelds.com/resources/article-library/understanding-key-welding-business-issues-and-turning-them-into-opportunities>>. Acesso em: 28 janeiro 2021.

MISHRA, R. S.; Ma, Z. Y. Friction Stir Welding and Processing. **Materials Science & Engineering**, [S. l.], n. 50, p. 1-78, 2005.

MOORE, P.; BOOTH, G. *The Welding Engineer's Guide to Fracture and Fatigue*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015.

MUGHRABI, H. Microstructural mechanisms of cyclic deformation, fatigue crack initiation and early crack growth. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, Erlangen, v. 373, 2015.

MUNSE, W. **Fatigue of Weldments**. Tests, Design, and Service. Filadélfia: D. W. HOEPPNER, 1978.

MURTAZA, G.; AKID, R. Modelling short fatigue crack growth in a heat-treated low-alloy steel. **International Journal of Fatigue**, Great Britain, v. 17, n. 3, p. 207-214, 1995.

NEGRA, C. A. S.; NEGRA, E. M. S.; NUNES, F. T. Redução de Custos Pelo Estudo de Tempos e Movimentos Aplicados em Manufatura de Aço Inoxidável em Pequena Empresa. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, [S. l.: s. n.], 2009.

OKAWA, T. et al. **Fatigue Life Prediction of Welded Structures Based on Crack Growth Analysis**. [S. l.]: Nippon Steel Technical Report, 2013. 6 p.

PARIS, P. C. et al. Extensive Study of Low Fatigue Crack Growth Rates in A533 and A508 Steels. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON FRACTURE MECHANICS PART 1, 1971, Illinois. **Proceedings Stress Analysis and Growth of Cracks**, Illinois: American Society For Testing And Materials, 1971. p. 141-176.

RASBAND, W. S. ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, 2020.

REEMSNYDER, H. S. Development and applications of Fatigue Data for Structural Steel Weldments. In: FATIGUE TEST OF WELDMENTS, 1977, Toronto. **Proceedings**, Filadélfia, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1978. p. 3-21.

ROSA, E. da. **Análise de Resistência Mecânica de Peças e Componentes Estruturais**. Mecânica da Fratura e Fadiga. 2002. 407 p. Editado pelo autor. Revisão Técnica.

SAE. **Fatigue Design Handbook**. 3rd ed. SAE, 1997.

SARZOSA, D. F. B.; GODEFROID, L. B.; RUGGIERI, C. Fatigue crack growth assessments in welded components including crack closure effect: Experiments and 3-D numerical modeling. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 47, p. 279-291, 2013.

SCHORK, B. et al. The effect of the local and global weld geometry as well as material defects on crack initiation and fatigue strength. **Engineering Fracture Mechanics**, Great Britain, 2018.

SCHÜTZ, Walter. A history of fatigue. **Engineering Fracture Mechanics**, Great Britain, v. 54, n. 2, p. 263-300, 1996.

SHAMS, E.; VORMWALD, M.. Fatigue of Weld Ends under Combined Loading. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 100, p. 627-638, 2016.

SHIP STRUCTURE COMMITTEE. **SSC-400**. Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques. Washington D.C., 1997.

SIK, A. et al. The Design of Fatigue Strength Machine Being One of the Methods for Determining the Mechanical Properties of the Materials Used in the Industry. **Journal of Science**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 79-88, 2018.

SOARES, J, C, F; NASCIMENTO, A, J, L; TEIXEIRA, F, G, M. Automação do Processo de Soldagem Manual Semiautomático GMAW Visando Melhoria da Qualidade do Produto. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2016, Foz do Iguaçu. **Anais**, [S. l.: s. n.].

SONSINO, C.M. Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 29, p. 2246-2258, 2007.

SSAB. **Design Handbook**. Structural Design and Manufacturing in High-Strength Steel. 1 ed. Borlänge, 2009.

STENBERG, T. et al. Quality Control and Assurance in Fabrication of Welded Structures Subjected to Fatigue Loading. **Weld World**, [S. l.], v. 61, p. 1003-1015, 2017.

STEPHENS, R. I. et al. **Metal Fatigue in Engineering**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

SUGITANI, D; MOCHIZUKI, M. Experimental Study on Effects of Root Gap and Fillet Size of Welds on Joint Strength. **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, [S. l.], v. 31, n. 4, p. 104-108, 2013.

TREMARIN, R. C.; PRAVIA, Z. M. C. Previsões de Vida Fadiga Segundo Normas Técnicas: uma Revisão Crítica. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 22, n. 3, p. 281-299, set. 2017.

TU, S. T.; ZHANG, X. C. Fatigue Crack Initiation Mechanisms. **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**, Shanghai, 2016.

TWI (The Welding Institute). **Fatigue Testing**. Disponível em: <<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/fatigue-testing-078>>. Acesso em: 14 dez. 2019.

UPADHYAYA, Y. S.; SRIDHARA, B. K. Fatigue Crack Initiation and Propagation Life Prediction of Materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL, ELECTRONICS AND MECHATRONICS ENGINEERING, 2012, Bankcok. **Proceedings**, [S. l.: s. n.], 2012.

WANHILL, R. J. H. et al. **Milestone Case Histories in Aircraft Structural Integrity**. Holanda: National Aerospace Laboratory NLR, 2016.

WEIDNER, A.; LIPPMANN, T.; BIERMANN, H. Crack initiation in the very high cycle fatigue regime of nitrided 42CrMo4 Steel. **Journal of Material Research**, [S. l.], v. 32, n. 23, dez. 2017.

ZACHARY, L. W.; BURGER, C. P. Stress Concentration in Double Welded Partial Joint Penetration Butt Weld. **Welding Journal**, [S. l.], v. 55, n. 3, p. 77–82, 1976.

ZHANG, Y.; MADDOX, S. J. Fatigue life prediction for toe ground welded joints. **International Journal of Fatigue**, Great Britain, v. 31, n. 7, p. 1124-1136, jul. 2009.

ZHANG, Y.; GAO, L.; WANG, C. A prediction model for low cycle fatigue crack initiation under axial loading. In: 13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE, 2013, Beijing. **Proceedings**, [S. l.: s. n.], 2013.

YILIRIM, H. C. Recent results on fatigue strength improvement of high-strength steel welded joints. **International Journal of Fatigue**, Great Britain, v. 101, p. 408-420, 2017.