

Nasareno das Neves

**Estudo da influência da frequência de alimentação dinâmica do processo
de soldagem TIG automático no comportamento de fadiga axial do aço
C-Mn-Si.**

Guaratinguetá-SP

2022

Nasareno das Neves

**Estudo da influência da frequência de alimentação dinâmica do processo
de soldagem TIG automático no comportamento de fadiga axial do aço
C-Mn-Si.**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica em
Materiais e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Herman Jacobus
Cornelis Voorwald

Guaratinguetá-SP

2022

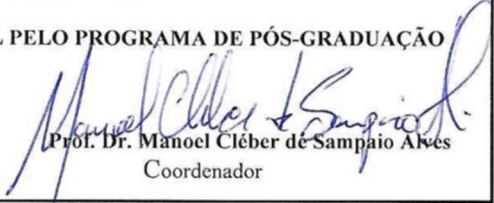
N518e	Neves, Nasareno das Estudo da influência da frequência de alimentação dinâmica do processo de soldagem TIG automático no comportamento de fadiga axial do aço C-Mn-Si / Nasareno das Neves – Guaratinguetá, 2022 143 f. : il. Bibliografia: f. 114-120 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald 1. Soldagem. 2. Juntas (Engenharia). 3. Materiais - Fadiga. I. Título. CDU 621.791(043)
-------	---

NASARENO DAS NEVES

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

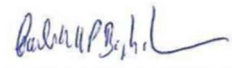

Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. HERMAN JACOBUS CORNELIS VOORWALD

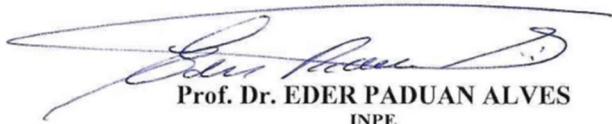
Orientador - UNESP

participou por videoconferência


Prof. Dr. CARLOS ANTONIO REIS PEREIRA BAPTISTA

EEL - USP

participou por videoconferência


Prof. Dr. EDER PADUAN ALVES

INPE

participou por videoconferência


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO

UNESP

participou por videoconferência


Prof. Dr. RONALDO PINHEIRO DA ROCHA PARANHOS

UENF/RJ

participou por videoconferência

JUNHO de 2022

DADOS CURRICULARES

NASARENO DAS NEVES

NASCIMENTO 07/12/1956 – São Paulo do Potengi / RN

FILIAÇÃO Melquíades Domingues das Neves
Isabel das Neves

1978/1982 Tecnólogo em Soldagem
Faculdade de Tecnologia-São Paulo

1985/1988 Engenheiro Mecânico
Universidade de Taubaté-UNITAU.

1990/1993 Mestrado em Engenharia Mecânica
FEG/UNESP

1998/2000 MBA em Gestão Empresarial
Fundação Getúlio Vargas-FGV

2011/2011 AMP- Advanced Management Programme
INSEAD, Fontainebleau, France

Meus pais, Melquíades (in memoriam) e Isabel, minha esposa Shirlei, meus filhos Wagner e Thais, e, por fim, aos meus netos Pedro, Eduardo, Júlia e Antonella, a quem dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr Herman Cornelius Voorwald pelo incentivo e valiosas recomendações desde o início do desenvolvimento deste trabalho.

À FAPESP pelo apoio e financiamento da parte relevante dos equipamentos, através do projeto FAPESP Nr. 2018/18904-7.

Ao colega Martin Ferreira Fernandes, pesquisador do DMT da FEG –UNESP, pelo apoio incondicional em todas as atividades do projeto.

Ao colega Dr. Eder Paduan, pesquisador do CTA e INPE, pelo apoio incondicional nas atividades do projeto.

Ao AMR – CTA, à Dra. Adriana Medeiros Gama, pelo apoio incondicional em todas as atividades do projeto e em especial aos pesquisadores Doutores João Marcos Kruszynski e Christian Frederico de Ávila Von Dollinger, pelo apoio incondicional nas atividades com MEV e caracterização microestrutural do projeto.

À diretoria da FEG/UNESP e ao time de professores e pesquisadores do DMT da FEG – UNESP.

Ao colega Prof. Juliano Pano da FATEC-SP, pelo apoio incondicional nas atividades do projeto.

À FATEC-SP pelo engajamento do projeto, em especial ao Diretor Décio Moreira e aos Departamentos de Soldagem, Mecânica e Ensino Geral.

Ao Centro Paula Souza, CESU – Coordenação De Ensino Superior do CPS.

À FAT – Fundação de apoio a Tecnologia – pelo financiamento dos projetos de modernização do laboratório de soldagem da FATEC-SP.

Ao Prof. Dr. Jair Dutra do Departamento de Mecânica da UFSC pela contribuição e apoio incondicional ao projeto.

Aos times de Professores e colaboradores do Labsolda e Labmetro da UFSC.

Aos fornecedores dos equipamentos SPS E IMC, em especial agradecemos a IMC pelo empréstimo da fonte soldagem.

Aos fornecedores dos serviços de usinagem dos corpos de prova, Brenga-Tec Ltda, pela dedicação e qualidade dos trabalhos realizados.

Ao aluno de Mestrado Luiz Otavio Barreto de Sampaio Alves, pelo apoio no início do projeto.

À aluna de Engenharia Mecânica Patrícia Stella de Oliveira Martins da Silva, pela contribuição nos ensaios de micro dureza.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - número do processo 2018/18904-7.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Martin Luther King

RESUMO

A literatura e normas técnicas demonstram que os processos convencionais de soldagem, ao arco elétrico, reduzem a vida em fadiga das juntas soldadas em relação ao metal base. Referências de grande relevância encontram-se nos segmentos aeronáutico, óleo e gás e mineração. As estruturas marítimas para as plataformas *off shore* contemplam critérios de projetos para compensar a redução da resistência à fadiga nas juntas soldadas e as peneiras vibratórias são montadas com parafusos. No entanto, neste trabalho, o processo de soldagem GTAW-DWF (*Gas Tungsten Arc Welding-Dynamic Wire Feeding*) com alimentação dinâmica de arame nas frequências de 0,5, 5, 10 e 15 Hz aumentou as propriedades de fadiga em relação ao processo convencional (C-GTAW) e ao metal base (A 516-70) não soldado. A investigação baseou-se em ensaios de fadiga axial ($R=0,1$) à temperatura ambiente, ensaios de microdureza, análise microestrutural, medidas de espaçamento dendrítico secundário (SDAS), microscopia eletrônica de varredura (MEV) das fraturas por fadiga e análise de distribuição Weibull. Os mecanismos associados à morfologia dendrítica na zona bruta de fusão das soldas morfologia de solidificação foram discutidos. Utilizou-se microscopia ótica e uma metodologia inédita para medição dos valores de espaçamento dos braços dendríticos secundários (SDAS), com o recurso do Image J para padronização do processamento das imagens das micrografias das zonas brutas de fusão das soldas. Os valores de SDAS foram $(5 \pm 0,8)$, $(4 \pm 1,0)$, $(2 \pm 0,3)$ e $(4 \pm 0,7)$ μm para o processo GTAW-DWF com frequências de 0,5, 5, 10 e 15 Hz, respectivamente, em comparação com $(6 \pm 1,4)$ μm do processo convencional. Menores dimensões do SDAS no processo GTAW-DWF e a ausência de micro defeitos de solidificação foram associados à melhoria da vida em fadiga. A vida em fadiga do processo GTAW-DWF com juntas soldadas de 10 Hz foi incrementada de 3.288 para 115.356 ciclos (3.408%) e de 12.027 para 522.143 ciclos (4.241%) para níveis máximos de tensão de 534 MPa e 481 MPa respectivamente, em comparação com o processo GTAW convencional. Os resultados indicam também a tendência de aumento significativo na resistência à fadiga das juntas soldadas em relação ao metal base não soldado.

PALAVRAS-CHAVE: Alimentação dinâmica. Frequência. Juntas soldadas. Soldagem. GTAW. A516-70. Fadiga axial

ABSTRACT

The literature and technical standards demonstrate that conventional electric arc welding processes reduce the fatigue life of welded joints related to base metal. References of great relevance are found in the aeronautical, oil and gas and mining segments. The marine structures for off shore platforms include design criteria to compensate for the reduction in fatigue resistance in the welded joints and the vibrating screens are mounted with screws. However, in this work, the GTAW-DWF (Gas Tungsten Arc Welding-Dynamic Wire Feeding) welding process with dynamic wire feed at frequencies of 0.5, 5, 10 and 15 Hz improved the fatigue properties in relation to the process conventional (C-GTAW) and non-welded base metal (A 516-70). The investigation was based on axial fatigue tests ($R=0.1$) at room temperature, microhardness tests, microstructural analysis, measurements of secondary dendritic spacing (SDAS), scanning electron microscopy (SEM) of fatigue fractures and analysis Weibull distribution. The mechanisms associated with dendritic morphology in the raw melt zone of solidification morphology welds were discussed. The pictures obtained by light optical microscopy and an unprecedented methodology were used to measure the values of spacing of the secondary dendritic arms (SDAS), using Image J to standardize the processing of the images of the micrographs of the weld metal zones of the welded joints. The SDAS values were (5 ± 0.8) , (4 ± 1.0) , (2 ± 0.3) and (4 ± 0.7) μm for the GTAW-DWF process with frequencies of 0.5, 5, 10 and 15 Hz, respectively, compared to (6 ± 1.4) μm of the conventional process. Smaller dimensions of the SDAS in the GTAW-DWF process and the absence of solidification micro defects were associated with improved fatigue life. Fatigue life of the GTAW-DWF process with 10 Hz ON welded joints was increased from 3,288 to 115,356 cycles (3,408%) and from 12,027 to 522,143 cycles (4,241%) for maximum stress levels of 534 MPa and 481 MPa respectively, in compared to the conventional C-GTAW process. The results also indicate a trend towards a significant increase in the fatigue strength of welded joints in relation to the non-welded base metal.

KEYWORDS: Dynamic feeding. Frequency. Welded joints. Welding. GTAW. A516-70. Axial Fatigue

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de Soldagem TIG.....	29
Figura 2 – Técnicas operatórias com o processo TIG manual.....	29
Figura 3- Contato do arame consumível com a poça de fusão (a) ponte e (b) intermitente.....	30
Figura 4- Mecanismo de avanço e retorno do conjunto tracionado de arame consumível.....	30
Figura 5- Ábaco Resistência à fadiga curvas S-N para aços (IIW).....	33
Figura 6- Entalhe geométrico: perfil da concentração de tensões nas margens da solda.....	33
Figura 7- Métodos global e localizado para análise das tensões e resistência a fadiga das juntas soldadas.....	34
Figura 8- Carregamento com amplitude constante e Curva S - N em escala logaritmo.	34
Figura 9- Hipótese do dano acumulado de Palmgren-Miner.....	35
Figura 10- Tensão nominal em vigas soldada.....	36
Figura 11- Localizações de nucleação de trincas de fadiga.....	36
Figura 12- Entalhe Geométrico (a) - Perfil de tensões nas margens da solda.....	37
Figura 13 - Entalhe Geométrico (b) - Perfil de tensões nas margens da solda.....	37
Figura 14- Entalhe Geométrico (c) - Perfil de tensões nas margens da solda.....	37
Figura 15- Entalhe Geométrico (d) - Perfil de tensões nas margens da solda	38
Figura 16- Modelo do IIW- Entalhe Geométrico com raio de referência nas margens da solda.....	38
Figura 17- Modelo de solidificação do cordão de solda.....	40
Figura 18- Etapas de solidificação do cordão de solda.....	41
Figura 19- Modelo de nucleação e crescimento das dendritas.....	42
Figura 20 Evidência das extremidades dendríticas em soldas.....	43
Figura 21- Modelo de medição das dendritas em soldas.....	43
Figura 22- Modelo de nucleação e crescimento das dendritas.....	44
Figura 23 - TARTÍLOPE V3 – (V2F+Eixo AVC).....	46
Figura 24- Tela do Sistema SAP para aquisição dos parâmetros de Soldagem em tempo real.....	48

Figura 25 -Módulo de Alimentação Dinâmica - MAD – Modelo A7PMDAC.....	48
Figura 26 – Equipamentos Montados na Bancada de testes.....	49
Figura 27 - Preparação para soldagem.....	49
Figura 28 - Amostra de deposição sobre chapa com alimentação dinâmica dos experimentos executados no Labsolda-UFSC.....	50
Figura 29 - Vista de topo do primeiro corpo de prova soldado com alimentação dinâmica no laboratório de soldagem da Fatec-SP.....	51
Figura 30 - Montagem da junta de topo com chanfro duplo V na preparação para soldagem com alimentação dinâmica no laboratório de soldagem da Fatec-SP.....	52
Figura 31 - Variáveis geométricas do processo TIG com alimentação dinâmica na FATEC-SP.....	53
Figura 32 - Preparação da junta para soldagem.....	54
Figura 33 - Junta soldada com penetração total.....	54
Figura 34 - Preparação para soldagem: Ponteamento com GTAW-DWF.....	55
Figura 35 - Soldagem do primeiro passe com GTAW-DWF.....	56
Figura 36 - Acabamento das soldas com GTAW – DWF (A e B).....	56
Figura 37 - Penetração total na raiz (A, B e C).....	57
Figura 38- Penetração total com segundo passe de solda.....	57
Figura 39- Ilustração do layout de retirada dos corpos de prova.....	58
Figura 40 – Dimensões do corpo de prova de tração nas juntas soldadas.....	59
Figura 41 – Dimensões do corpo de prova de tração do metal base.....	59
Figura 42 – Dimensões do corpo de prova de fadiga.....	60
Figura 43 – Posição dos pontos de micro durezas.....	62
Figura 44 – Padrões de cinza ImageJ.....	64
Figura 45 - Método D para análise das dendritas.....	65
Figura 46- Exemplo de medição de SDAS com ImageJ C-GTAW.....	66
Figura 47- Macrografias de juntas soldadas.....	68
Figura 48 – Corpos de Prova de Tração.....	70
Figura 49(a) – Ruptura do Corpo de Prova de Tração-GTAW-DWF 10Hz.....	70
Figura 49(b) – Ruptura do Corpo de Prova de Tração-GTAW-DWF 10Hz.....	71
Figura 50 - Gráfico Tensão Deformação.....	71
Figura 51 - Ensaio de fadiga axial na Instron 8801.....	73
Figura 52 - Detalhe da nucleação da trinca no Ensaio de fadiga axial na Instron 8801..	74

Figura 53 - Ensaio de fadiga axial no metal base “como laminado” na Instron 8801....	74
Figura 54 – Macrografia do C-GTAW após Ensaio de fadiga axial	75
Figura 55 - Vida em fadiga do metal base (lixado e “como laminado”) e processo C-GTAW.....	76
Figura 56 - Vida em fadiga das juntas soldadas com processo automático GTAW - DWF com frequência de 0,5; 5; 10 e 15 Hz.....	76
Figura 57- Curvas σ_{max} . x N para o processo GTAW-DWF em comparação com o material base.....	78
Figura 58- Curvas σ_{max} . x N para o processo GTAW-DWF em comparação com o material base e C-GTAW.....	79
Figura 59 - Curvas σ_{max} . x N: GTAW-DWF 0,5 Hz e Metal Base.....	80
Figura 60- Curvas σ_{max} . x N: GTAW-DWF 5 Hz e Metal Base.....	80
Figura 61- Curvas σ_{max} . x N: GTAW-DWF 10 Hz e Metal Base.....	81
Figura 62- Curvas σ_{max} . x N: GTAW-DWF 15 Hz e Metal Base.....	81
Figura 63- Curvas σ_{max} . x N: GTAW-DWF 0,5 5 10 e 15 Hz e Metal Base.....	82
Figura 64- Gráficos de regressão linear.....	86
Figura 65- Perfis de micro dureza HV0,5 para C-GTAW e GTAW-DWF na seção transversal do cordão de solda.....	87
Figura 66 - C-GTAW- Microestruturas.....	89
Figura 67 - C-GTAW.....	90
Figura 68- GTAW -DWF 0,5 Hz (microestrutura).....	91
Figura 69 - GTAW - DWF 0,5 Hz	92
Figura 70- GTAW -DWF 5Hz (microestrutura).....	93
Figura 71- GTAW - DWF 5 Hz	94
Figura 72- GTAW -DWF 10Hz (microestrutura).....	95
Figura 73- GTAW -DWF 10Hz – Linha de Fusão.....	96
Figura 74- GTAW-DWF 15Hz (microestrutura).....	97
Figura 75- GTAW-DWF 15Hz Linha de Fusão.....	98
Figura 76 - Microestrutura dendrítica representativa próxima ao centro dos cordões de solda.....	99
Figura 77- (a) Média global do espaçamento dos braços dendríticos secundários.....	100
Figura 77- (b) Média global do espaçamento dos braços dendríticos secundários e correlação com resistência fadiga.....	101

Figura 78 - Paineis do SAPVADA4.43. Soldagem com 10 Hz. Pico de $V_a = 17,5$ m/min - FATEC-SP.....	102
Figura 79- Paineis do SAPVADA 4.43. Soldagem com 5 Hertz. Pico de $V_a = 7,3$ m/min - FATEC-SP.....	102
Figura 80- Paineis do SAPVADA4.43. Soldagem com 0,5 Hertz. Pico de $V_a = 3,6$ m/min - FATEC-SP.....	103
Figura 81 - C-GTAW Micro cavidades de fusão/solidificação (setas)-frentes de solidificação (MEV 700X).....	104
Figura 82 - C-GTAW Micro cavidades de fusão/solidificação (setas) – (MEV 2.000X).....	104
Figura 83 - C-GTAW Cavidade extensas- falta de fusão/solidificação (setas). (MEV 2.000X).....	105
Figura 84 - C-GTAW Visão detalhada da Micro falta de fusão/solidificação (MEV 10.000X).....	105
Figura 85 - GTAW-DWF 0.5 Hz. (MEV 2.000X).....	106
Figura 86- GTAW-DWF 5Hz. (MEV 2.000X).....	106
Figura 87 - GTAW-DWF 10 Hz. (MEV 2.000X).....	107
Figura 88 - GTAW-DWF 15 Hz. (MEV 2.000X).....	107
Figura 89 – Nucleação da trinca de fadiga nas bordas C-GTAW MEV.....	108
Figura 90 – Nucleação da trinca de fadiga nas bordas 3 e 4 GTAW-DWF 0,5 Hz. MEV.....	108
Figura 91 – Nucleação da trinca de fadiga nas bordas 4 GTAW-DWF 5 Hz. MEV.....	109
Figura 92 – Nucleação da trinca de fadiga nas bordas GTAW-DWF 5 Hz. MEV.....	109
Figura 93 – Nucleação da trinca de fadiga nas bordas GTAW-DWF 10 Hz. MEV.....	110
Figura 94 – Nucleação da trinca de fadiga nas bordas GTAW-DWF 15 Hz. MEV.....	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Resistência à fadiga x concentradores de tensão nas estruturas soldadas.....	39
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetro de soldagem para deposição de cordões sobre chapa.....	50
Tabela 2- Parâmetros de Soldagem.....	55
Tabela 3 – Ensaio de tração: Junta Soldada e Metal Base.....	69
Tabela 4- Rugosidade média (Ra).....	72
Tabela 5- Composição Química (Peso %).....	72
Tabela 6- Parâmetros alfa (escala) e beta (forma) da distribuição Weibull para as condições Metal Base, C-GTAW e GTAW-DWF 10 Hz a níveis de tensão de 535 MPa, 512 MPa e 481 MPa.....	83
Tabela 7 - Análise de Weibull: vidas em fadiga para condições Metal Base, C-GTAW e GTAW-DWF 10 Hz a níveis de tensão de 535 MPa, 512 MPa e 481 Mpa.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISC	American Institute of Steel Construction
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AVC	Arc Voltage Control
AWS	American Welding Society
CA	Carregamento com amplitude constante
CDP	Corpo de Prova
CEETPS	Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”
CPS	Centro Paula Souza
CSA	Canadian Standards Association
CTOD	Crack Tip Opening Displacement
DWF	Dynamic Wire Feeding
DEMB	Distância Eletrodo Metal Base
EER	Extensômetro Elétrico de Resistência
EN	European Norm
EWTh-2	Eletrodo de tungstênio com 2% de oxido de tório
FAT	Fundação Apoio à Tecnologia
FAT _x	Fatigue Design Curve. Curvas S – N, x = tensão em MPa a 2×10^6 ciclos
FATEC	Faculdade de Tecnologia
FEG	Faculdade de Engenharia Guaratinguetá
f	Frequência de avanço e retorno do arame
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
Heat Input	Calor adicionado
Hv	Dureza Vickers
I	Corrente no arco
IHM	Interface Homem Máquina
IIW	International Institute of Welding
IMC	Engenharia de Soldagem Instrumentação e Automação
J	Integral J
LCD	Liquid Crystal Display
LRFD	Load and Resistance Factor Design
LSD	Limit States Design

LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NDT	Non Destrutivo Testing
NBR	Norma Brasileira Registrada
NRCC	National Research Council of Canada
PT	Ponto de Trabalho
Ra	Recuo médio do arame
SAP	Sistema de Aquisição de Parâmetro de Soldagem
SDAS	Secondary Dendritic Arm Spacing
SPS	Soluções para Soldagem Ltda
TIG	Tungsten Inert Gas
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USIMINAS	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A.
V	Tensão no Arco
VA	Carregamento com amplitude variável
Va	Velocidade Nominal de Alimentação de Arame
Vs	Velocidade de Soldagem
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

α	ângulo arame x peça
Ar	Argônio
B	comprimento
c	calor específico
Ec	número de Eckert
f	frequência Hz
FAT _x	Classificação das curvas S – N, x = tensão em MPa a 2×10^6 ciclos
h	espaço
H	espessura de material sinterizado
k	relação entre os coeficientes de condutividade térmica
p	parâmetro adimensional de pressão
σ	tensão
$\Delta\sigma =$	$\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$
$\sigma_{\max}$	Tensão Máxima
$\sigma_{\min.}$	Tensão Mínima
3D	Três dimensões
Th	Elemento tório
W	Elemento tungstênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVO.....	27
1.1.1 Objetivos específicos.....	27
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	28
2.1 SOLDAGEM	28
2.1.1 C-GTAW.....	28
2.1.2 C-GTAW alimentação dinâmica.....	30
2.2 FADIGA.....	31
2.2.1 Fadiga nas estruturas soldadas.....	31
2.3 MECANISMOS DE SOLIDIFICAÇÃO NAS SOLDAS.....	39
2.3.1 Dendritas.....	41
2.4 METODOLOGIA COM MICROSCOPIA ÓTICA PARA MEDIÇÃO DAS DENDRITAS EM SOLDAS.....	42
3 MATERIAIS e MÉTODOS	45
3.1 MATERIAIS.....	45
3.2 MÉTODOS.....	45
3.2.1 Preparação da infraestrutura na FATEC- São Paulo.....	45
3.2.2 Especificação dos equipamentos	45
3.2.2.1 Equipamentos para soldagem.....	46
3.2.3 Montagem dos sistemas para Soldagem.....	48
3.2.4 Comissionamento e testes dos sistemas para Soldagem.....	49
3.2.5 Projeto das juntas, corte e usinagem dos chanfros das chapas de testes com Metal Base A 516-70 com espessura 6,35mm	51
3.2.5.1 Experimentos preliminares e simulações dos parâmetros de soldagem e identificação das variáveis secundárias no processo TIG Automático com alimentação dinâmica	52
3.2.6 Procedimentos de Soldagem.....	53
3.2.7. Layout para retirada dos corpos de prova.....	57
3.2.8 Testes de Tração.....	58
3.2.9 Testes de fadiga axial.....	59
3.2.9.1 Perfil de Rugosidade.....	61

3.2.10 Distribuição Weibull.....	61
3.2.10.1 Análise estatística.....	62
3.2.11 Microestrutura e micro dureza de soldas.....	62
3.2.12 Procedimento experimental para micrografias.....	63
3.2.13 Imagens digitais.....	64
3.2.14 Espaçamento interdendrítico.....	65
3.2.15 Análise de grãos dendríticos e padrões de solidificação.....	65
3.2.16 Calibração da medição do espaçamento Inter dendrítico utilizando-se o ImageJ.....	67
3.2.17 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas fraturas de Fadiga.....	67
4 RESULTADOS e DISCUSSÃO.....	68
4.1 PENETRAÇÃO E QUALIDADE DAS SOLDAS.....	68
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	69
4.3 RUGOSIDADE.....	72
4.4 ANÁLISE QUÍMICA.....	72
4.5 ENSAIOS DE FADIGA.....	73
4.5.1 C-GTAW convencional e metal base.....	75
4.5.1.1 GTAW - DWF	76
4.5.1.2 GTAW - DWF Metal Base.....	77
4.5.2 GTAW -DWF e Metal Base.....	79
4.6 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL DOS RESULTADOS DE FADIGA.....	82
4.7 REGRESSÃO LINEAR DOS RESULTADOS DE FADIGA.....	84
4.8 MICRODUREZA NAS JUNTAS SOLDADAS.....	86
4.9 MICROESTRUTURAS NAS JUNTAS SOLDADAS.....	88
4.10 MEDIÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE BRAÇOS DENDRÍTICOS SECUNDÁRIOS.....	98
4.11 ANÁLISE DA VELOCIDADE DO ARAME NO PROCESSO GTAW-DWF.....	101
4.11.1 Tempos de interação do arame na poça de fusão.....	103
4.12 ANÁLISE DE FRATURAS	103
5 CONTRIBUIÇÕES DE INOVAÇÕES NO CONHECIMENTO CIENTÍFICO....	111
6 CONCLUSÕES.....	112
6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	113
REFERÊNCIAS.....	114

ANEXO 1 – MATERIAL COMPLEMENTAR DAS ANÁLISES DESENVOLVIDAS COM MICROSCOPIA ÓTICA E IMAGEJ.....	121
ANEXO 1.1 - ANÁLISES DA ZONA FUNDIDA DAS SOLDAS.....	121
ANEXO 1.2 POSIÇÃO 98 - 200X - GTAW MANUAL CONVENCIONAL.....	121
ANEXO 1.3. POSIÇÃO 98-1 HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGE J.	121
ANEXO 1.4. POSIÇÃO 98- HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGE J...	122
ANEXO 1.5. POSIÇÃO 98-3. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGEJ.	122
ANEXO 1.6. POSIÇÃO 98 – GTAW- AD – FREQUÊNCIA 0,5 HZ.....	122
ANEXO 1.7. POSIÇÃO 98-1. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGEJ.	123
ANEXO 1.8. POSIÇÃO 98-2 HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGE J.	123
ANEXO 1.9. POSIÇÃO 98-3. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGEJ.	123
ANEXO 1.10 – POSIÇÃO HISTOGRAMAS DAS DENTRITAS DO IMAGEJ.....	124
ANEXO 1.11- POSIÇÃO 98-5. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGEJ.....	124
ANEXO 1.12 - POSIÇÃO 98-6 HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGEJ.....	124
ANEXO 1.13- POSIÇÃO 98-7. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGEJ.....	125
ANEXO 1.14- POSIÇÃO 97. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 5 HZ.....	125
ANEXO 1.15- POSIÇÃO 97-1. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 5 HZ.....	125
ANEXO 1.16- POSIÇÃO 97-2. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 5 HZ.....	126
ANEXO 1.17- POSIÇÃO 97-3. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 5 HZ.....	126
ANEXO 1.18- POSIÇÃO 100. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ.....	126
ANEXO 1.19- POSIÇÃO 100-1 – GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ.....	127
ANEXO 1.20- POSIÇÃO 100-2 – GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ	127
ANEXO 1.21- POSIÇÃO 100-3 – GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ.....	127
ANEXO 1.22- POSIÇÃO 100-4. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ.....	128
ANEXO 1.23 POSIÇÃO 100-5. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ.....	128
ANEXO 1.24. POSIÇÃO 100-6 .GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ.....	128
ANEXO 1.25 POSIÇÃO 100-7. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ.....	129
ANEXO 1.26 POSIÇÃO 100-8. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ.....	129
ANEXO 1.27 POSIÇÃO 100. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ.....	129
ANEXO 1.28 POSIÇÃO 100-1. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ.....	130

ANEXO 1.29 POSIÇÃO 100-2. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ.....	130
ANEXO 1.30 POSIÇÃO 100-3. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ.....	130
ANEXO 1.31 POSIÇÃO 100-4. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ.....	131
ANEXO 1.32 POSIÇÃO 100-5. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ.....	131
ANEXO 1.33 POSIÇÃO 100-6. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ.....	131
ANEXO 2 – TABELA DE SELEÇÃO DOS FATS (A).....	132
ANEXO 2.1 - TABELA DE SELEÇÃO DOS FATSS (B).....	133
ANEXO 3 – ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	134
ANEXO 3.1 - MATERIAL BASE COM ACABAMENTO LIXADO.....	134
ANEXO 3.2 MATERIAL BASE COM ACABAMENTO COMO LAMINADO.....	135
ANEXO 3.3 - JUNTA SOLDADA GTAW-DWF COM 0,5 HZ.....	136
ANEXO 3.4 JUNTA SOLDADA GTAW-DWF COM 5,0 HZ.....	137
ANEXO 3.5 - JUNTA SOLDADA GTAW-DWF COM 10 HZ.....	138
ANEXO 3.6 - JUNTA SOLDADA GTAW-DWF COM 15 HZ.....	139
ANEXO 3.7 - TIG CONVENCIONAL C-GTAW ACABAMENTO LIXADO.....	140
ANEXO 4 – CERTIFICADO DE QUALIDADE DAS CHAPAS.....	141
ANEXO 5 – PREPARAÇÃO DAS INFRAESTRUTAS DO LABORATÓRIO DE SOLDAGEM.....	142
ANEXO 5.1 – LAYOUT DAS MODIFICAÇÕES DO LABORATÓRIO DE SOLDAGEM DA FATEC-SP.....	142
ANEXO 5.2 – BANCADA DUPLA DA FATEC-SP.....	143
ANEXO 5.3- MONTAGEM DO MAD, TARTILOPE E SAP NAS BANCADAS DA FATEC-SP.....	143

1 INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem ao arco elétrico são amplamente utilizados nos métodos de fabricação de estruturas, equipamentos industriais, veículos e componentes no segmento metalmeccânico. São bastante conhecidas as vantagens das aplicações da soldagem para união dos materiais em relação aos métodos de rebites e parafusos. Porém, a soldagem apresenta uma desvantagem relevante decorrente da redução da resistência à fadiga das juntas soldadas em relação ao metal base. Neste sentido, os projetistas e as normas internacionais especificam fatores de segurança para compensar reduções no comportamento em fadiga para condições de projeto com carregamentos cíclicos (Normas: EN 1993-1-9/CEN,2005; Documento IIW -2259-15; HOBACHER,2015). Desta forma, a resistência à fadiga é limitada pela solda e, esta limitação pode inviabilizar aplicações com soldagem como é o caso das asas das aeronaves. Em relação às limitações das aplicações dos processos de soldagem em condições de fadiga, destaca-se as pesquisas de Rudy (1982). Suas publicações sobre a variante da alimentação intermitente de arame, no processo TIG semiautomático, pode ser reconhecida como início das aplicações denominadas dinâmicas com arco elétrico. Rudy desenvolveu e a General Electric (GE) patenteou o dispositivo para soldagens de reparos de turbinas de aviação com as ligas de níquel Inconel 718, aço inoxidável 17-4 Ph, Ti-6 Al-4V e A286. Esse trabalho foi publicado pelo ASME em 1982. Rudy adaptou, na tocha TIG, o sistema mecanizado de alimentação de arame em substituição ao trabalho do soldador com a vareta manual. A alimentação intermitente (drab) foi associada com o nome do processo e denominado como *Dabber Gas Tungsten Arc Welding* (Rudy,1982). A patente da General Electric (G.E.) foi comercializada pelos fabricantes Jetline Engineering (JETLINE ENGINEERING, 2013). Esse processo é aplicado na soldagem de chapas finas em ligas de níquel, reparos e build up nos sistemas de selagens das turbinas de aviação da G.E. Os ensaios mecânicos publicados pelo Rudy J.F. indicaram que as soldas apresentavam redução média de 80% da tensão de fadiga, em relação ao metal base, para ruptura com 10^5 ciclos (RUDY,1982). Neste processo, segundo Rudy, pode haver aceleração no resfriamento da poça de fusão e redução no aporte de calor no metal base devido aos movimentos intermitentes do arame.

No Brasil, conforme exposto por Fernandes, Melo e Carvajal (2005), publicou-se a modelagem matemática dos experimentos com o processo Dabber, em 2005, onde se analisou as influências dos parâmetros primários de soldagem em relação à largura dos cordões e altura dos filetes de solda.

A empresa TIP TIG International AG comercializa equipamentos e tochas para aplicações na modalidade semi-automática com hot wire. Estes equipamentos foram divulgados na feira Fabtech -USA de 2013, com foco comercial, destacando taxa de deposição e qualidade do aspecto do acabamento visual das soldas. Essa empresa trabalha com frequência constante e não apresenta flexibilidade para ajustes neste parâmetro secundário de soldagem. Os equipamentos comerciais são semelhantes à soldagem TIG manual com a substituição da vareta pela alimentação de arame automática e dinâmica. Toda movimentação da tocha TIG é realizada pelo soldador manualmente (TIP TIG INTERNATIONAL AG, 2018). Os Fabricantes dos equipamentos para soldagem, segundo TIP TIG International AG (2018), implementaram modificações no Processo Dabber e posteriormente adotaram a denominação para TIP TIG nas publicações de 2013.

Cabe ressaltar, entretanto, que o fabricante TIP TIG Internacional AG não apresenta informações sobre propriedades mecânicas das juntas soldadas. Os dados das vantagens mencionadas como o incremento da taxa de deposição ainda não foram justificados completamente. Pode-se esperar uma vantagem da alimentação automática de arame em relação à deposição com varetas. Algumas desvantagens a serem consideradas seriam a necessidade de maior espaço e o aumento do peso da tocha com seus acessórios para o soldador. Estas desvantagens podem provocar maior fadiga na jornada de trabalho, comprometendo rendimento e qualidade nas soldas (TIP TIG INTERNATIONAL AG, 2018). Nos trabalhos de Riffel et al confirma-se a redução de temperatura na poça de fusão mencionada por Rudy (RIFFEL, 2018). Riffel utilizou TIG com alimentação dinâmica na soldagem de revestimento interno com metal base tubo API X80 cladeado internamente com Inconel, desenvolveu soldagem dos passes de revestimento com *welding overlay* e verificou aceleração de arame em até 18 vezes em relação a velocidade nominal constante do arame de adição (RIFFEL, 2018).

Paes utilizou câmera térmica e verificou relação entre o deslocamento do avanço de arame e a retirada de calor da poça de fusão na soldagem TIG com alimentação dinâmica (PAES, 2016).

Geng *et al.* (2017) publicou a modelagem matemática para garantir o ajuste da posição do arame em relação ao comprimento do arco, distância do eletrodo de tungstênio para atingir a poça de fusão no modo de transferência em ponte.

As obras de Wainer, Brandi e Melo (2010) e Lippold (2014) não abordam a técnica de soldagem TIG com alimentação dinâmica, evidenciando uma carência de estudos com bases científicas nesta variante do processo TIG.

Destacam-se outros trabalhos com desenvolvimento de variantes referentes ao Processo TIG, indicados a seguir:

- Hebert, Pike e Rice (2013) compararam o TIP TIG *hot wire* com o processo TIG convencional e realizaram testes com revestimento alloy 625 em aço carbono, destacando as diferenças das taxas de deposição. Silva *et al.* (2018), do Labsolda da UFSC, estudaram a soldagem sobre chapas em aço carbono e revestimento do tipo *welding overlay* de ligas de Inconel. Silva *et al.* (2019), estudaram também aspectos físicos do avanço e retorno do arame no processo TIG com alimentação dinâmica.

- Outros estudos como o de Pigozzo (2015) pesquisaram a soldagem de passe de raiz no sistema orbital. Olivares (2015) estudou o processo TIG Key Hole, comparando-o com o processo Plasma, enquanto Weizenmann (2015) estudou os efeitos da oscilação da tocha nas soldas longitudinais com o processo TIG automático. Já Chen *et al.* (2016) estudaram os efeitos da soldagem TIG com 02 eletrodos de Tungstênio e Paes (2016) estudou o aumento de produtividade no processo TIG. Marques (2017) pesquisou os efeitos da alimentação dinâmica no processo MIG/MAG. Nesses estudos, os fabricantes de equipamentos e acessórios para soldagem apresentam sistemas completos para soldagem com foco em automação e produtividade (AIR LIQUID, 2021; EWM GROUP, 2021; K-TIG, 2011; DIAMOND GROUND, 2014).

Neste projeto investigou-se os aspectos desconhecidos no processo TIG automático com alimentação dinâmica como os efeitos das variações das frequências na resistência à fadiga das juntas soldadas em aço C-Mn-Si. O conjunto de equipamentos para soldagem e de aquisição de dados, fornecidos pelas empresas SPS e IMC, propiciam e garantem a completa automatização. O deslocamento longitudinal da Tocha é realizado pelo Tartílope com controles da velocidade de deslocamento, altura do eletrodo em relação ao metal base (AVC) e possibilidade de movimentação transversal (IMC SOLDAGEM, 2021).

Na publicação do 18th *International, ship and offshore structures Congress (Fatigue and Fracture)* destaca-se o conjunto de fatores que influenciam a degradação da vida em fadiga em estruturas soldadas: tensão média e sua distribuição, tensões residuais, cargas nas estruturas e distribuição sequencial dos carregamentos, dimensões das estruturas e espessuras envolvidas, corrosão e temperaturas no ambiente, critério de projeto, tecnologia de fabricação, métodos para melhorar a vida em fadiga e sensibilidade dos materiais (COMMITTEE II.2, 2012).

Chryssanthopoulos e Righiniotis (2006) comentam a necessidade de inspeção periódica e reparos em estruturas soldadas como pontes e estruturas marítimas (offshore) devido a ocorrência de trincas de fadiga. Consideram que planos de inspeção são necessários para acompanhamento da vida em fadiga das estruturas em função da incerteza dos métodos para análise utilizados.

Li *et al.* (2020) propuseram o conceito de fator de redução da resistência à fadiga que correlaciona a vida em fadiga do metal base e da junta soldada. Este conceito apresentou variação e redução do tempo de vida em fadiga para juntas soldadas em relação ao metal base. O fator de redução é uma nova abordagem para confirmar a tendência de menor vida em fadiga na zona afetada pelo calor e nas zonas de fusão do metal de solda relacionadas ao metal base não afetado. Wu *et al.* observaram a redução da vida em fadiga de juntas soldadas de aço Cr-Mo-V em alta temperatura (WU, 2016).

Zhu *et al.* (2012) investigaram a redução da vida em fadiga devido à nucleação de trincas de fadiga perto de defeitos em temperatura moderada

Zhu, Liu e Xuan (2015) estudaram o efeito da frequência em testes de fadiga e encontraram a iniciação de trincas perto de defeitos internos executando testes com 110 Hz e 20 kHz.

Em termos de métodos para melhorar a vida em fadiga, encontra-se o trabalho de Isa *et al.* (2018), demonstrando que o trabalho a frio na superfície do aço A 516 -70, com o processo *shot peening*, melhora a vida em fadiga na ordem 6,8/%. Trata-se de pequena melhoria para o metal base sem solda (ISA *et al.*, 2018).

Justifica-se o estudo do comportamento em fadiga das juntas soldadas, nas fabricações que utilizam soldagem ao arco elétrico, envolvendo as fases de projeto, fabricação, construção e montagem dos componentes, peças, equipamentos para indústria de base, óleo e gás, veículos, infraestrutura, aeronáutica dentre outros. As regiões que formam a junta soldada podem apresentar diferenças nas estruturas entre si, caracterizar entalhes metalúrgicos que podem alterar e promover danos na vida em fadiga comparando-se com o metal base sem solda.

Neste trabalho, utilizou-se um conjunto de equipamentos para soldagem e aquisição de dados que permitem total automação. Observou-se a influência da aplicação da alimentação dinâmica automática de arame com várias frequências pelo processo TIG (GTAW-DWF) para melhorar a resistência à fadiga de juntas soldadas de aço relacionadas ao metal base e à soldagem a arco convencional.

A zona fundida da solda foi estudada nos trabalhos de David, destacando a morfologia dendrítica nas fases de solidificação da poça de fusão (DAVID; BABU; VITEK, 2003). A contagem das dendritas utilizando microscopia ótica em juntas soldadas foi utilizada por Schonmaier *et al.* (2021). Além disso, a distribuição Weibull e a análise estatística de modelos de regressão linear foram usados para investigar a confiabilidade da resistência à fadiga dos processos de soldagem convencional e de alimentação dinâmica de arame para prever a vida em fadiga para vários níveis de confiabilidades (EFFERTZ, *et al.*, 2016, FERNANDES *et al.*, 2020).

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é analisar o efeito das frequências de 0,5 5,0 10 e 15 Hz na resistência à fadiga axial de juntas soldadas de topo, com aço C-Mn-Si (ASTM A 516-70), e penetração total pelo processo TIG (GTAW-DWF) automático com alimentação dinâmica de arame.

1.1.1 Objetivos específicos

- Analisar de forma comparativa o efeito do espaçamento dos braços interdendriticos secundários (SDAS), na zona fundida das juntas soldadas pelos processos C-GTAW e GTAW-DWF;
- Analisar de forma comparativa a correlação de micro defeitos de solidificação na resistência à fadiga das juntas soldadas pelos processos C-GTAW e GTAW-DWF.
- Desenvolver metodologia inédita para medição do espaçamento dos braços interdendríticos secundários (SDAS)

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 SOLDAGEM

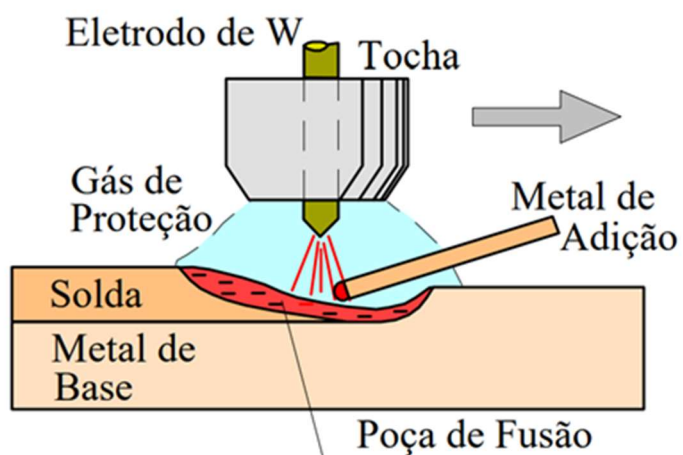
Neste trabalho estudou-se o processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) que é denominado GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) pelas normas ASME e AWS. Para simplificar as denominações, adotou-se as nomenclaturas C-GTAW para o TIG convencional e GTAW- DWF (*Dynamic Wire Feeding*) para a variante automática com alimentação dinâmica de arame. Os fundamentos básicos e as técnicas operatórias dos processos de soldagem C-GTAW e GTAW-DWF estão descritos a seguir.

2.1.1 C-GTAW

O processo de soldagem GTAW é caracterizado pelo arco elétrico entre o eletrodo de tungstênio (W–Wolfrâmio) e o metal base mediante a proteção de gás inerte: argônio, hélio ou misturas com pequenas adições de hidrogênio. O eletrodo de tungstênio não é consumido (mas apresenta desgaste durante a soldagem) e desta forma não ocorre transferência metálica através do arco elétrico. A utilização de gás de proteção inerte propicia maior limpeza na poça de fusão, minimizando presença de gases reativos e eliminando a possibilidade de formação de escória. Estas características promovem também a redução dos níveis de hidrogênio no metal de solda e permitem soldagem de materiais reativos na presença de oxigênio como titânio e alumínio. O processo TIG apresenta aplicações nas soldagens das ligas ferrosas e não ferrosas mediante seleção do metal de adição com composição química adequada para as propriedades desejadas. As Figuras 1 e 2 ilustram o arco elétrico e as técnicas operatórias com deposição do consumível (varetas) nas aplicações básicas manual (QUITES; DUTRA, 1979).

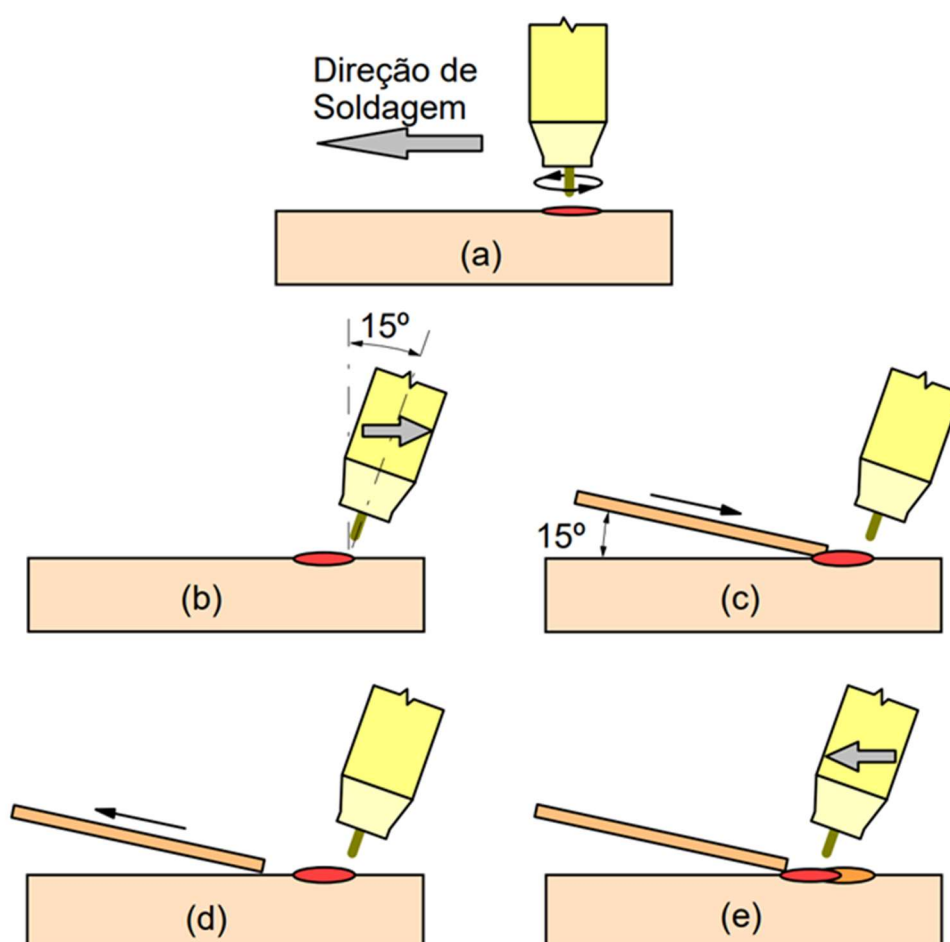
A técnica operatória da soldagem TIG manual consiste na inserção intermitente da vareta na poça de fusão pelo soldador. Os movimentos, coordenados pelo soldador, da tocha e da vareta produzem taxa de deposição muito baixa, na ordem de 0,2 kg/ h. Nesse cenário, o TIG manual é reconhecido para aplicações na soldagem do passe de raiz de juntas de topo e soldagem de chapas finas (WAINER; BRANDI; MELO, 2010).

Figura 1 – Processo de Soldagem TIG



Fonte: Adaptado de Quites e Dutra (1979, p. 175)

Figura 2 – Técnicas operatórias com o processo TIG manual



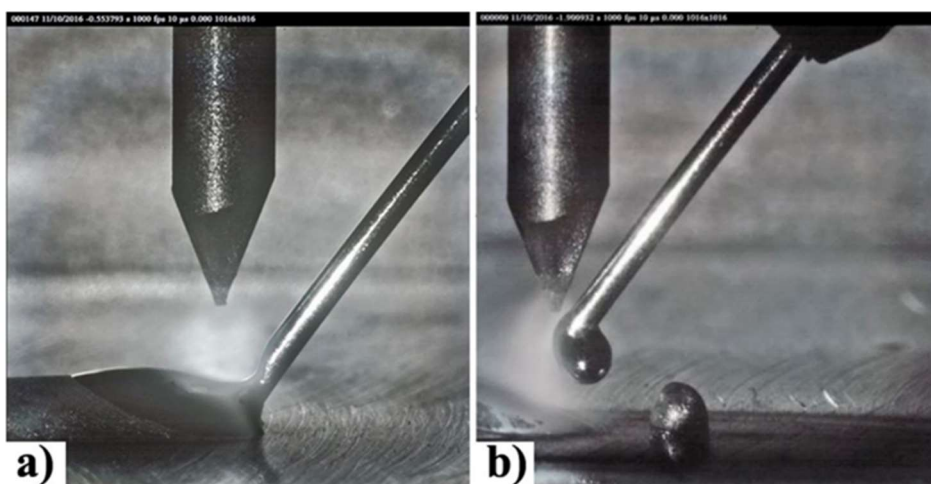
Fonte: Adaptado de Quites e Dutra (1979, p. 177)

2.1.2 GTAW alimentação dinâmica

O Processo de soldagem ao arco elétrico GTAW encontra-se em fase de desenvolvimento de variantes com alimentação automatizada do arame consumível.

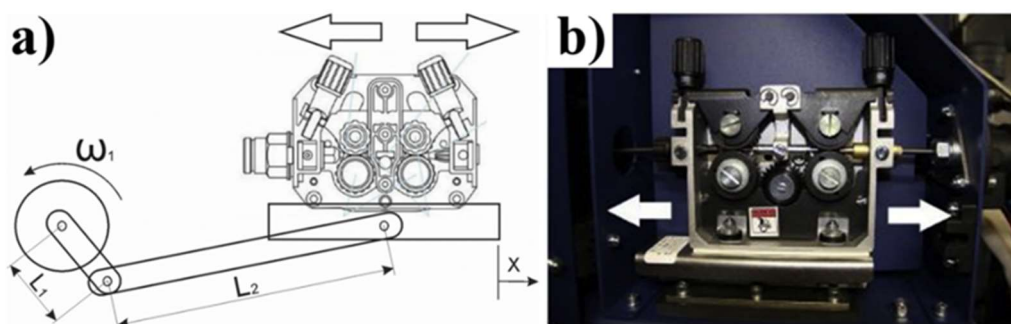
Conforme Silva *et al.* (2019), a alimentação controlada de arame pode formar ponte na poça de fusão ou ser intermitente (entrando e saindo). As figuras 3 e 4 ilustram estas alternativas:

Figura 3- Contato do arame consumível com a poça de fusão
(a) ponte e (b) intermitente



Fonte: Riffel (2019, p.92)

Figura 4- Mecanismo de avanço e retorno do conjunto tracionado de arame consumível



Fonte: Riffel (2019, p.92)

A figura 4 demonstra o mecanismo de avanço e retorno do conjunto de tracionamento do cabeçote alimentador de arame. Este sistema é flexível para ajuste das frequências e pode ser considerado como o conjunto motriz responsável pela alimentação dinâmica de arame.

Considera-se importante o detalhamento dos aspectos técnicos e operacionais que diferenciam a soldagem com TIG convencional em relação ao GTAW-DWF:

- O processo de soldagem TIG automático com alimentação dinâmica de arame (GTAW-DWF) pode ser utilizado para soldagem de chapas com espessuras de 6,5mm ou maiores.

Comparando-se a técnica operatória, o soldador TIG utiliza varetas que são alimentadas manualmente e no processo GTAW-DWF utiliza-se arame com velocidades e frequências controladas.

- Pode-se considerar que o soldador TIG utiliza frequência muito baixa de inserção da vareta na poça de fusão. Frequências inferiores a 2,0 Hz tendem a serem próximas da soldagem manual, mas as varetas utilizadas pelo soldador manual são de diâmetros maiores do que o arame para as aplicações automatizadas (PAES, 2016).

- O processo GTAW-DWF propicia maior interação com a poça de fusão mediante ajuste e repetibilidade das variáveis geométricas de posição. Na secção 3 deste trabalho serão apresentadas maior detalhamento do procedimento de soldagem GTAW-DWF utilizado neste trabalho. Os efeitos da alimentação dinâmica na velocidade de alimentação do arame serão discutidos mais adiante.

2.2 FADIGA

O trabalho de Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018) apresentou a revisão teórica, envolvendo 115 trabalhos e normas publicadas, dos métodos utilizados com maior frequência para cálculo e dimensionamento das estruturas soldadas para aplicações em regime de fadiga. Conforme explicam, o fenômeno “Fadiga” foi estudado por August Wohler no século 19, por causa das falhas dos eixos de trem, onde se verificou que em condições estáticas as falhas não ocorriam, mas, os eixos quebravam com carregamentos cíclicos. No século 20, a fadiga ficou reconhecida como o fenômeno da superfície e as trincas divididas nas fases de nucleação e propagação. A divisão das trincas em estágios permitiu o desenvolvimento das teorias para cada fase considerando a propagação até a ruptura final.

2.2.1 Fadiga nas estruturas soldadas

As aplicações dos processos de soldagem ao arco elétrico foram desenvolvidas em larga escala industrial no século 20. Os impactos negativos das imperfeições das soldas na

resistência à fadiga (HOBACHER, 2015; YANG *et al.*, 2022) e as conclusões para aplicação da mecânica da fratura nas estruturas soldadas estão delineando as normas internacionais com os critérios de cálculo com fatores de segurança.

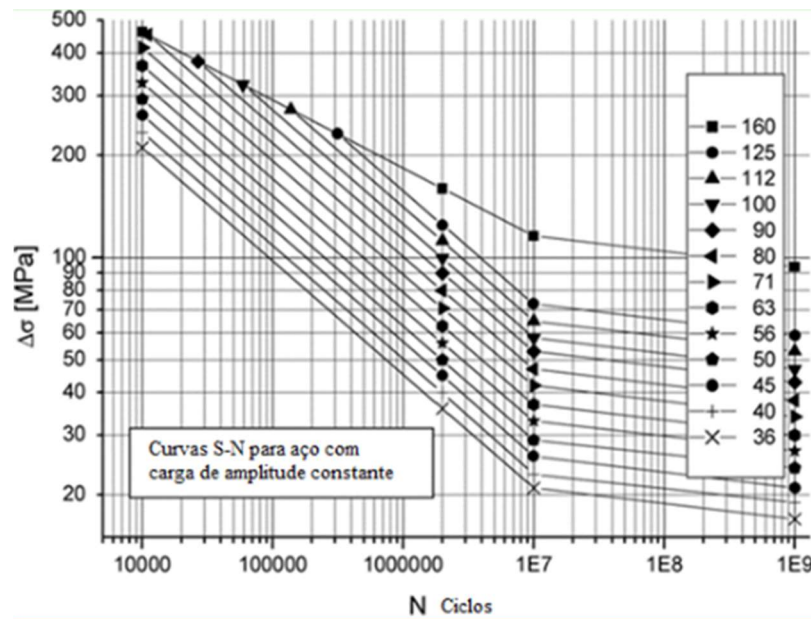
A norma europeia EN 1993-1-9 (Eurocode 3:Design of steel structure – Part 1-9; Fatigue) e a norma IIW-2259-15 do Instituto Internacional de Soldagem especificaram critério de projeto com fator de segurança para compensar a redução da resistência à fadiga em juntas soldadas (HOBACHER, 1993; EUROCODE, 2005; HOBACHER, 2015; AYGU *et al.*, 2013). Este parâmetro corresponde à curva S-N, indicando a tensão admissível para a vida em fadiga com 2×10^6 ciclos (HOBACHER, 1993; AYGU *et al.*, 2013). Essas normas confirmam que a resistência à fadiga para juntas soldadas é menor do que o material base não soldado. Neste sentido, destacam-se referências de pesquisas, comprovando a redução da resistência à fadiga, com diferentes metais de base específicos: Aços e Alumínio (HOBACHER, 1993 e 2015), ligas de níquel Inconel 718, aço inoxidável 17-4 Ph, Ti-6 Al-4V e A286 (Rudy 1982), aços (CHRYSSANTHOPOULOS; RIGHINIOTIS, 2006); aço AISI 4130 (NASCIMENTO; VOORWALD, 2010; NASCIMENTO; VOORWALD; PAYÃO FILHO, 2011); Aços Cromo Molibdênio (ZHU *et al.*, 2012); ZHU; XUAN; WANG, 2011; ZHANG *et al.*, 2018; SHANYAVCKIY, 2015; ZHU; LIU; XUAN, 2015; WU *et al.* 2016; ZHU; XUAN, 2018; PEDERSEN, 2019; LI *et al.*, 2020).

A norma do IIW publicada pelo A. Hobbacher (2008), “*Recommendations for fatigue design of welded joints and components*” e posteriormente revisada na edição do IIW document IIW-2259-15, International Institute of Welding, Cambridge, UK, 2015, considera a redução da vida em fadiga para juntas soldadas em aços e alumínio (Figura 2). Esta norma define critério de projeto para resistência à fadiga através do FATx para classificação referente à curva S-N onde x corresponde à faixa de tensão em MPa. Por exemplo, no critério de projeto para aço, o FAT 160 ($N=10^7$ Ciclos), considerado a condição do metal base com FAT 140, a norma recomenda reduzir para o FAT 112 para junta soldada na melhor condição: - 100% de ensaios não destrutivos (Radiografia e/ou Ultrassom), remoção do reforço da solda e acabamento superficial com lixamento para eliminar descontinuidades superficiais. Neste caso, para junta de topo semelhante ao tipo utilizada neste projeto, a norma especifica redução de 140 MPa para 112 MPa na resistência à fadiga em relação ao metal base não soldado. As juntas soldadas apresentam defeitos como poros, mordeduras, falta de fusão, penetração incompleta e trincas que favorecem a nucleação das trincas de fadiga. Os entalhes metalúrgicos decorrentes da formação das zonas afetadas pelo calor, adjacente à linha de fusão, geometrias das soldas e tensões residuais decorrentes dos gradientes térmicos

contribuem para nucleação das trincas de fadiga (KOU, 2003; HAMDULAY; MATTHEW; WANI, 2014).

A Figura 5 apresenta o ábaco das curvas S-N e demonstra os FATs para aço conforme norma do IIW. O Anexo 3 apresenta as Tabelas 01 e 02 indicadas para seleção dos FATs.

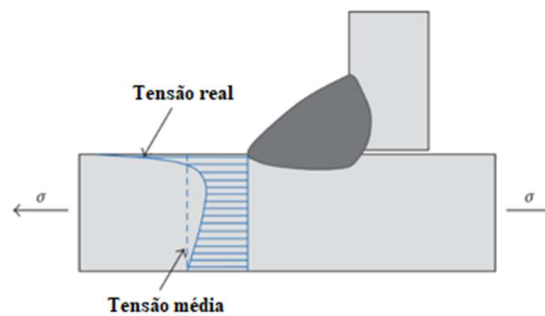
Figura 5- Ábaco Resistência à fadiga curvas S-N para aços (IIW)



Fonte: Hobbacher (2008, p.43)

Na Figura 6 encontram-se fatores geométricos e concentradores de tensões demonstrados por Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018):

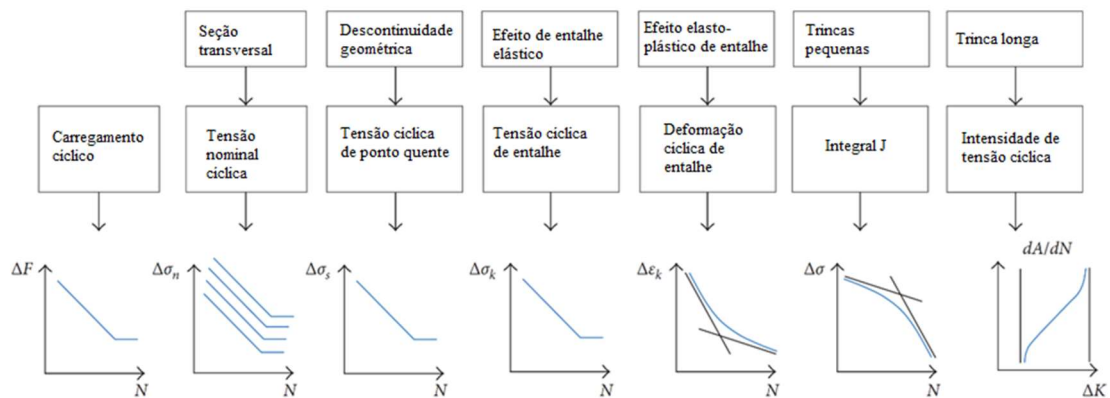
Figura 6- Entalhe geométrico: perfil da concentração de tensões nas margens da solda



Fonte: Adaptado de Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018, p. 09)

Considerando a complexidade das estruturas soldadas que podem apresentar carregamentos multiaxiais, defeitos decorrentes dos processos de soldagem e transformações metalúrgicas nas subzonas da região afetadas pelo calor, os métodos para avaliação das resistências à fadiga em estruturas soldadas foram classificados mediante abordagens globais e localizadas, conforme demonstrado na Figura 7 (FUSTAR; LUKACEVIC; DUJMOVIC, 2018).

Figura 7- Métodos global e localizado para análise das tensões e resistência a fadiga das juntas soldadas

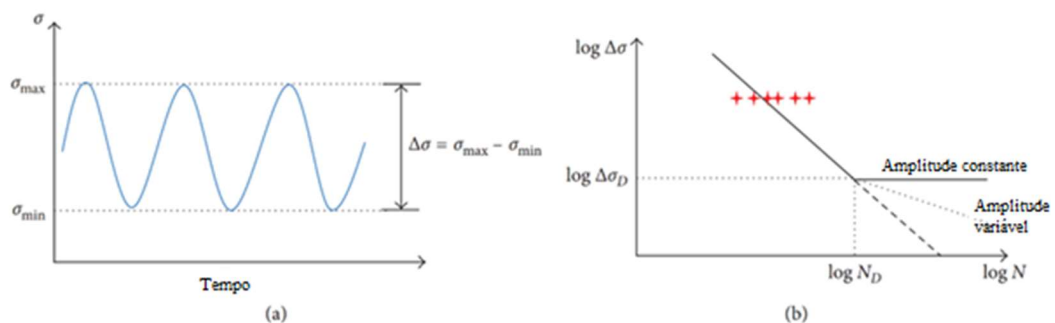


Fonte: Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018, p. 04)

A análise de estruturas complexas pode ser simplificada mediante levantamento das curvas S - N de cada membro componente do conjunto global. As curvas S - N são obtidas mediante variações incrementais das tensões e registro dos números de ciclos correspondentes até a ruptura. Estes ensaios de fadiga podem ser realizados com amplitude de carregamento constante ou variável (HAMDULAY; MATTHEW; WANI, 2014).

Na Figura 8, (a) indica carregamento com amplitude constante e (b) Curva S - N em escala logarítmo.

Figura 8- Carregamento com amplitude constante e Curva S - N em escala logarítmo



Fonte: Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018, p. 05)

Desta forma a equação da curva S – N pode ser obtida (eq.1);

$$\text{Log } \Delta\sigma = \log \Delta\sigma_D + 1/m \log N_D / N \quad (1)$$

Onde

m = Ângulo de inclinação da curva S – N

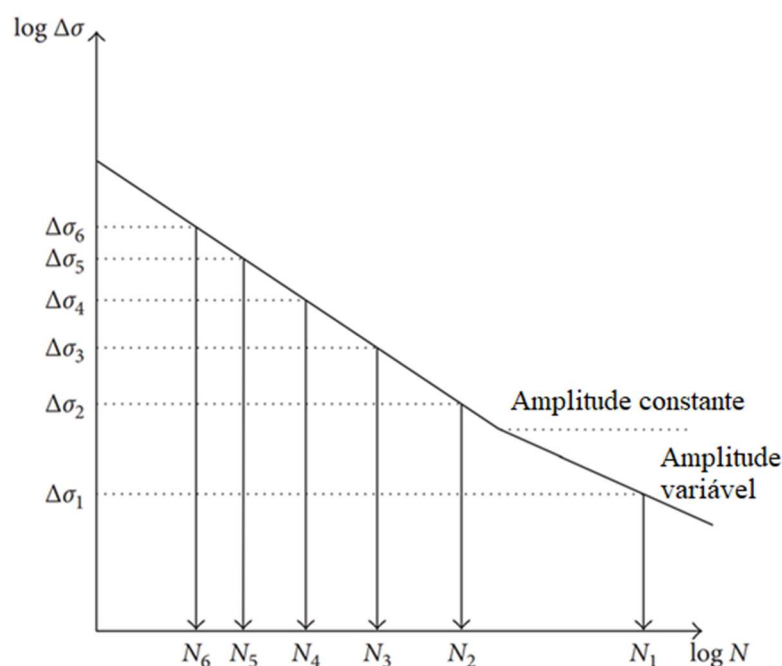
$\Delta\sigma$ = Valor da amplitude de tensão que corresponde a N ciclos

$\Delta\sigma_D$ = Valor da amplitude de tensão que corresponde a N_D ciclos

As estruturas soldadas podem estar sujeitas a condições de carregamentos com amplitudes constantes e variáveis em diferentes momentos da vida em fadiga. O critério de Palmgren-Miner possibilita o cálculo das parcelas da vida em fadiga em blocos de tensão e número de ciclos para diferentes amplitudes de carregamentos. Este método é conhecido como hipótese do dano acumulado (FUSTAR; LUKACEVIC; DUJMOVIC, 2018).

A Figura 9 ilustra a hipótese do dano acumulado de Palmgren-Miner:

Figura 9- Hipótese do dano acumulado de Palmgren-Miner



Fonte: Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018, p. 06)

Segundo o critério de Palmgren-Miner, o dano acumulado pode ser calculado pela equação 2 (FUSTAR; LUKACEVIC; DUJMOVIC, 2018):

$$\sum_{i=1}^{i=j} \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (2)$$

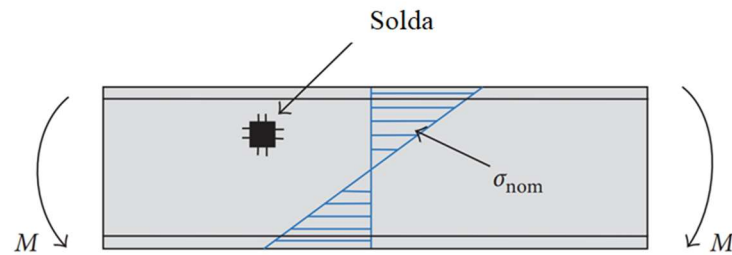
Onde:

n_i = número de faixas de tensão de amplitude constante $\Delta\sigma_i$

N_i = número de faixas de tensão de amplitude constante $\Delta\sigma_i$ até a ruptura

O critério de tensão nominal é muito utilizado pelas normas de cálculo para estruturas simples. Na maioria dos casos adota-se a tensão média excluindo-se os efeitos localizados das soldas. Este método não é recomendado para estruturas complexas. A Figura 10 exemplifica aplicação da tensão nominal em viga I.

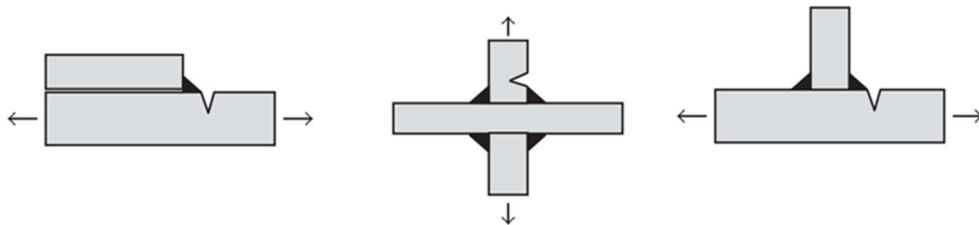
Figura 10- Tensão nominal em vigas soldada



Fonte: Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018, p. 07)

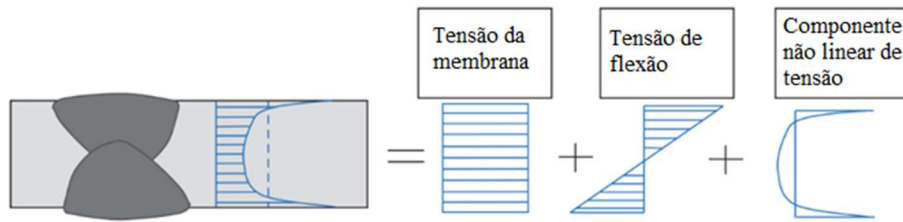
Seguindo as explicações de Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018), chega-se à definição de *hot spot*, como sendo os pontos críticos nas margens das soldas, conforme exemplificado nas Figuras 11 a 13:

Figura 11- Localizações de nucleação de trincas de fadiga



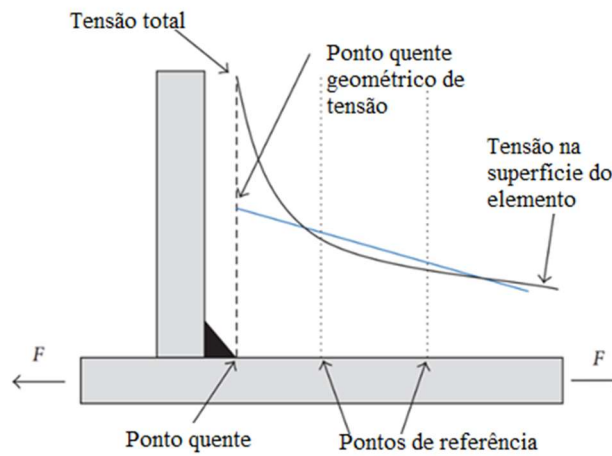
Fonte: Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018, p. 07)

Figura 12- Entalhe Geométrico (a) - Perfil de tensões nas margens da solda



Fonte: Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018, p. 08)

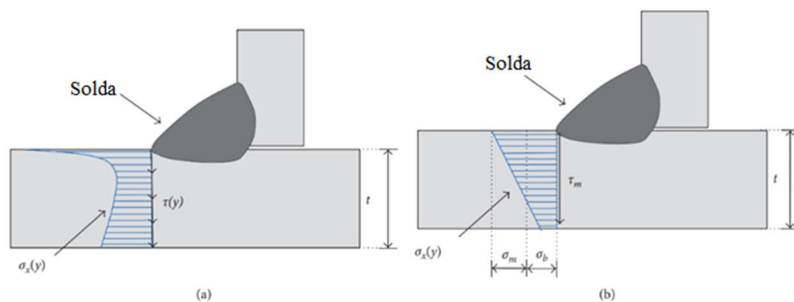
Figura 13 - Entalhe Geométrico (b) - Perfil de tensões nas margens da solda



Fonte: Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018, p. 08)

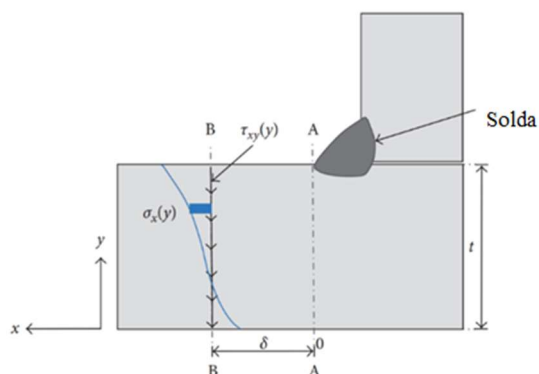
As Figuras 14 e 15 detalham o método da malha de tensão estrutural e curva Mestra S – N, método com abordagem da curva Mestra S-N desenvolvido para minimizar os efeitos da seleção do tamanho das malhas no procedimento de cálculo de estruturas complexas como navios e plataformas marítimas (CHRYSSANTHOPOULOS; RIGHINIOTIS, 2006; HOBACHER, 2015).

Figura 14- Entalhe Geométrico (c) - Perfil de tensões nas margens da solda



Fonte: Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018, p. 09)

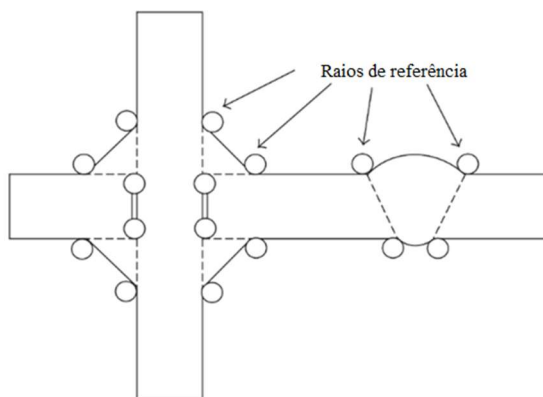
Figura 15- Entalhe Geométrico (d) - Perfil de tensões nas margens da solda



Fonte: Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018, p. 09)

Considerando a abordagem da tensão efetiva em entalhe, apresentada na Figura 16, no setor industrial metalmeccânico apresenta-se crescimento da utilização do modelo com raio mínimo nas margens das soldas (face e raiz). O raio considerado permite assumir o comportamento linear elástico do material e o cálculo da tensão neste entalhe.

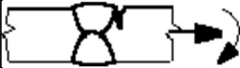
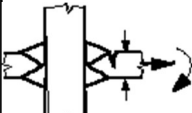
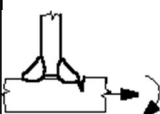
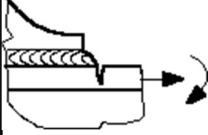
Figura 16- Modelo do IIW- Entalhe Geométrico com raio de referência nas margens da solda



Fonte: Fustar, Lukacevic e Dujmovic (2018, p. 09)

No Quadro 1 indica-se a seleção dos FATs em função dos tipos de juntas e concentradores de tensões nas margens das soldas.

Quadro 1- Resistência a Fadiga x Concentradores de tensão nas estruturas soldadas (IIW)

N	Detalhe estrutural	Descrição	Requisitos	FAT
1		Junta de topo	Como soldado, END (ensaio não destrutivo)	100
2		Juntas cruciformes ou em T com soldas K-butt de penetração total	Soldas K-butt, sem rasgo lamelar	100
3		Soldas de filete sem carga	Acessório transversal sem carga, não mais espesso que a placa principal, conforme soldado	100
4		Extremidades do suporte, extremidades dos reforços longitudinais	Soldas de filete soldadas ao redor ou não, como soldadas	100
5		Extremidades da placa de cobertura e juntas semelhantes	Como soldado	100

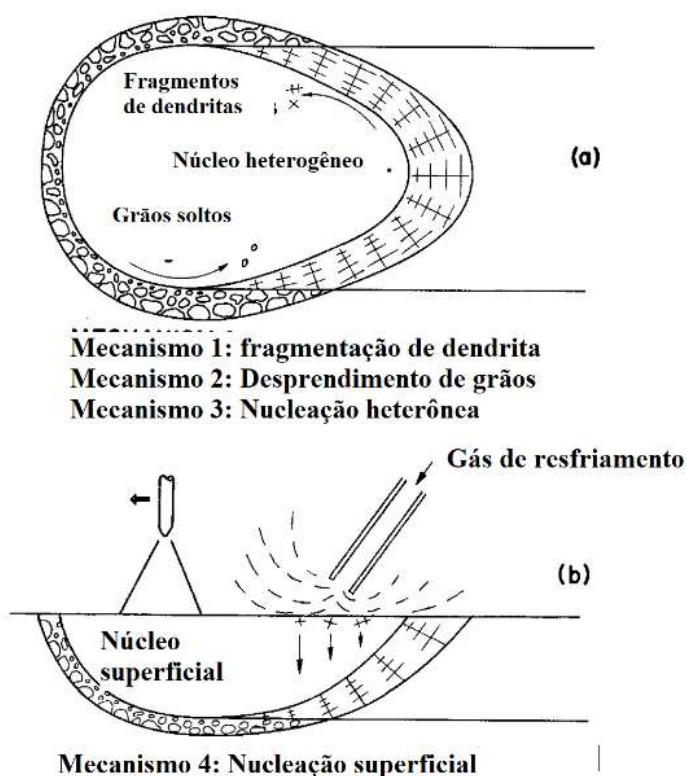
Fonte: Hobbacher (2008, p. 77)

No Quadro 1, as normas do IIW indicam exemplos de concentradores de tensões em estruturas soldadas de aço. Neste caso, a norma utiliza a abordagem da curva S-N com FAT máximo = 100 MPa.

2.3 Mecanismos de solidificação nas soldas

Conforme Lippold (2014) e Kou (2002), como mostra a Figura 17, a solidificação do cordão de solda, nos processos de soldagem ao arco elétrico, desenvolve morfologia com crescimento das dendritas a partir da linha de fusão em direção ao centro da poça de fusão.

Figura 17- Modelo de solidificação do cordão de solda

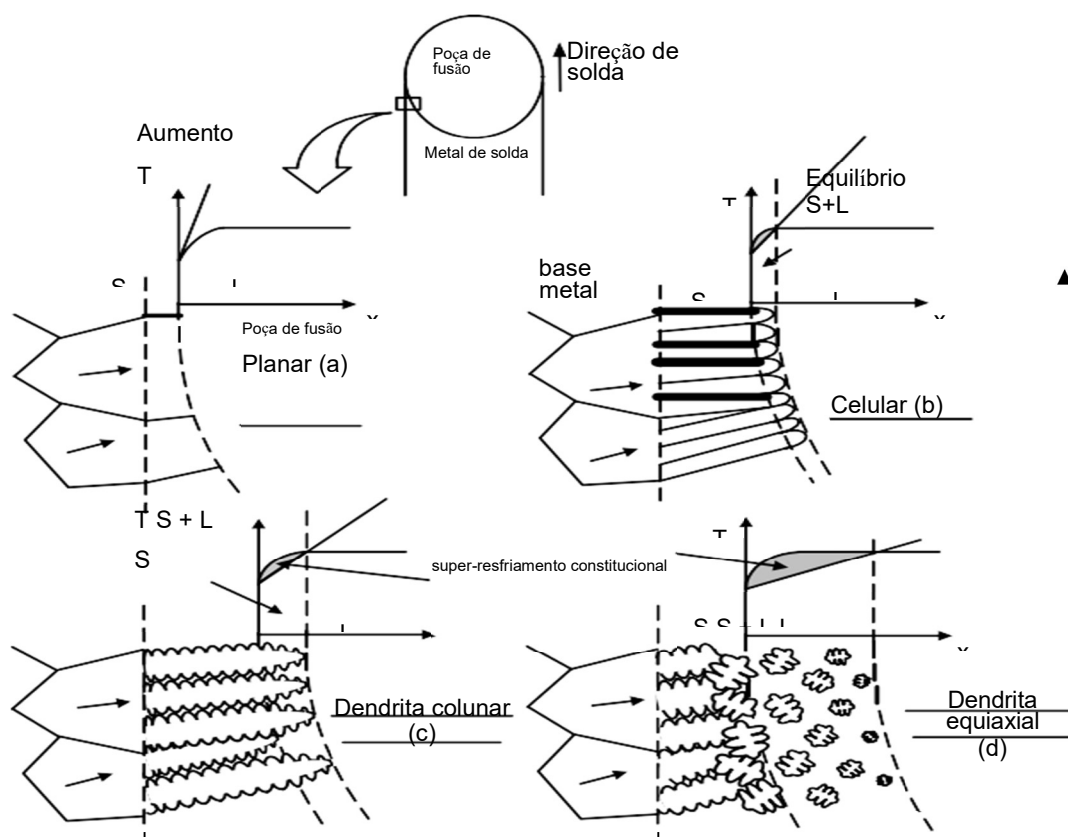


Fonte: Adaptado de Kou (2002)

A Figura 18 ilustra os mecanismos, apresentados por Kou (2002), nas etapas de solidificação: Efeito do super-resfriamento constitucional no modo de solidificação durante a soldagem: (a) planar; (b) celular; (c) dendrítico colunar; (d) dendrítico equiaxial. O super-resfriamento constitucional aumenta de (a) a (d) promovendo a tendência de mudanças no modo de solidificação: planar → celular → dendrítico.

Os parâmetros termodinâmicos: Gradiente de temperatura (G) e taxa de crescimento (R) são dominantes na microestrutura de solidificação. No processo de solidificação do cordão de solda, verifica-se que o gradiente de temperatura (G) é máximo na Linha de Fusão e diminui na direção do centro da poça de fusão. No entanto, a taxa de crescimento (R) é baixa na Linha de Fusão e máxima na região central da solda fundida. A temperatura é máxima no centro a poça de fusão e mínima na linha de fusão (KOU, 2002).

Figura 18- Etapas de solidificação do cordão de solda

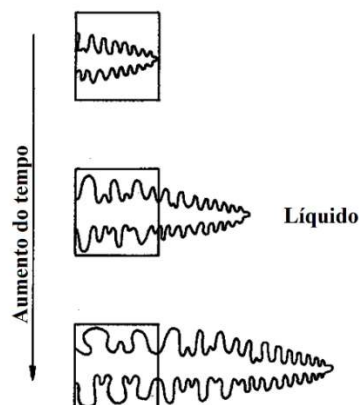


Fonte: Adaptado de Kou (2002)

2.3.1 Dendritas

Conforme indicado na Figura 19, a dendrita é uma estrutura de solidificação que apresenta uma morfologia semelhante a uma árvore de cristais, com um braço mais longo (tronco) e braços secundários e terciários (galhos) que cresce à medida que o metal fundido se solidifica. Essa morfologia é resultante de um crescimento mais rápido ao longo de direções cristalográficas energeticamente favoráveis. Vasilios Fourlakidis e Jonathan D. Madison demonstraram que a morfologia dendrítica tem grandes consequências nas propriedades mecânicas dos metais solidificados (FOURLAKIDIS, 2019; MADISON, 2010). Mark Jolly revisou os procedimentos de Campbell sobre a qualidade das peças fundidas e efeitos nas propriedades mecânicas (CAMPBELL, J., 2003; JOLLY, 2005).

Figura 19- Modelo de nucleação e crescimento das dendritas



Fonte: Kou (2002, p 165)

Para materiais com estrutura de solidificação dendrítica, o espaçamento entre os braços dendrítico secundário (*secondary dendritic arm Spacing SDAS*), pode ser analogamente relacionado, em termos de microestrutura, com o tamanho de grão em materiais processados mecanicamente, ou seja, o decréscimo do SDAS implica no aumento da resistência mecânica e da dureza (CAMPBELL, J., 2003).

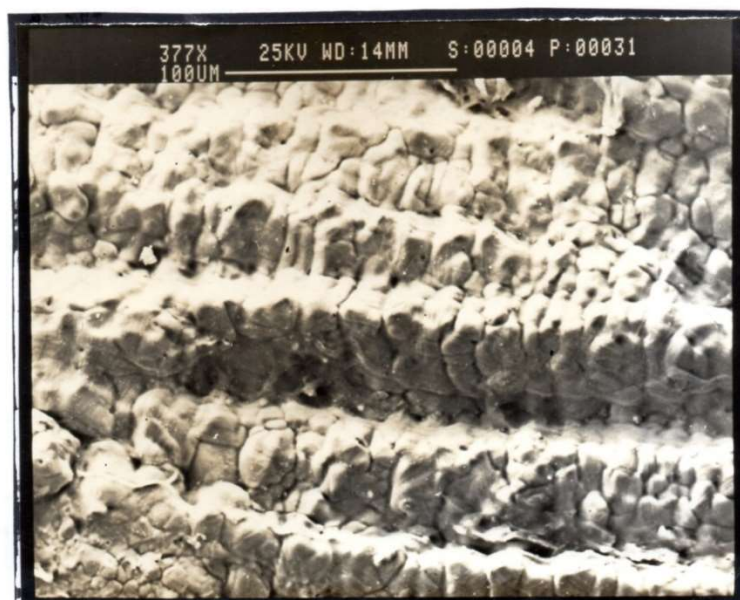
Geralmente o SDAS é medido manualmente em micrografias com procedimentos que os pesquisadores denominam de interceptação linear, método que envolve a contagem do número de braços secundários que interceptam uma linha reta desenhada ao longo da direção primária de crescimento. Vandersluis e Comondore (2017) fizeram uma revisão de metodologias para a determinação do SDAS e dividiram esses métodos em 5 classes, dependendo da morfologia das dendritas e do modo de medição.

2.4 METODOLOGIA COM MICROSCOPIA ÓTICA PARA MEDIÇÃO DAS DENDRITAS EM SOLDAS

A pesquisa de Hannah Schönmaier e colaboradores, utilizando microscopia ótica, demonstrou efeitos das variações da energia térmica adicionada no espaçamento dos braços dendríticos secundários nas junta soldadas com processo arco submerso (SCHÖNMAIER *et al.*, 2021). A Figura 20 demonstra a presença de estruturas dendríticas na zona bruta de fusão

das soldas realizadas no trabalho experimental de Neves N. (1993) que reportou a presença de dendritas nos planos das trincas de solidificação em soldas.

Figura 20 Evidência das extremidades dendríticas em soldas

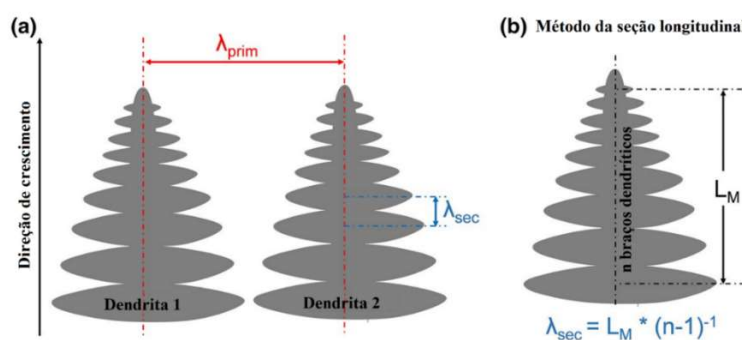


Fonte: Elaborado pelo autor (1993)

O mapeamento das dendritas realizado por Hannah Schönmaier encontra-se representado esquematicamente nas Figuras 21 e 22.

Na Figura 21 encontram-se (a) Desenho esquemático de dois troncos dendríticos. O espaçamento médio dos dendritos primários (k_{prim}) e o espaçamento médio das dendritas secundárias (k_{sec}) estão marcados em vermelho e azul, respectivamente. Na Figura (b) encontra-se a indicado o método de interceptação linear para determinar k_{sec} de uma seção transversal longitudinal de dendritas (SCHÖNMAIER et al, 2021).

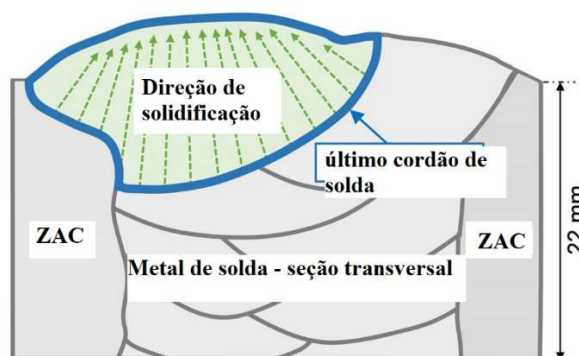
Figura 21- Modelo de medição das dendritas em soldas



Fonte: Schönmaier *et al.* (2021, p. 7.141)

Na Figura 22 indica-se esquematicamente que as imagens para determinação do espaçamento interdendrítico foram obtidas no último cordão de solda na linha azul.

Figura 22- Modelo de nucleação e crescimento das dendritas



Fonte: Schönmaier (2021, p. 7140)

Hannah Schönmaier denominou como LOM (Light Optical Microscopy) a técnica de microscopia ótica para análise das dendritas primárias e secundárias no metal de solda. Este procedimento é coerente com a direção preferencial das dendritas de serem aproximadamente paralelas ao sentido transversal das soldas (SCHÖNMAIER et al, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

O planejamento dos metais de base incluiu os aços utilizados nos segmentos químicos e petroquímicos, como o aço C-Mn-Si A 516-70 com espessura de 6,35mm.

O material de adição consumível para soldagem foi o arame conforme normas ASME e AWS da classe ER 70 - S6 Ø 1,2mm.

O aço ASTM A516-70 foi escolhido como metal base nesta pesquisa devido às suas aplicações no projeto e fabricação de equipamentos industriais construídos por meio de processos de soldagem a arco. Essa classe de aço apresenta um conjunto de propriedades desejadas, tais como: boa resistência ao impacto Charpy entalhado em V a baixas temperaturas, conformação mecânica, soldabilidade e usinabilidade. Essas propriedades são exigidas principalmente nas indústrias química e petroquímica. Este aço C-Mn-Si pode ser especificado para equipamentos operando em baixa temperatura até -40 ° C e condições de operações com tensões cíclicas variáveis, como vasos de esferas de armazenamento de gás, vasos de pressão, trocadores de calor, colunas ou torres para processos industriais (EUROCODE, 2005).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Preparação da infraestrutura na FATEC- São Paulo

Com a coordenação do DMT da FEG/UNESP, na fase de planejamento do projeto, foram realizadas visitas e reuniões em instituições de ensino e pesquisa na área da soldagem para avaliar as lacunas de conhecimento em relação ao processo TIG com alimentação dinâmica (HERBER; PIKE; RICE, 2013). O plano de trabalho foi desenvolvido e implementado em 2019. O lay out do laboratório da FATEC-SP e informações das infraestruturas encontram-se indicadas no anexo 6.

3.2.2 Especificação dos equipamentos

O conjunto de equipamentos de translação e controle da tocha em 3 eixos, cabeçote dinâmico de alimentação de arame, tochas para soldagem TIG refrigerada fornecidos pela

SPS, fonte de soldagem Multi-Processos cedida por empréstimo, os sistemas de aquisição de dados pela IMC viabilizaram o desenvolvimento de pesquisa com registro em tempo real dos parâmetros de soldagem (IMC SOLDAGEM,2021).

No planejamento, houve as fases das preparações das infraestruturas dos laboratórios de soldagem da Fatec-SP, consolidação das especificações, aquisição, instalação e testes dos equipamentos fornecidos pela SPS e IMC.

O conjunto de equipamentos com sistemas de aquisição e registro de dados viabilizaram o desenvolvimento do trabalho experimental, destacando-se o registro em tempo real dos parâmetros de alimentação dinâmica do arame consumível.

3.2.2.1 Equipamentos para Soldagem

Adotou-se o equipamento Tartílope – (V2F+Eixo AVC), sistema de deslocamento de tocha de soldagem com movimentação motorizada em dois eixos e eixo linear adicional instalado para atuação no eixo de coordenadas Z, com a função de correção do comprimento do arco (AVC). A Figura 23 mostra o equipamento TARTÍLOPE V3 – (V2F+Eixo AVC).

Figura 23 - TARTÍLOPE V3 – (V2F+Eixo AVC)



Fonte: Labsolda, SPS - UFSC (2018)

As empresas SPS e IMC indicaram as principais características dos sistemas (IMC e SPS (2018):

- Gabinete eletrônico com controle microprocessado.
- IHM com display de LCD para programação e configuração dos parâmetros de soldagem de maneira digital. IHM com botões para configuração manual do posicionamento. IHM com chave liga/desliga para início da movimentação.

- Movimento de oscilação configurável, com diferentes tipos de movimentação: Linear, Triangular e Trapezoidal.
- Possibilidade de regulação individual e digital dos parâmetros de movimentação.
- Velocidade de soldagem (com intervalo de regulação de 5 cm/min até 200 cm/min e possibilidade de ajuste em incrementos de 0,1 cm/min).
- Frequência de oscilação (com intervalo de regulação de 0,1Hz até 5,0Hz e possibilidade de ajuste em incrementos de 0,1Hz).
- Amplitude de oscilação (com intervalo de regulação de 0,1mm até 30mm e possibilidade de ajuste em incrementos de 0,1mm).
- Tempo de parada esquerda (com intervalo de regulação de 0 até 2,0s e possibilidade de ajuste em incrementos de 0,1s).
- Tempo de parada direita (com intervalo de regulação de 0 até 2,0s e possibilidade de ajuste em incrementos de 0,1s).
- Possibilidade de programação de movimento em trajetórias não lineares por marcação de pontos.
- Possibilidade de programação de 4 trechos com parâmetros de movimentação diferentes.
- Duas saídas digitais para comandar troca de parâmetros em fonte de soldagem ou CLP conforme o trecho usado.
- Saída digital para disparo de fonte de soldagem com regulação individual do tempo de espera inicial e final, para início e fim da movimentação.
- Suporte de tocha universal fabricado em alumínio com ajuste de altura regulado por cremalheira e 4 eixos rotacionais com regulação individual para ajuste do posicionamento da tocha.
- Trilho reto com 1,2 metros de comprimento parafusado em perfil de alumínio
- Cabeçote Alimentador com Movimentação Dinâmica de Arame - (Módulo de Alimentação Dinâmica - MAD) – Modelo A7PMDAC. Esse sistema de alimentação dinâmica do arame, integrado à fonte de soldagem dupla saída, tem capacidade de configuração de diferentes frequências e amplitudes para o movimento de avanço e recuo do arame. O dispositivo permite a realização de ensaios para pesquisas relacionadas com a movimentação dinâmica do arame em processos TIG.
- Unidade de controle eletrônica externa e integrada com a fonte de soldagem.
- Maleta SAP integrada ao notebook para aquisição de dados.

Figura 24- Tela do Sistema SAP para aquisição dos parâmetros de Soldagem em tempo real



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25 -Módulo de Alimentação Dinâmica - MAD – Modelo A7PMDAC



Fonte: Labsolda, SPS - UFSC (2019)

3.2.3 Montagem dos sistemas para Soldagem

A montagem dos equipamentos no laboratório da FATEC-SP encontra-se demonstrada na Figura 26. O MAD foi instado em bancada separada para evitar os efeitos da vibração nos trilhos, Tártilope e nas chapas de testes durante a soldagem.

Figura 26 – Equipamentos Montados na Bancada de testes

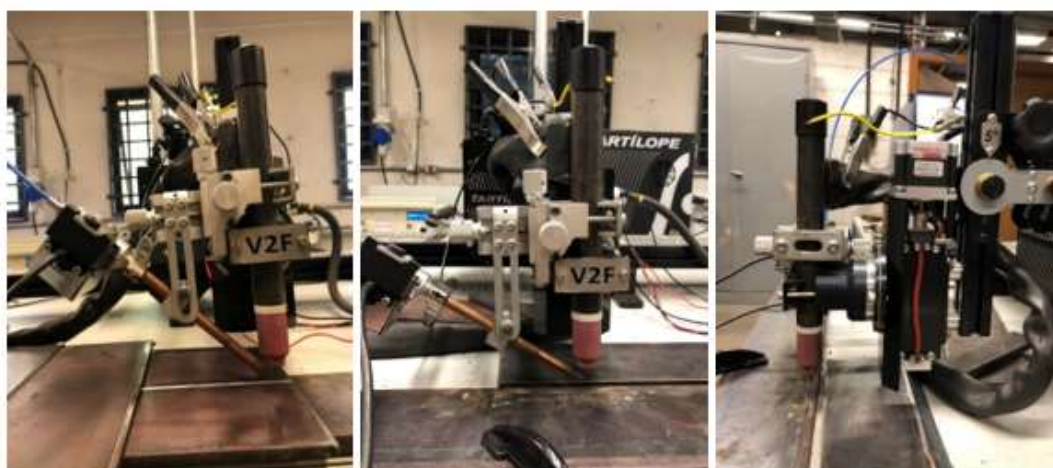


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.4 Comissionamento e testes dos sistemas para Soldagem

A Figura 27 demonstra a montagem da Tocha TIG refrigerada com os posicionadores do sistema de guia do arame consumível. Este conjunto permite os ajustes das variáveis de posição da alimentação dinâmica de arame.

Figura 27 - Preparação para soldagem



Fonte: Elaborado pelo autor

Na fase de comissionamentos dos equipamentos, no Laboratório da FATEC-SP, foram executados cordões sobre chapas mantendo-se constante os parâmetros de soldagem de referência aos utilizados no Labsolda da UFSC e na FATEC-SP. Os testes em junta de topo tipo V indicaram que seriam necessárias outras especificações para soldagem. As Figuras 28 e 29 demonstram a repetibilidade dos experimentos realizados no Labsolda da UFSC e na FATEC-SP. Os cordões sobre chapas foram executados com parâmetros de soldagem conforme Tabela 1.

Tabela 1- Parâmetro de soldagem para deposição de cordões sobre chapa

Corrente	Tensão	Velocidade de Soldagem de	Eletrodo EWth-2	Gás Ar Vazão	Arame ER 70 S6	Velocidade do arame	Frequência Hertz
220 A	14,4 V	10 cm/min	Ø 3,2mm	12 l/min	Ø 1,2mm	1,0 m/min	0/0,5/5/10/15/20

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28- Amostra de deposição sobre chapa com alimentação dinâmica dos experimentos executados no Labsolda-UFSC



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 - Vista de topo do primeiro corpo de prova soldado com alimentação dinâmica no laboratório de soldagem da Fatec-SP



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.5 Projeto das juntas, corte e usinagem dos chanfros das chapas de testes com Metal Base A 516-70 com espessura 6,35mm

Após soldagem sobre chapas, foram desenvolvidos os experimentos para soldagem de junta de topo. Os testes iniciais de comissionamento e ajustes de especificações foram realizados no Labsolda da UFSC no início de 2019. Os parâmetros de soldagem dos cordões sobre chapas foram revisados para a condição de soldagem com juntas de topo. Nesta técnica os efeitos das variações das frequências no MAD apresentaram flexibilidade para ajustes dos parâmetros de soldagem (K-TIG, 2011; DIAMOND GROUND, 2014; PIGOZZO, 2015; WEIZENMANN, 2015; OLIVARES, 2015; CHEN *et al.*, 2016; MARQUES, 2017; PAES, 2016; SILVA *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2019; RIFFEL *et al.*, 2020; AIR LIQUIDE, 2021; EWM GROUP, 2021).

O dimensionamento do projeto do chanfro foi baseado nas premissas para garantir penetração total, soldagem com 01 passe de cada lado e equilíbrio das deformações para assegurar a retirada dos corpos de prova para os ensaios de fadiga e tração transversal.

Os testes com diferentes configurações de Juntas de topo, realizados inicialmente no Labsolda da UFSC, em V e abertura na raiz apresentaram resultados insatisfatórios com falta de penetração e perfurações na raiz.

Após o comissionamento dos equipamentos na FATEC-SP, novos testes foram desenvolvidos com chanfro duplo V. Os resultados foram satisfatórios, mas com oscilação da fusão na raiz. Na sequência adotou-se os testes para avaliar ângulo do bisel, espessura do

nariz e abertura na raiz. Os resultados foram evoluindo e indicaram que a melhor configuração para o projeto com chanfro com duplo V seria com as especificações com ângulo do bisel 40°, abertura na raiz e nariz de 0,00mm. Este dimensionamento confirmou resultados satisfatórios para garantir penetração total na raiz mediante soldagem com 01 passe de cada lado para equilíbrio das deformações em condições específicas de ajustes na geometria de posição.

A Figura 30 demonstra a montagem de 01 chapa de teste, com chanfro com duplo V, ponteadas nas extremidades. Os pontos foram executados com TIG automático com alimentação dinâmica. As especificações de chanfro, montagem, dimensões (6,35x200x300mm) e geometria de posição foram mantidas constantes em todas as chapas de testes.

Figura 30 - Montagem da junta de topo com chanfro duplo V na preparação para soldagem com alimentação dinâmica no laboratório de soldagem da Fatec-SP



Dimensões: 6,35 x 200 x 300mm

Sentido da Laminação →

Fonte: Autor

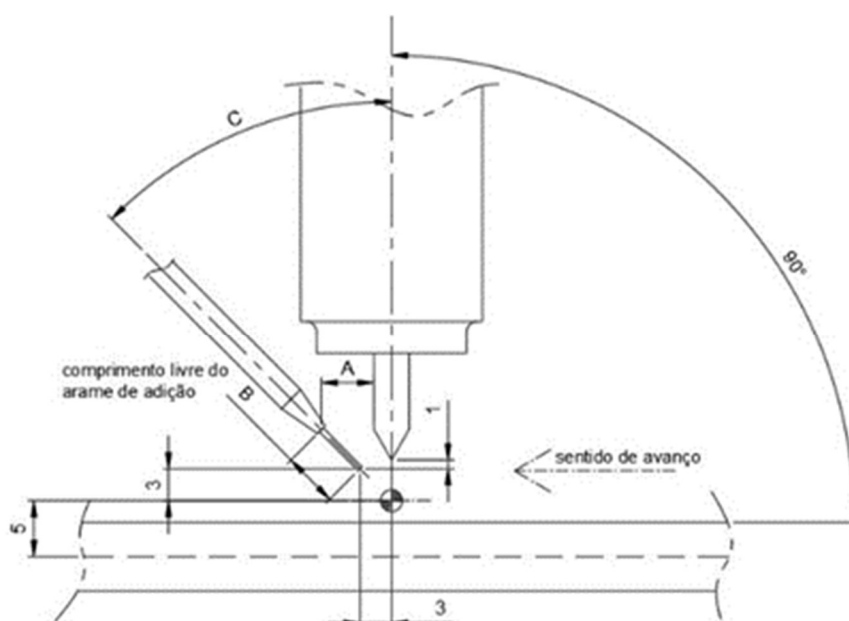
3.2.5.1 Experimentos preliminares e simulações dos parâmetros de soldagem e identificação das variáveis secundárias no processo TIG Automático com alimentação dinâmica

Os experimentos com soldagem em junta de topo duplo V demonstraram que a influência das variáveis geométricas de posição, no processo TIG com alimentação dinâmica, apresentam influência nas condições de soldagem significativamente maiores comparando-se com a técnica de deposição de cordões sobre chapas.

Estabeleceu-se os parâmetros de controle das especificações das variáveis geométricas para assegurar a repetibilidade da penetração total na raiz das juntas de topo com chanfro duplo V. Nesta fase decidiu-se pela especificação de chanfro: Juntas de Topo duplo V, com chanfro simétrico, ângulo do bisel 40°, nariz = 0,0mm e abertura na raiz = 0,00mm com chapas de espessura 6,35mm

A Figura 31 exemplifica o projeto para controle das variáveis geométricas do processo TIG com alimentação dinâmica.

Figura 31 - Variáveis geométricas do processo TIG com alimentação dinâmica na FATEC-SP



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.6 Procedimentos de Soldagem

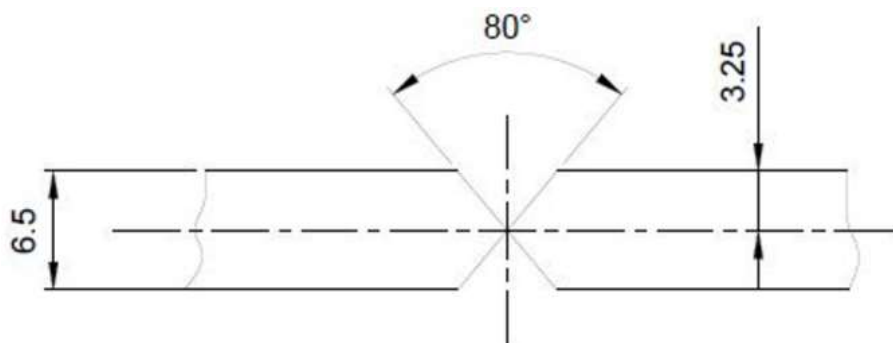
O procedimento de soldagem foi especificado sem pré-aquecimento em chapa de metal base ASTM A516 Grau 70 de 6,4 mm de espessura, com processo C-GTAW manual convencional conhecido como TIG e alimentação de arame dinâmica totalmente automática (GTAW-DWF). Ambos os processos de soldagem usaram gás de proteção Argônio com 99,995% de pureza. Os chanfros foram usinados para preparação da junta em duplo “V” com ângulo total de 80°.

Estabeleceu-se os parâmetros de controle das especificações das variáveis geométricas para assegurar a repetibilidade da penetração total na raiz das juntas de topo com chanfro duplo V. A Figura 31 exemplifica o projeto para controle das variáveis geométricas do processo TIG com alimentação dinâmica.

Os parâmetros primários de soldagem (Tensão, Intensidade de Corrente e Velocidade de Soldagem) foram registrados para os cordões de solda com os controles dos sistemas SAP, Antílope e Fonte de Soldagem. Os parâmetros secundários de soldagem (velocidade de alimentação de arame e frequência da movimentação dinâmica do arame) são registrados no módulo de alimentação dinâmica – MAD e fonte de soldagem

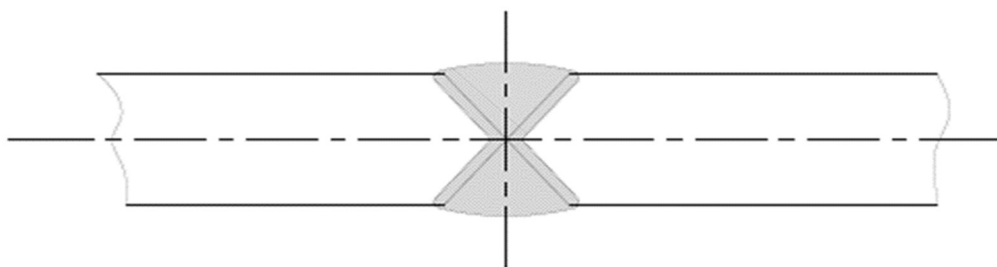
As Figuras 32 e 33 mostram a preparação para soldagem, a geometria da solda e a posição de um passe de soldagem em cada lado da junta. Os parâmetros de soldagem para os processos C-GTAW convencional e alimentação dinâmica de arame (GTAW-DWF) são apresentados na Tabela 2. Os parâmetros de soldagem e montagem da junta foram especificados de forma a garantir a penetração total do selo por interpenetração dos passes, conforme indicado a seguir na macrografia da Figura 47.

Figura 32 - Preparação da junta para soldagem



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 - Junta soldada com penetração total



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2- Parâmetros de Soldagem

Parâmetro	C-GTAW	GTAW-DWF
Intensidade de Corrente (A)	209	210
Voltage (V)	15,4	13,5
Velocidade de Soldagem (cm/min)	7,98 / 12,88	13
Vazão de Gás (l/min)	12	12
Eletrodo de Tungstenio (mm)	EWth-2 Ø 2,4	EWth-2 Ø 3,2
Material de Adição (mm)	Vareta ER 70 S3 Ø 3.2	Arame ER 70 S6 Ø 1,2
Wire feeding Speed (m/min)	Manual	1,5
DEMB (mm)	NA	4
Avanço médio do arame (mm)	NA	4
Angulo do Arame (°)	NA	60
Distancia Arame Eletrodo (mm)	NA	5
Energia Adicionada (KJ/cm)	15/24,2	12,6
Frequência de Alimentação Dinâmica (Hz)	Manual	0,5 / 5,0 / 10,0 / 15,0

Fonte: Elaborado pelo autor

As etapas de ponteamto e soldagem, das chapas de testes, estão indicadas na sequencia das Figuras 34 a 38.

Figura 34 - Preparação para soldagem: Ponteamto com GTAW-DWF



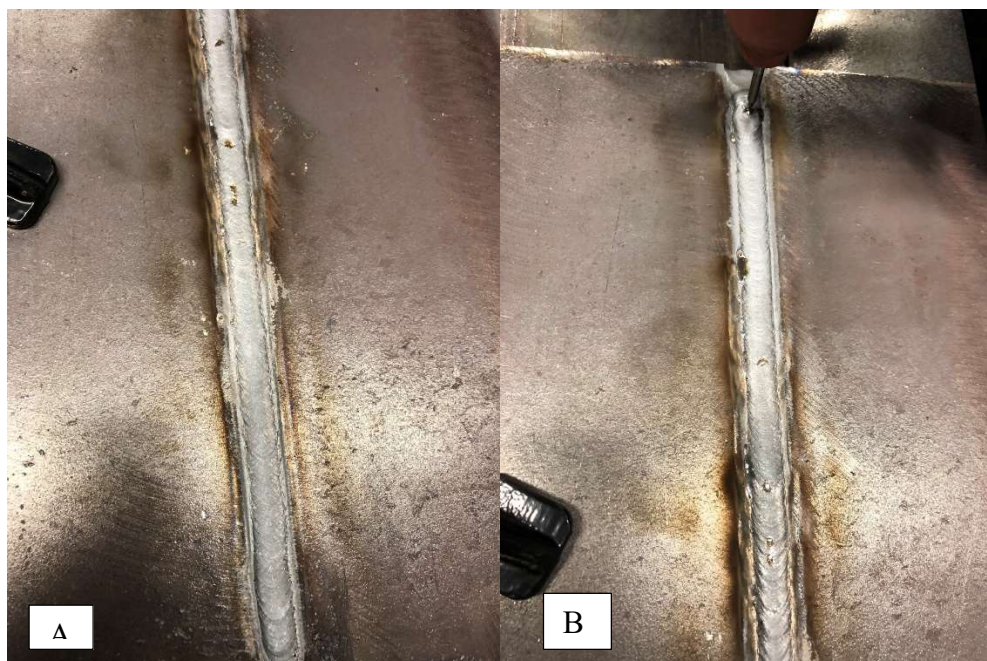
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 - Soldagem do primeiro passe com GTAW-DWF



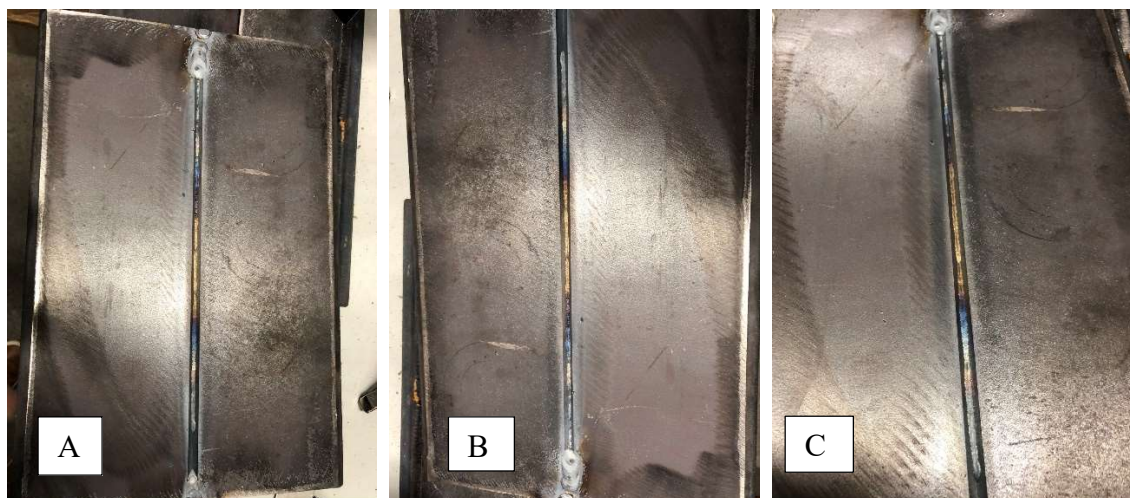
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 36 - Acabamento das soldas com GTAW – DWF (A e B)



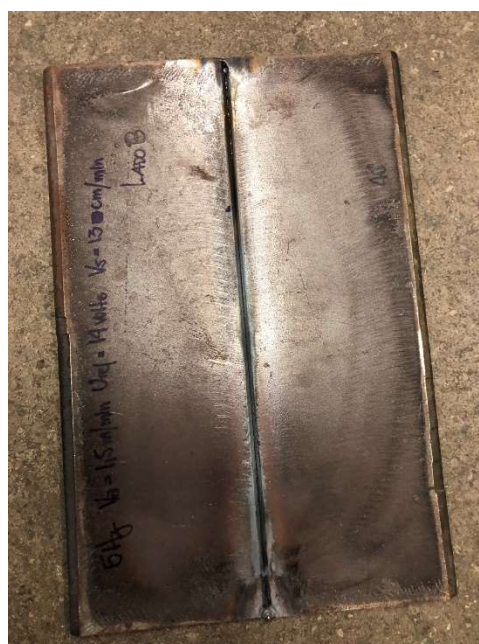
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 37 - Penetração total na raiz (A, B e C)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38- Penetração total com segundo passe de solda

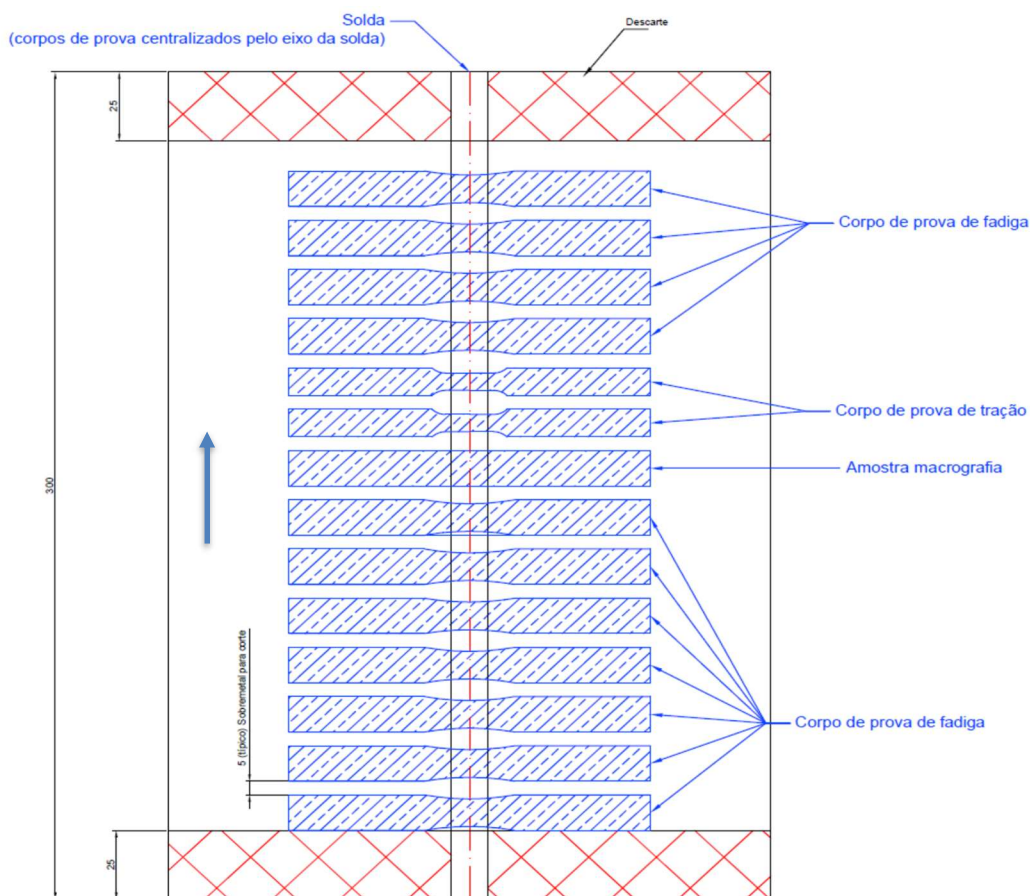


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.7. Layout para retirada dos corpos de prova

A Figura 39 indica a distribuição dos corpos de prova retirados com corte a frio. Utilizou-se serra de fita e usinagem conforme os procedimentos da Norma ASTM E – 466. O eixo longitudinal da solda é paralelo ao sentido de laminação. Os corpos de prova foram retirados no sentido transversal a solda e direção de laminação.

Figura 39- Ilustração do layout de retirada dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.8 Testes de Tração

Os ensaios de Tração foram realizados em temperatura ambiente, de acordo com a norma ASTM E8/E8M – 16a *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. (ASTM, 2016). Utilizou-se a máquina universal de ensaios *Instron 8801*, juntamente com o sistema de aquisição de dados.

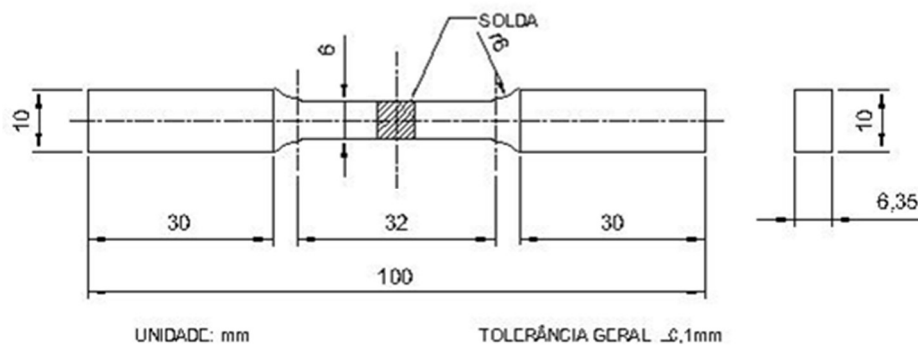
A Resistência ao Escoamento foi definida através do critério offset 0,2% da Norma ASTM, mantendo-se conformidade com o certificado de qualidade do metal base A 516-70, fornecido pela Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A. (USIMINAS). O certificado do metal base encontra-se no Anexo 4.

A Figura 40 mostra a geometria e dimensões dos corpos de prova de tração de acordo com a norma ASTM E8 (ASTM, 2016). A linha de centro da junta de solda foi usada para fazer referência ao meio da área reduzida do corpo de prova. O reforço de solda foi removido por usinagem com o mesmo procedimento utilizado para preparação dos corpos de prova de fadiga.

A Figura 41 indica a geométrica e dimensões dos corpos de prova de tração para o metal base (BM). O corpo de prova de tração foi estabelecido com o eixo transversal ao sentido de laminação da chapa.

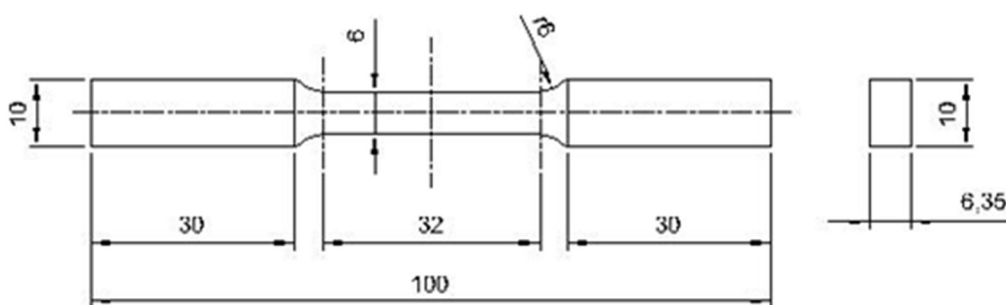
Foram executados 02 ensaios de tração para cada condição testada.

Figura 40 – Dimensões do corpo de prova de tração nas juntas soldadas



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 41 – Dimensões do corpo de prova de tração do metal base



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.9 Testes de fadiga axial

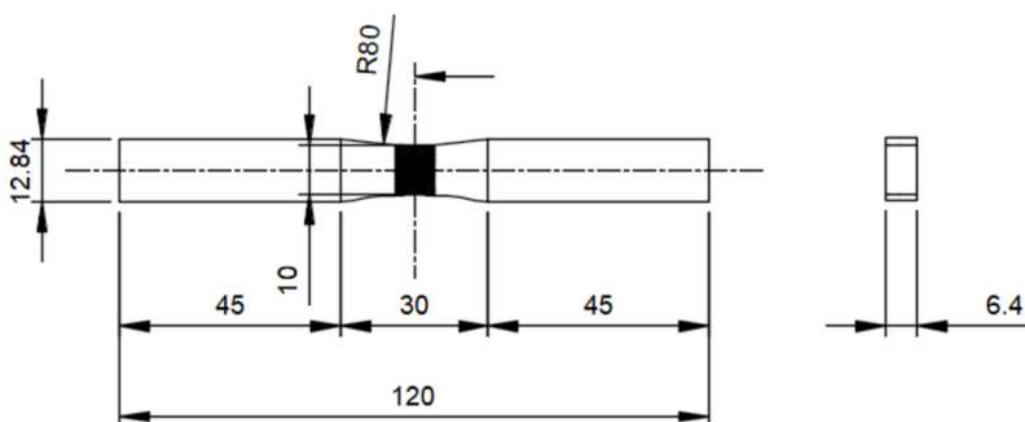
Os ensaios de fadiga foram realizados de acordo com a norma ASTM E - 466-07 - *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. As cargas foram selecionadas em função dos resultados obtidos nos

ensaios de tração do metal de base e das juntas soldadas indicados na tabela 3. Utilizou-se a máquina universal de ensaios Instron 8801, juntamente com o sistema de aquisição de dados.

O certificado de qualidade do metal base A 516-70 indica a relação Resistência ao Escoamento / Resistência a Tração, na ordem de 71%. Considerando-se que todos os corpos de prova nos ensaios de tração romperam no metal base, adotou-se tensões superiores a 71% do limite de resistência à tração para seleção das tensões nos ensaios de fadiga. Dessa forma, as tensões são compatíveis com o regime plástico do metal base. O metal base e as juntas soldadas foram submetidos aos ensaios de fadiga axial com frequência de 20 Hz, sob uma razão de $R = 0,1$, em amplitude constante. Foram levantadas as curvas SN, utilizando-se a norma ASTM 466 para ensaios do aço A 516 70 nas condições sem solda e com juntas soldadas.

A Figura 42 mostra a geometria dos corpos de prova de fadiga de acordo com a norma ASTM E466 (ASTM, 2020). A linha de centro da junta de solda foi usada para fazer referência ao meio da área reduzida do corpo de prova. O reforço de solda foi removido por procedimento de usinagem com remoção 0,1mm e passe final de 0,005mm de acordo com Apêndice X1 da norma ASTM E 466 (*Example of Machining Procedure*). O material de base (BM) foi testado com um conjunto de três corpos de prova para cada nível de tensão com condições de superfície como laminado e superfície retificada com lixa de sic até o grau 320. Os testes de fadiga foram realizados em um equipamento de sistema de teste de fadiga Instron modelo 8801. O método de teste de fadiga consiste na aplicação de cargas axiais com $R = 0,1$ e uma frequência de 20 Hz à temperatura ambiente

Figura 42 – Dimensões do corpo de prova de fadiga



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.9.1 Perfil de Rugosidade

Os perfis de rugosidade do metal base e das juntas soldadas na área reduzida dos corpos de prova de fadiga foram analisados. O procedimento de medição da rugosidade foi feito de acordo com a norma DIN 1990, utilizando a Máquina Mitutoyo Modelo SJ 301. Adotou-se cut off de 0,8mm repetidos 05 vezes em cada campo de análise totalizando 4,0mm.

3.2.10 Distribuição Weibull

A distribuição Weibull de dois parâmetros foi uma ferramenta utilizada para realizar a análise dos dados de fadiga. A análise de Weibull foi utilizada para: (i) verificar a alta confiabilidade e baixa variabilidade dos dados de fadiga quando o parâmetro de forma era maior que 1 ($\beta > 1$); e (ii) estimar o número de ciclos para várias confiabilidades em diferentes níveis de tensões.

Eq. 3 mostra a função de densidade de probabilidade da distribuição Weibull. Na Eq. 5, α e β são os parâmetros de escala e forma, respectivamente, enquanto x corresponde ao número de ciclos (FERNANDES *et al.*, 2020).

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (3)$$

A função de probabilidade acumulada, conforme mostrado na Eq. 6, pode ser deduzido integrando a Eq. 4

$$F_f(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (4)$$

O estimador empírico da Mediana de Bernard (Eq. 5) foi aplicado para estimar a função de probabilidade acumulada, onde i é um número de amostra sequencial e n é o número total de testes realizados para cada nível de tensão (EFFERTZ *et al.*, 2016, FERNANDES *et al.*, 2020).

$$MR = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (5)$$

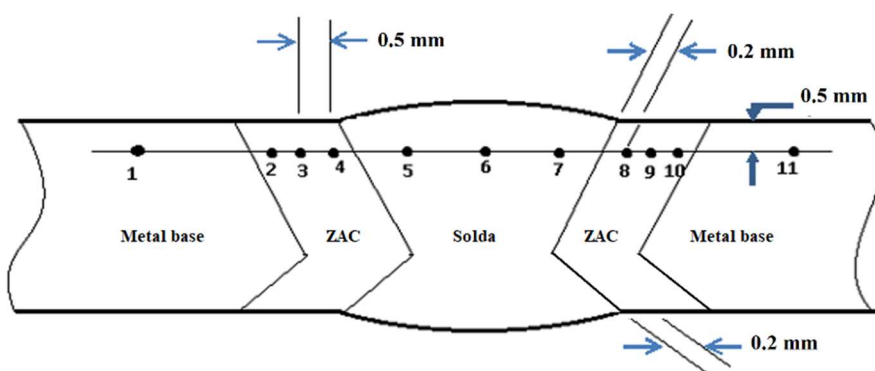
3.2.10.1 Análise estatística

A análise estatística dos dados de fadiga foi baseada no padrão ASTM E739. A análise realizada nos modelos de regressão linear de tensão-ciclos de vida (S-N) incluiu testes de normalidade, gráficos de regressão, intervalos de predição, bandas de confiança para um nível de confiança de 95% e gráficos residuais. O objetivo da análise estatística foi investigar a confiabilidade dos dados de fadiga (ASTM, 2015).

3.2.11 Microestrutura e micro dureza de soldas

A penetração e a qualidade das juntas soldadas foram avaliadas com macrografias e Ensaios Não Destrutivos de Raios-X. Amostras para cada condição de soldagem estudada foram seccionadas longitudinalmente, na região do cordão de solda, para realização de exame metalográfico e ensaio de micro dureza (HV 0,5). Com objetivo de incluir o cordão de solda, a zona afetada pelo calor e o metal base não afetado em ambos os lados da junta soldada, as amostras foram cortadas com o comprimento de aproximadamente 25 mm. A preparação dos corpos-de-prova para o exame metalográfico seguiu as orientações recomendadas pela norma ASTM E3. Após o corte, lixamento e polimento, todos os corpos-de-prova foram condicionados com solução Nital 2% para revelar a microestrutura do material. A determinação do tamanho do grão foi feita por comparação com gráficos padrão, de acordo com BS EN ISO 643. Este padrão é análogo ao teste comparativo ASTM E 112, mas com a vantagem de usar outras ampliações além do original 100x declarado em ASTM E112. Os perfis de micro dureza foram medidos usando-se um testador de micro dureza Shimadzu com cargas de 4,903 N e períodos de indentação de 10 segundos. O perfil de micro dureza foi medido no material de base (BM), zona afetada pelo calor (ZAC) e regiões de solda a 0,5 mm da superfície, conforme mostrado esquematicamente na Figura 43 (pontos 1 a 11).

Figura 43 – Posição dos pontos de micro durezas



Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado da Norma N 133 - Petrobras

3.2.12 Procedimento experimental para micrografias

Amostras para cada condição de soldagem estudada foram seccionadas longitudinalmente, na região do cordão, para realização de exame metalográfico. O comprimento das amostras foi de aproximadamente 20 a 25 mm, de modo a incluir o cordão, a ZTA e o metal base em ambos os lados da solda.

A preparação dos corpos de prova (CP) para exame metalográfico seguiu as orientações preconizadas pela norma ASTM E3. Após o corte, as amostras foram embutidas a quente em uma embutidora ALCRISA/ Teclago mod EMB 30 D, em resina fenol- formaldeído (Baquelite®). Os CPs embutidos foram lixados com lixas d'água de granulometria 120, 240, 400, 600 e 1200 grit (abrasivos/pol²), em uma lixadeira Struers Knuth Rotor 2. Entre cada etapa de lixamento os Cps foram lavados em água corrente para eliminar quaisquer traços de abrasivos da lixa anterior. Cada nova etapa de lixamento, os CPs foram rotacionadas em 90°.

Posteriormente, os CPs foram polidos em feltro de lã sintética com suspensão de diamante 3 μm , 1 μm e o polimento final foi realizado com sílica coloidal 0,06 μm . Os Cps polidos foram atacados com solução Nital 2% para revelar a microestrutura do material.

Os corpos de prova foram analisados com o auxílio de um microscópio óptico Carl Zeiss mod. AxioImager A2m, com uma câmara Zeiss ICc 3 acoplada (3MP). Foram registradas macrografias do cordão de solda com aumento nominal de 12,5x e também micrografias com aumentos de 100 e 200 x.

Para indexar as imagens foi estabelecido um sistema de coordenadas cartesianas, sendo o eixo $x=0$ definido no centro geométrico aproximado do cordão de solda superior. A partir desse ponto, foram registradas imagens com aumento nominal de 200x em intervalos de 0,5 mm à direita e à esquerda da posição $x=0$, utilizando-se a escala móvel disponível na mesa de trabalho do microscópio, considerando $y = -1$ mm a partir da superfície do CP. Também foram registradas imagens tendo como referência no eixo y o centro geométrico da interpenetração entre os 2 cordões de solda. Novamente utilizou-se aumento nominal de 200x em intervalos de 0,5 mm à direita e à esquerda da posição $x=0$.

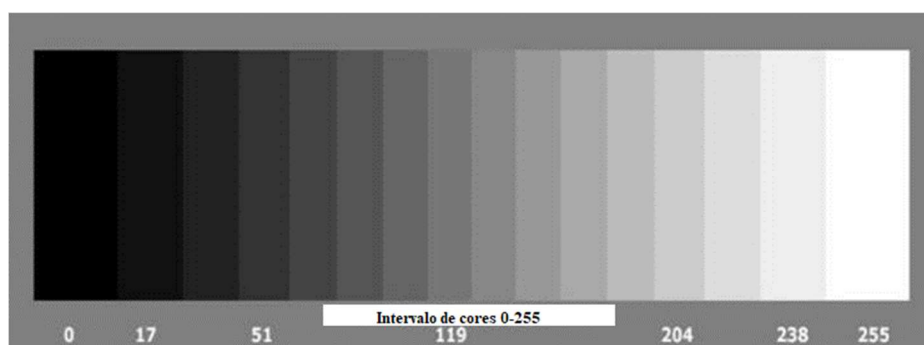
A partir das imagens capturadas, com aumento nominal de 200x, o espaçamento interdendrítico foi determinado utilizando-se medidas do comprimento da seção das dendritas obtidas e a função plot profile do software ImageJ.

3.2.13 Imagens digitais

As imagens digitais obtidas são formadas por elementos de imagem denominados pixels. A palavra pixel é baseada na contração de pix ("imagens") e el (para "elemento"). Um pixel é considerado como o menor componente de uma imagem digital. Cada um dos pixels que pertence a uma imagem possui um valor de atributos que descrevem o brilho e informações de cor Red, Green e Blue.

Para imagens em tons de cinza, o formato de pixel mais comum é o byte, onde este número é armazenado como um inteiro de 8 bits, fornecendo uma faixa de valores possíveis de 0 a 255. Convencionalmente, zero é considerado preto e 255 é branco. Os valores intermediários constituem os diferentes tons de cinza, conforme indicado na Figura 44.

Figura 44 – Padrões de cinza ImageJ



Fonte: site mathematica.stackexchange.com (2021)

O ImageJ é um programa de computador de domínio público, feito em Java, destinado ao processamento de imagens e desenvolvido no National Institutes of Health

Esse programa apresenta múltiplas funcionalidades como: exibir, editar, analisar, processar, salvar e imprimir imagens de 8, 16 e 32 bits; calcular estatísticas de área e valor de pixel de seleções definidas pelo usuário; medir distâncias e ângulos; criar histogramas de densidade e gráficos de perfil de linha. O ImageJ oferece suporte a funções de processamento de imagem padrão, como manipulação de contraste, nitidez, suavização, detecção de bordas e filtragem de mediana. A calibração espacial está disponível para fornecer medições dimensionais do mundo real em unidades como milímetros ou microns.

O ImageJ foi projetado com uma arquitetura aberta que fornece extensibilidade por meio de plug-ins Java. Os plug-ins e macros escritos pelo usuário tornam possível resolver

quase todos os problemas de processamento ou análise de imagens (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIR, 2012).

3.2.14 Espaçamento Inter dendrítico

No presente estudo foi realizada uma contagem semiautomática utilizando-se o ImageJ e o método D, originalmente descrito por Vandersluis e Comondore (2017).

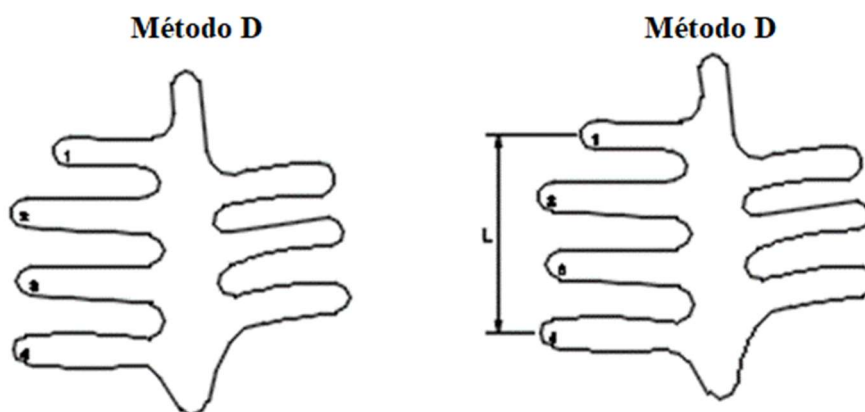
3.2.15 Análise de grãos dendríticos e padrões de solidificação

A zona de fusão das soldas das placas de teste foi analisada para caracterizar a morfologia de solidificação e medir o espaçamento do braço dendrítico secundário (SDAS).

O método de medição SDAS utilizado neste trabalho é denominado “método D” em homenagem a Eli Vandersluis e Comondore Ravindran (VANDERSLUIS; COMONDORÉ, 2017). Este método consiste em contar os ramos que interceptam uma linha ao longo de um lado do braço primário dendrítico (N), conforme mostrado na Figura 45, e dividir o resultado pelo comprimento considerado. Essa abordagem é útil quando é difícil distinguir os dois lados dos ramos dendríticos.

As dendritas são identificadas na microscopia ótica mediante análise no interior dos grãos. Este aspecto evita o risco de confundir com a Ferrita Alinhada de Segunda Fase que estão localizadas preferencialmente nos contornos dos grãos (CAMPBELL, 2003; SCHÖNMAIER *et al.*, 2021).

Figura 45 - Método D para análise das dendritas



Fonte: Elaborado pelo autor

O SDAS foi calculado usando a Equação 6 (VANDERSLUIS; COMONDORÉ, 2017):

$$SDAS = L / ((N-1)) \quad (6)$$

Onde (Figura 45):

SDAS é o espaçamento do braço dendrítico secundário

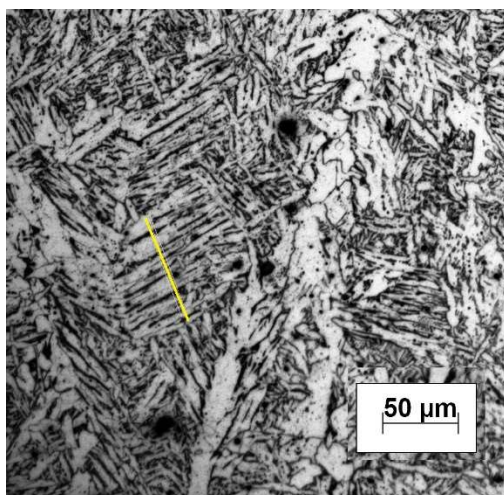
L um comprimento medido ao longo de uma seção do ramo primário do dendrito

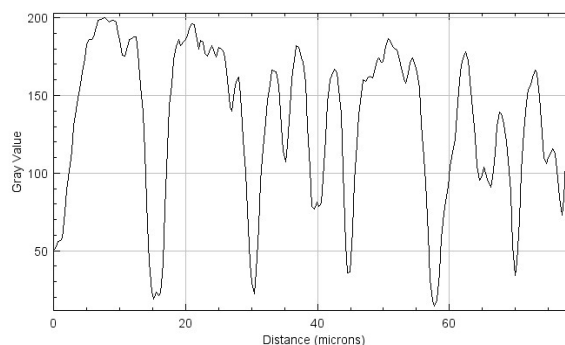
N as contagens interceptadas.

A determinação de SDAS foi realizada utilizando os recursos de processamento de imagem do ImageJ. Primeiramente, as imagens capturadas foram atribuídas a uma calibração espacial, utilizando uma imagem previamente capturada de uma Grátícula Physer SGI (0,01 mm (10µm / divisão), na mesma ampliação usada para capturar imagens de microscopia (200X), resultando em uma relação de 0,3401 µm / pixel. Após calibração especial, uma linha foi desenhada ao longo dos braços primários dos dendritos escolhidos. Em seguida, a função medida de ImageJ retornou um comprimento de linha em microns (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIR, 2012).

Para contar as interseções, o perfil do gráfico de função foi usado. Esta função reajustou um gráfico (perfil) de valores de tom ao longo de uma linha definida. Como os limites dos dendritos eram mais escuros do que os internos, cada interseção corresponde a um mínimo no perfil do gráfico. Esta abordagem foi usada para garantir a repetibilidade e reprodutibilidade das contagens de braços SDAS, juntamente para minimizar problemas de interpretação pessoal. A Figura 48 mostra um exemplo de medição de SDAS com ImageJ para a condição C-GTAW.

Figura 46- Exemplo de medição de SDAS com ImageJ C-GTAW





Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 46 temos, $L = 73$, $N = 11$, então $SDAS = 7,3 \mu\text{m}$.

3.2.16 Calibração da medição do espaçamento Inter dendrítico utilizando-se o ImageJ

Para a medição do espaçamento Inter dendrítico foi realizada inicialmente a calibração espacial do ImageJ utilizando-se uma imagem previamente capturada de uma escala micrométrica SGI Physer Graticules com 1 mm de comprimento e 0,01 mm como menor divisão. Foi traçada uma linha paralela ao eixo da escala micrométrica de modo a cobrir a maior distância possível entre marcas da escala e anotado o seu comprimento em pixels. Uma vez que a distância em microns é conhecida, foi calculada a relação pixel/micron.

Para a determinação do SDS foi utilizada a ferramenta Plot Profile que busca verificar as escalas de cinza de cada pixel sob as linhas marcadas, resultando em um gráfico com escala de Cinza vs Distância. As regiões dos espaços Inter dendríticos são mais escuras, o que permitiu facilmente identificar essas transições pelos valores mais baixos da tonalidade dos pixels (Figura 46).

3.2.17 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas fraturas de Fadiga

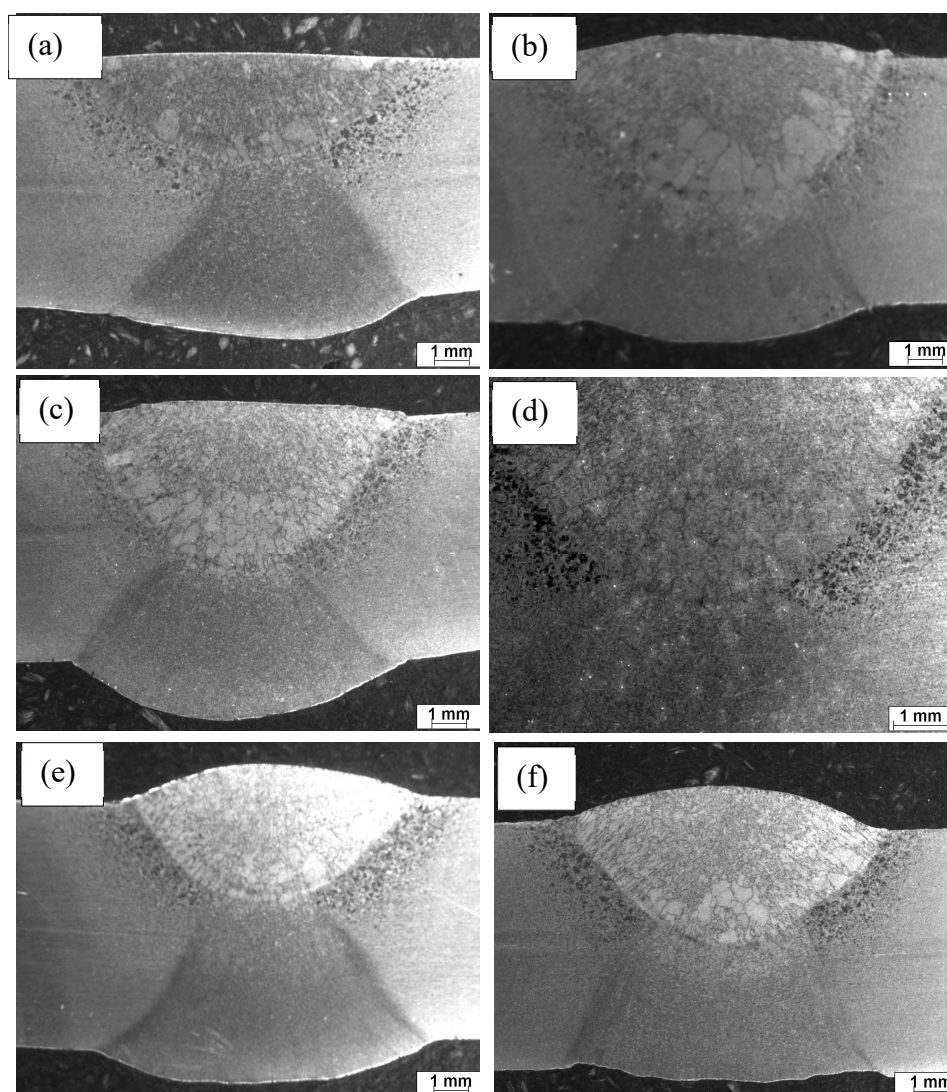
As fraturas dos corpos de prova de fadiga foram analisadas usando um Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss modelo LEO 435 VPi. Os parâmetros utilizados foram: tensão de 15 kV e corrente de 500 pA. As imagens foram obtidas por meio do Detector de Elétrons Secundários (SE).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PENETRAÇÃO E QUALIDADE DAS SOLDAS

A penetração e a qualidade das juntas soldadas foram avaliadas com macrografias. A Figura 47 mostra as macrografias sob microscopia óptica (12,5x nominal). As amostras foram preparadas de acordo com a prática metalográfica normal (ASTM E3) e gravadas com Nital 2% para revelar as macroestruturas (NEVES, Nasareno *et al.* 2022)

Figura 47- Macrografias de juntas soldadas



Fonte: Elaborado pelo autor

Obs.: (a) C-GTAW, (b) GTAW-DWF com 0,5 Hz, (c) GTAW-DWF com 5 Hz, (d) GTAW-DWF com 5 Hz (detalhe), (e) GTAW-DWF com 10 Hz, (f) GTAW-DWF com 15 Hz.

Todas as macrografias mostraram um aspecto semelhante dos dois cordões de solda, interpenetrando-se na zona da raiz. Observe que o cordão 2 funde a base do cordão 1, garantindo a penetração total das juntas soldadas. Também foi possível verificar a diferença na simetria, comprimento e alinhamento dos cordões no processo manual e automático. Outro fator que afeta a macroestrutura é a diferença na taxa de troca de calor de cada processo.

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da UNESP/FEG/DMT em conformidade com a norma ASTM E8M. Foram planejados 2 ensaios de tração transversal da junta soldada para cada condição de soldagem à temperatura ambiente. Os resultados do metal base sem solda estão compatíveis com os dados do certificado de qualidade da Usiminas (Anexo 5). Todos os resultados atendem aos requisitos especificados na norma do metal base A 516-70. Os corpos de prova foram dimensionados com eixo transversal em relação à orientação principal da junta soldada. Os resultados dos ensaios de tração encontram-se resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Ensaio de tração: Junta Soldada e Metal Base

CDP / Freq. Hertz	LIMITE DE RESISTENCIA A TRAÇÃO (MPa)	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	Local da Fratura
T1 / 0,5	567	403	Metal Base
T2 / 0,5	578	410	Metal Base
T1 / 5,0	564	400	Metal Base
T2 / 5,0	563	400	Metal Base
T1 / 10,0	581	412	Metal Base
T2 / 10,0	580	410	Metal Base
T1/15,0	580	420	Metal Base
T2/15,0	575	424	Metal Base
T1/C-GTAW	567	409	Metal Base
Metal Base T1 / A 516-70	545	385	Metal Base
Metal Base T2 / A 516-70	546	386	Metal Base
USIMINAS - A 516-70	547	388	Metal Base

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios de tração foram realizados para determinar os níveis de tensão dos testes de fadiga. Considerando-se o espalhamento dos resultados dos ensaios de tração, os valores médios foram calculados e verificou-se que a relação, informada no certificado da chapa, de resistência ao escoamento na ordem de 71% da resistência a tração estava compatível para as juntas soldadas. As propriedades mecânicas dos materiais encontradas estão nas seguintes

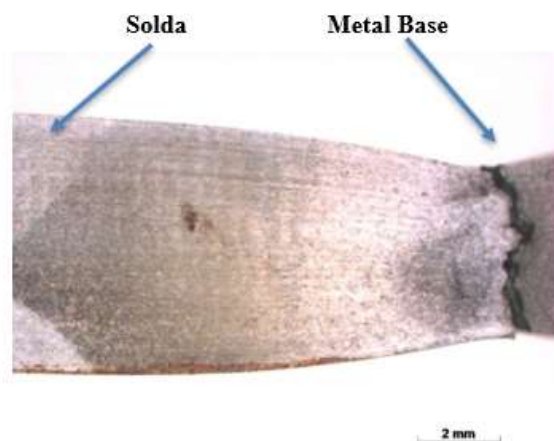
faixas médias: resistência à tração de (546,0) MPa e resistência ao escoamento de (386,3) MPa para o material de base e resistência à tração de (573,5) MPa e resistência ao escoamento de (408,8) MPa para as juntas soldadas, respectivamente. Todos os ensaios de tração das juntas soldadas (direção transversal em relação ao eixo da solda) fraturaram na região do metal base, conforme demonstrado nas Figuras 48, 49(a) e 49(b). A Figura 50 indica o gráfico Tensão x Deformação representativo para o processo C-GTAW.

Figura 48 – Corpos de Prova de Tração



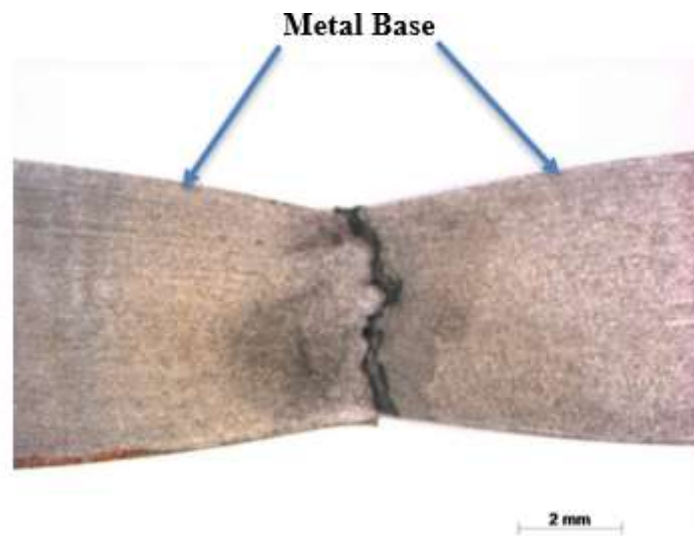
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 49(a) – Ruptura do Corpo de Prova de Tração-GTAW-DWF 10Hz



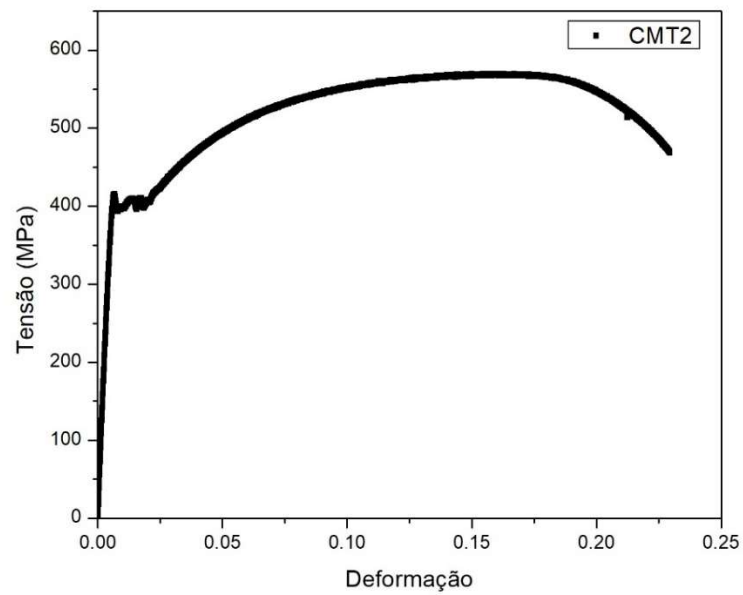
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 49(b) – Ruptura do Corpo de Prova de Tração-GTAW-DWF 10Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 50 - Gráfico Tensão Deformação



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 RUGOSIDADE

A Tabela 4 mostra a rugosidade média obtida para as faces lixadas dos corpos de prova. A rugosidade das condições de soldagem corresponde às superfícies lixadas com remoção do reforço das soldas e metal base nas condições “como laminado” e lixado. A rugosidade média foi inferior a 2 μm e quase semelhante para todas as condições de soldagem.

Tabela 4- Rugosidade média (Ra)

Rugosidade media (μm)						
Metal Base (Laminado)	Metal Base (Lixado)	C-GTAW	GTAW-DWF 0.5Hz	GTAW-DWF 5Hz	GTAW-DWF 10Hz	GTAW-DWF 15Hz
1,33±0,04	0,65 ± 0,23	0,62 ± 0,19	0,80 ± 0,15	0,80 ± 0,08	0,77 ± 0,26	0,66 ± 0,37

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 ANÁLISE QUÍMICA

A Tabela 5 mostra as análises químicas do metal base, do metal de solda diluído e da vareta e arame consumíveis realizadas por espectrofotômetros de emissão óptica com equipamento ARL METAL ANALYZER:

Tabela 5-Composição Química (Peso %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	V	Cr	Ni	Fe
A 516 70	0,22	0,18	1,01	0,03	0,01	0,01	0,007	0,014	0,01	Balance
Vareta ER 70S3 (1)	0,09	0,62	1,32	0,009	0,012	0,056	0,003	0,021	0,005	Balance
Arame Metal ER 70S6 (2)	0,07	0,86	1,47	0,013	0,011	0,13	0,005	0,03	0,015	Balance
Metal de Solda Diluído	0,204 /	0,29 / 0,335	1,067 /	0,003 /	0,002 /	0,02 / 0,034	0,006 /	0,019 /	0,029 /	Balance
Passes 1 e 2 C-GTAW (1)	0,181		1,082	0,004	0,002		0,006	0,018	0,029	
Metal de Solda Diluído	0,175 /	0,585 /	1,29 / 1,253	0,002 /	0,004 /	0,074 /	0,006 /	0,014 /	0,025 /	Balance
Passes 1 e 2 (2) GTAW-DWF 0.5 Hz	0,179	0,485		0,001	0,007	0,058	0,006	0,014	0,025	
Meta de Solda Diluído	0,182 /	0,538 / 0,51	1,224 / 1,17	0,001 /	0,002 /	0,073 /	0,006 /	0,014 /	0,025 /	Balance
Passes 1 e 2 (2) GTAW-DWF 5 Hz	0,166			0,001	0,001	0,065	0,006	0,014	0,025	
Meta de Solda Diluído	0,204 /	0,584 /	1,259 /	0,001 /	0,001 /	0,069 /	0,006 /	0,014 /	0,025 /	Balance
Passes 1 e 2 (2) GTAW-DWF 10 Hz	0,147	0,709	1,317	0,001	0,001	0,083	0,006	0,014	0,025	
Metal de Solda Diluído	0,169 / 0,15	0,522 / 0,64	1,255 /	0,001 /	0,001 /	0,059 /	0,008 /	0,018 /	0,028 /	Balance
Passes 1 e 2 (2) GTAW-DWF 15 Hz			1,297	0,001	0,001	0,075	0,009	0,020	0,028	

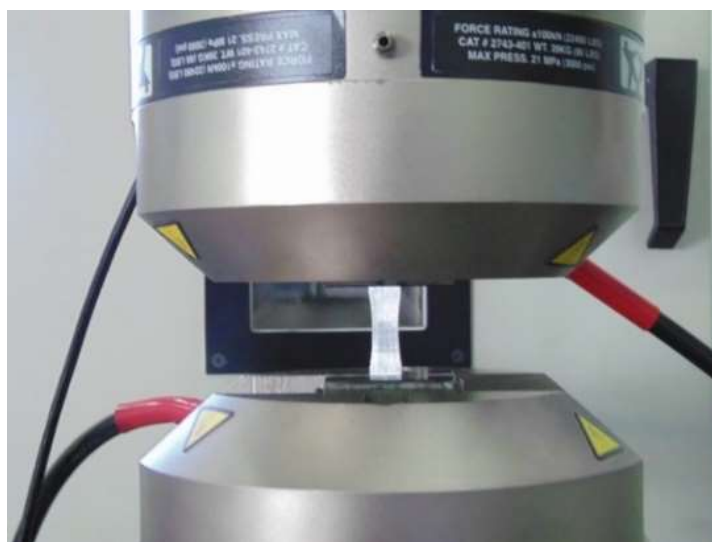
Fonte: Elaborado pelo autor

A composição química em metais de solda diluídos indicada na Tabela 6 apresenta o teor de Mn é alto com GTAW-DWF do que com C-GTAW e este fato pode contribuir para atingir alta micro dureza nos metais de solda. O processo GTAW-DWF utiliza arame ER 70 S6 com teor de Manganês 1,47%, sendo que o processo convencional C-GTAW é manual e o consumível é vareta ER 70 S3 com manganês 1,32%. Quando analisamos o metal de solda diluído ocorre diminuição do teor de manganês devido a participação do metal base, mas as diferenças entre os processos aumentam. O metal de solda diluído apresenta teor de manganês na ordem de 1,1% para C-GTAW E 1,3% para GTAW-DWF. Desta forma, a diferença média de 0,15% de Manganês entre os consumíveis passa para 0,2% no metal de solda diluído.

4.5 ENSAIOS DE FADIGA

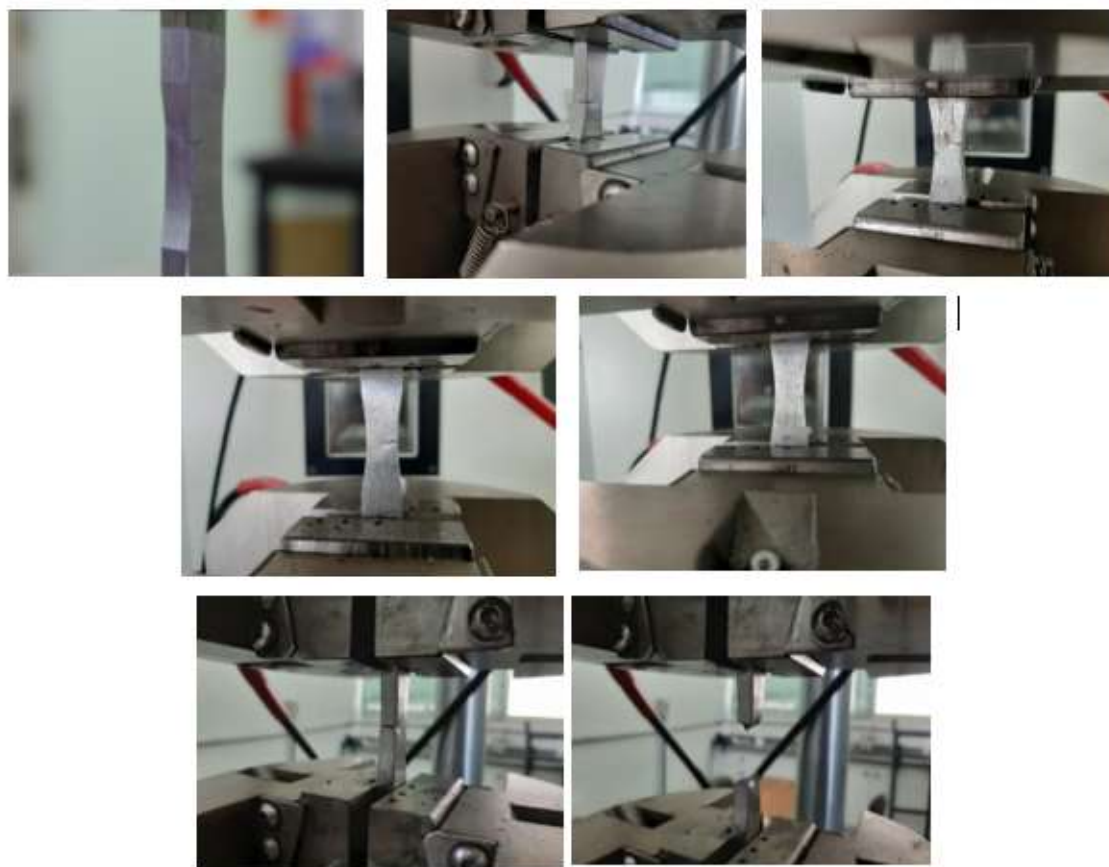
Nas Figuras 51 a 54 estão indicados os ensaios de fadiga com os corpos de prova posicionados na Instron 8801. Os corpos de prova foram dimensionados com eixo transversal em relação à orientação principal da junta soldada. Os ensaios de fadiga foram realizados no Laboratórios de Fadiga e Materiais Aeronáuticos da FEG-UNESP, com a máquina universal de ensaios Instron 8801.

Figura 51 - Ensaio de fadiga axial na Instron 8801



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 - Detalhe da nucleação da trinca no Ensaio de fadiga axial na Instron 8801



Fonte: Elaborado pelo autor.

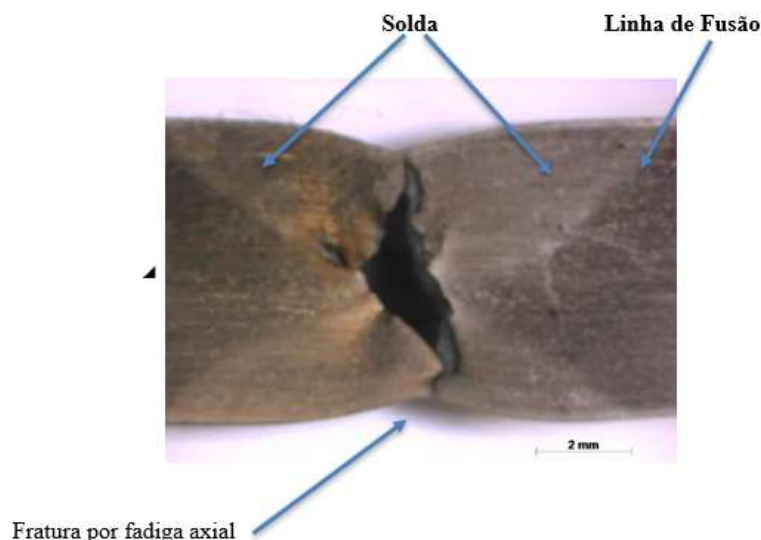
Figura 53 - Ensaio de fadiga axial no metal base “como laminado” na Instron 8801



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 54 encontra-se indicado a macrografia representativa da ruptura por fadiga nas soldas com C-GTAW. No processo convencional as falhas por fadiga ocorreram na zona bruta de fusão das soldas.

Figura 54 – Macrografia do C-GTAW após Ensaio de fadiga axial



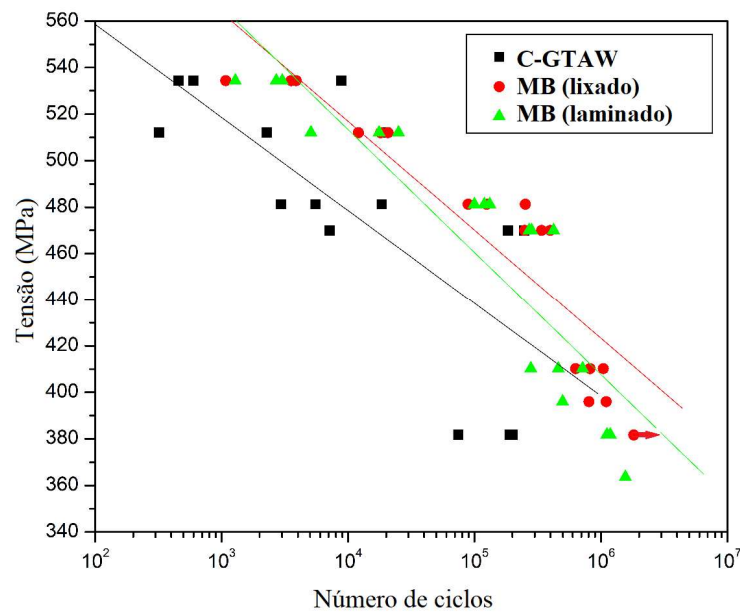
Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados e tendências da resistência à fadiga das juntas soldadas, nos experimentos desenvolvidos neste projeto, estão discutidos a seguir.

4.5.1 C-GTAW convencional e metal base

A Figura 55 demonstra as curvas $\sigma_{\max}$ -N com os dados de fadiga para o processo de soldagem convencional (C-GTAW) e as condições do material base como laminado e lixado. Os comportamentos em fadiga, no nível de alta tensão de 534 Mpa, foi próxima para o material de base e as juntas soldadas com GTAW convencional. No entanto, em níveis de tensão mais baixos, quando o período de nucleação da trinca é responsável por uma parte significativa da vida em fadiga, houve uma diminuição substancial deste parâmetro para o processo de soldagem convencional. Em um nível de tensão de 481 MPa, a resistência à fadiga das juntas soldadas foi reduzida de 155.894 para 12.027 ciclos em comparação com o material base lixado. O mecanismo responsável por essa redução no processo GTAW convencional pode estar relacionado aos micros defeitos de solda encontrados no MEV, o perfil de micro dureza/microestrutura e as relações SDAS, conforme mostrado nas Seções 4.8, 4.9, 4.10 e 4.12.

Figura 55 - Vida em fadiga do metal base (lixado e “como laminado”) e processo C-GTAW

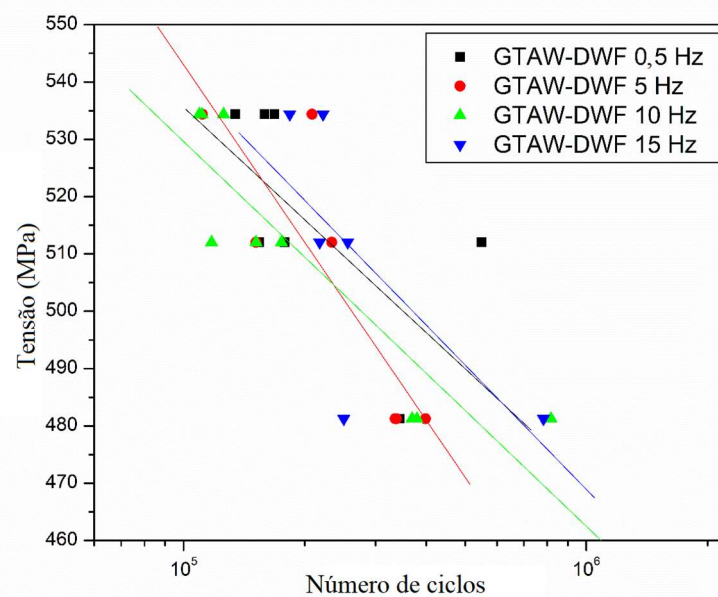


Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.1.1 GTAW - DWF

A Figura 56 mostra as curvas $\sigma_{\max}$ -N para o processo de soldagem GTAW-DWF com diferentes frequências. As curvas $\sigma_{\max}$ -N mostram o efeito da frequência da alimentação dinâmica na resistência à fadiga nas juntas soldadas.

Figura 56 - Vida em fadiga das juntas soldadas com processo automático GTAW -DWF com frequência de 0,5; 5; 10 e 15 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

No nível de tensão de 534 MPa, o melhor comportamento em fadiga foi alcançado na frequência de 15 Hz. No entanto, a resistência à fadiga foi semelhante para todas as frequências no nível de tensão mais alto. Os resultados experimentais do processo de soldagem GTAW-DWF apresentaram vida em fadiga de 202.786 ciclos para a frequência de 15Hz. As condições de soldagem com 0,5Hz e 5Hz foram semelhantes com vidas em fadiga de 153.899 e 159.886 ciclos, respectivamente. Para a frequência de 10Hz, a resistência à fadiga foi de 115.356 ciclos.

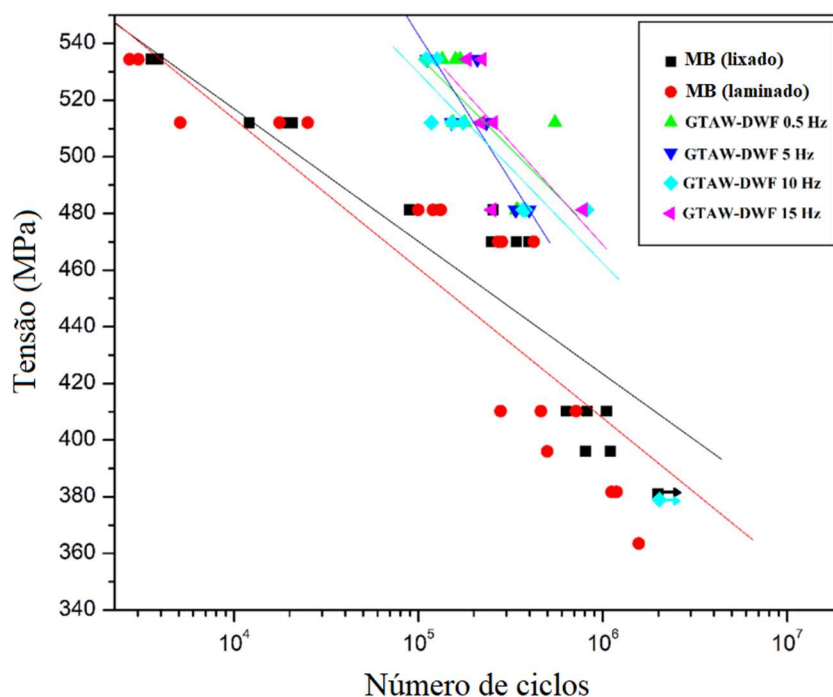
No nível de tensão de 512 MPa, os resultados da resistência à fadiga com GTAW – DWF foram: de 294.126 ciclos para 0,5Hz; de 236.636 para 15Hz; de 192.304 ciclos (média) para 5Hz e de 147.947 ciclos para 10Hz.

No nível de tensão de 481 MPa, os resultados apresentaram um aumento da resistência à fadiga com GTAW – DWF de 522.143 ciclos para 10 Hz, seguido por 516,364 ciclos para 15Hz, 357.288 ciclos para 5Hz e 342.324 ciclos para 0,5 Hz. No regime de fadiga de alto ciclo, a frequência da alimentação dinâmica de arame apresentou significativo efeito na resistência à fadiga das juntas soldadas. Em geral, as altas frequências de 10 Hz e 15 Hz resultaram em um comportamento em fadiga melhor do que as baixas frequências de 0,5 Hz e 5 Hz. O melhor comportamento no regime de fadiga de alto ciclo foi obtido para a frequência de 10 Hz.

4.5.1.2 GTAW - DWF Metal Base

A Figura 57 mostra as curvas $\sigma_{\max}$ -N para o processo GTAW-DWF em comparação com o material base. Os processos de soldagem são frequentemente associados à redução da vida por fadiga devido a defeitos de solda. No entanto, neste trabalho, as juntas soldadas com o processo TIG com alimentação dinâmica de arame apresentaram aumento significativo da resistência à fadiga em comparação com o material base. A resistência à fadiga para o GTAW-DWF com juntas soldadas de 10 Hz melhorou seus valores de apenas 2.837 para 115.356 ciclos e de 155.894 para 522.143 ciclos para níveis de tensão de 534 MPa e 481 MPa, respectivamente, em comparação com o material base (lixado). No nível de tensão de 382 MPa, a vida em fadiga resultante, tanto com GTAW-DWF com 10 Hz quanto ao metal base lixado, atingiram 2×10^6 ciclos sem fratura. Nesta tensão, o metal base na condição como laminada apresentou vida de fadiga de 1.151.922 ciclos (média).

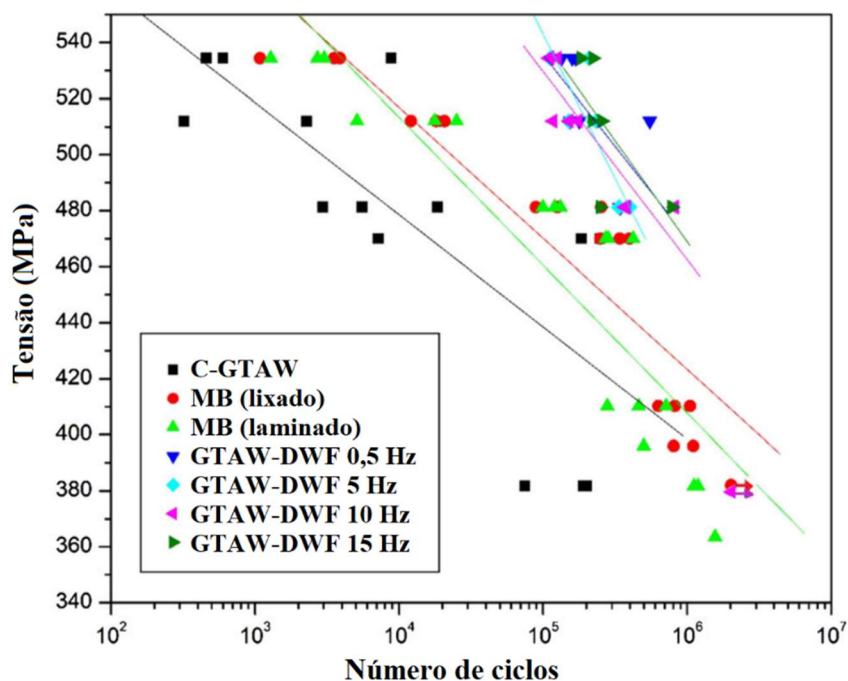
Figura 57- Curvas $\sigma_{\max.} \times N$ para o processo GTAW-DWF em comparação com o material base



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 58 mostra as curvas $\sigma_{\max}$ -N para o processo GTAW-DWF em comparação com o processo convencional. As curvas $\sigma_{\max}$ -N para o material base também são apresentadas para fins de comparação. O aumento da resistência a fadiga com processo GTAW-DWF em comparação com o processo de soldagem convencional foi ainda maior do que em comparação com o material base. A resistência a fadiga para o GTAW-DWF com juntas soldadas de 10 Hz melhorou os valores de 3.288 para 115.356 ciclos e de 12.027 para 522.143 ciclos para níveis de tensão de 534 MPa e 481 MPa, respectivamente, em comparação com o processo convencional. A vida em fadiga das juntas soldadas com o processo GTAW convencional teve um valor de apenas 2,3% da vida útil da fadiga para o processo GTAW-DWF com 10 Hz. Os resultados experimentais deste trabalho indicaram o grande potencial do processo GTAW-DWF para produzir juntas soldadas que não reduzem a resistência a fadiga, alcançando um excelente desempenho de fadiga em comparação com os processos convencionais de soldagem. Os mecanismos da melhoria da resistência a fadiga do processo GTAW-DWF serão discutidos nas outras seções.

Figura 58- Curvas $\sigma_{\max.} \times N$ para o processo GTAW-DWF em comparação com o material base e C-GTAW

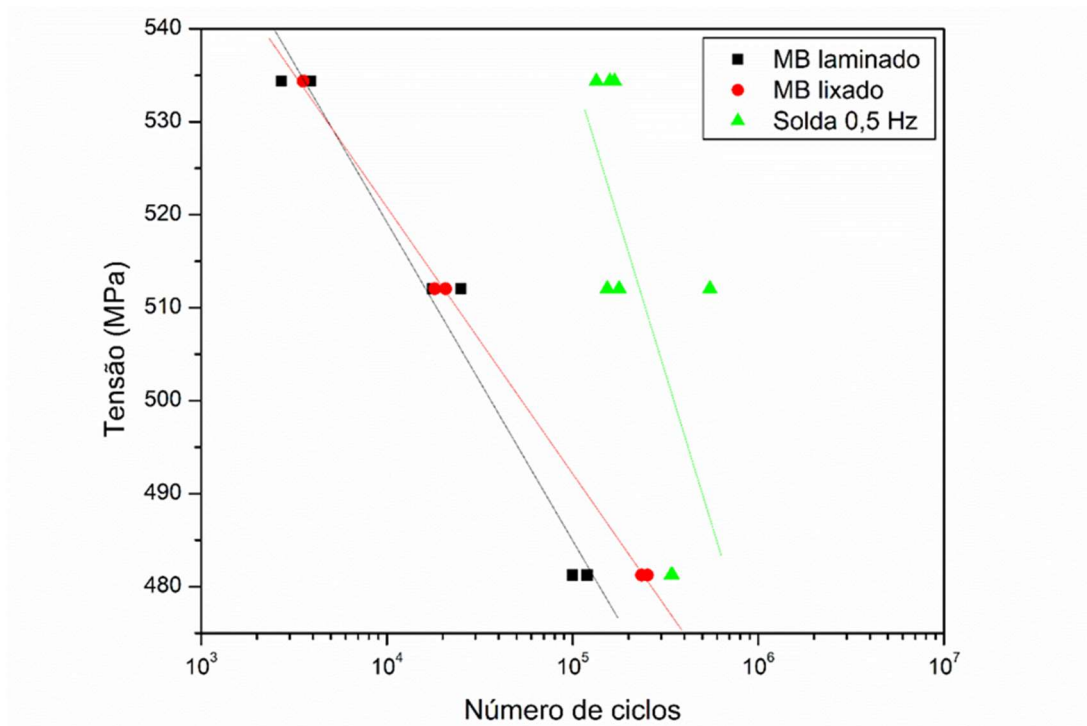


Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.2 GTAW -DWF e Metal Base

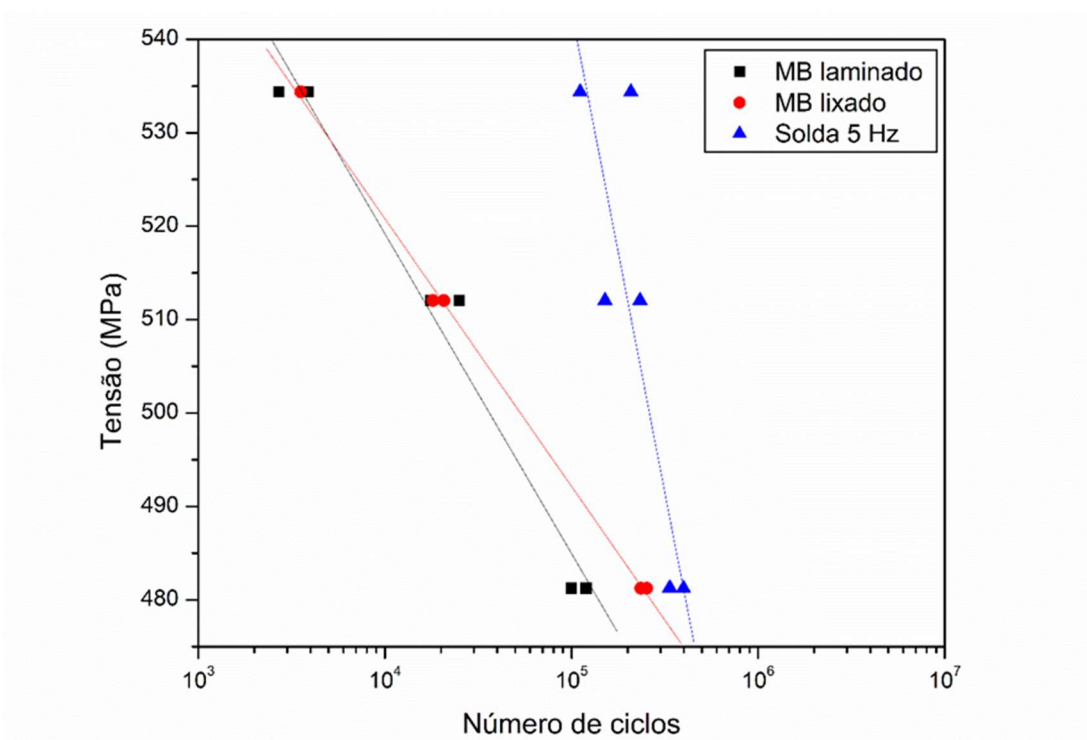
Considerando-se a relevância dos resultados obtidos com processo GTAW-DWF em relação ao metal, destacou-se na sequência das figuras 59 até 63, o detalhamento dos gráficos de Tensão máxima ($\sigma_{\max.}$) x Número de Ciclos relacionado cada nível de frequências do GTAW-DWF em relação ao metal base nas condições “como laminado” e lixado. Estes gráficos estão demonstrando o comportamento da inclinação das curvas, obtidas por regressão linear, em função da frequência utilizada o aumento da resistência a fadiga das juntas soldadas com GTAW-DWF em relação ao metal base. O metal base não soldado é a referência para análise comparativa e validação dos resultados obtidos nas frequências e tensões testadas.

Figura 59 - Curvas $\sigma_{\max.} \times N$: GTAW-DWF 0,5 Hz e Metal Base



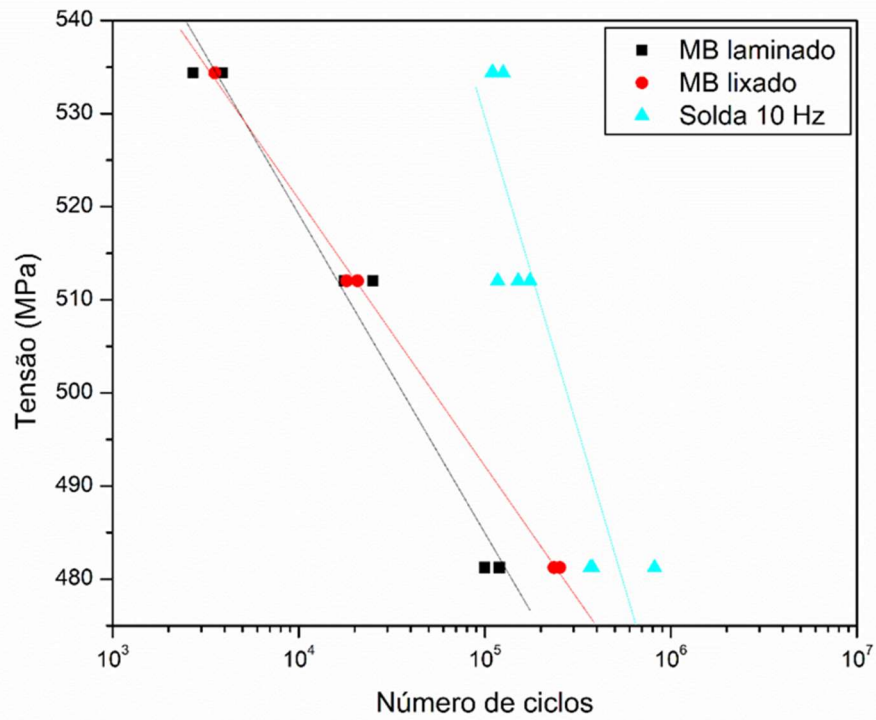
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 60- Curvas $\sigma_{\max.} \times N$: GTAW-DWF 5 Hz e Metal Base



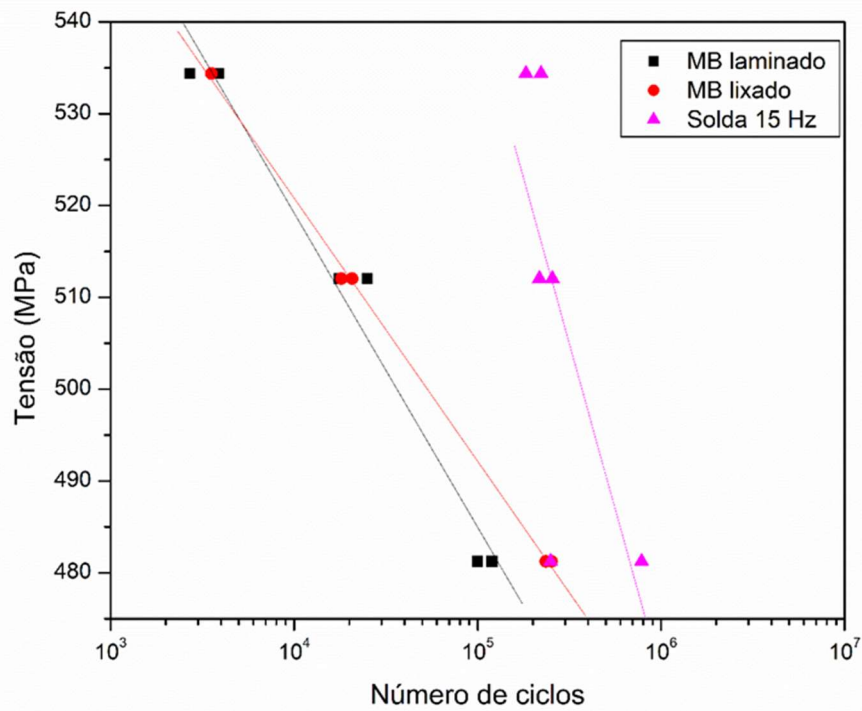
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 61- Curvas $\sigma_{\max.} \times N$: GTAW-DWF 10 Hz e Metal Base



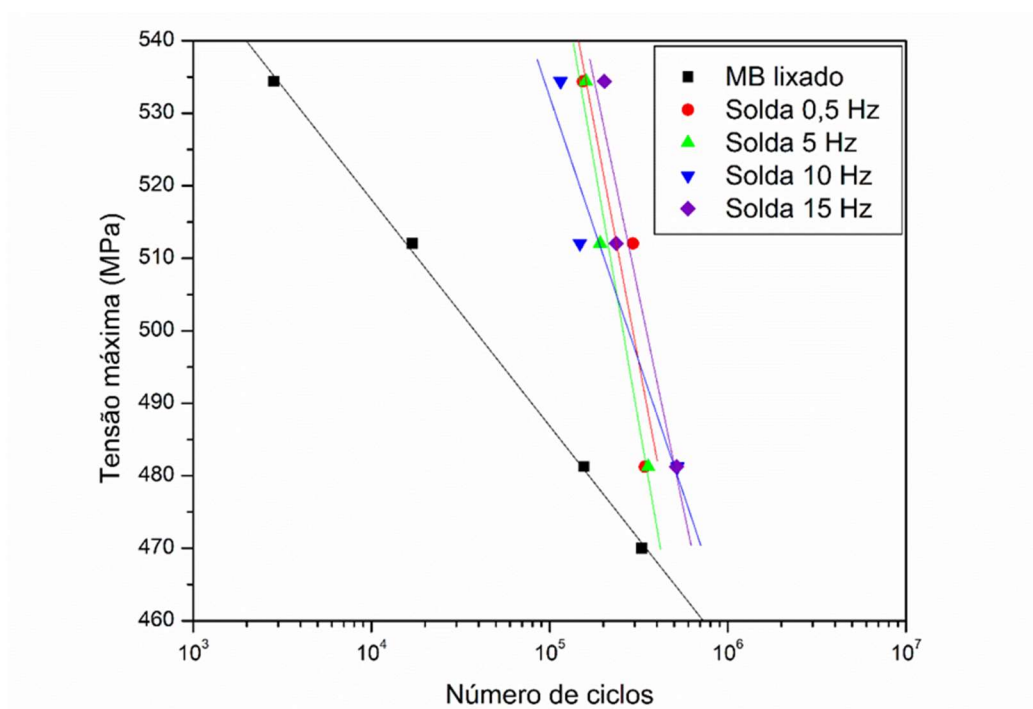
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 62- Curvas $\sigma_{\max.} \times N$: GTAW-DWF 15 Hz e Metal Base



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 63- Curvas $\sigma_{\max.} \times N$: GTAW-DWF 0,5 5 10 e 15 Hz e Metal Base



Fonte: Elaborado pelo autor

As figuras 59 até 63, indicam resistência a fadiga superiores das soldas com processo GTAW-DWF em relação ao metal base nas condições “como laminado” e lixado. Verifica-se também que as melhores inclinações das curvas, obtidas por regressão linear, são referentes as frequências de 10Hz e 15Hz. Todas as frequências testadas apresentaram vida em fadiga superior ao metal base, mas a inclinação da reta de 10Hz indica que este comportamento é mantido para tensões menores também.

4.6 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL DOS RESULTADOS DE FADIGA

Considerando-se os espalhamentos dos resultados obtidos nos testes de fadiga com o processo TIG convencional, decidiu-se pela análise estatística com a distribuição de Weibull e regressão linear. Esses resultados e as comparações com GTAW-DFW e metal base são discutidos a seguir

A Tabela 6 mostra os parâmetros de escala (α) e forma (β) para o material de base (BM), GTAW convencional (C-GTAW), GTAW com alimentação dinâmica de arame 10 Hz (GTAW-DWF 10 Hz), devido aos seus excelentes resultados. A seleção de apenas uma frequência do processo GTAW-DWF teve como objetivo comparar os processos convencionais e dinâmicos de alimentação de arame GTAW. O parâmetro α corresponde ao

número de ciclos para os quais a probabilidade de falha é de 63,2% no nível de tensão considerado (FERNANDES, M. F.; *et al.*). Como esperado, o parâmetro α foi maior para o processo GTAW-DWF que apresentou melhores resultados de fadiga do que as condições Metal Base (BM) e C-GTAW. Por exemplo, a um nível de tensão de 535 MPa, o parâmetro α foi 120026, 3542 e 3.290 para as condições GTAW-DWF 10 Hz, BM e C-GTAW. O parâmetro β para a condição de soldagem GTAW-DWF 10 Hz foi 11,01, 4,78 e 1,80 para níveis de tensão de 535 MPa, 512 MPa e 481 MPa, respectivamente. O parâmetro β foi sempre maior que 1 para as condições Metal Base (BM) e GTAW-DWF, o que indicou a baixa variabilidade e alta confiabilidade dos dados de fadiga. No entanto, o parâmetro β foi inferior a 1 para o processo GTAW convencional testado em todos os níveis de tensão. O parâmetro β para a condição de soldagem C-GTAW foi 0,51; 0,47 e 0,999 para níveis de tensão de 535 MPa, 512 MPa e 481 MPa, respectivamente. Os menores valores do parâmetro de forma para o C-GTAW convencional em comparação ao GTAW-DWF com alimentação dinâmica de arame mostraram que o processo de soldagem convencional resulta em uma variabilidade significativamente maior da vida em fadiga. Portanto, componentes mecânicos submetidos a processos de soldagem com o processo C-GTAW convencional apresentam menor confiabilidade em relação ao processo GTAW-DWF. As principais razões para este comportamento podem ser os defeitos de soldagem introduzidos pelo processo GTAW convencional que reduz a resistência a fadiga dos corpos de prova.

Tabela 6- Parâmetros alfa (escala) e beta (forma) da distribuição Weibull para as condições Metal Base, C-GTAW e GTAW-DWF 10 Hz a níveis de tensão de 535 MPa, 512 MPa e 481 Mpa

Tensão (MPa)	Metal Base (BM)		C-GTAW		GTAW-DWF 10 Hz	
	Alpha	Beta	Alpha	Beta	Alpha	Beta
535	3.542	1,26	3.290	0,51	120.026	11,01
512	18.957	3,38	6.525	0,47	160.729	4,77
481	183.971	1,75	10.620	0,999	626.950	1,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 mostra as vidas (número de ciclos) estimadas em fadiga para confiabilidades de 50, 70, 90 e 95% obtidas através da distribuição Weibull para as condições Metal Base (BM), C-GTAW e GTAW-DWF 10 Hz. Os valores de resistência a fadiga do GTAW-DWF foram significativamente maiores do que o processo GTAW convencional. Por exemplo, a fadiga da condição GTAW-DWF 10 Hz no nível de tensão de 481 MPa e confiabilidade de 70% foi de 353.586 ciclos em comparação com apenas 3.784 ciclos do

processo convencional. Além disso, o processo GTAW-DWF também aumentou a vida em fadiga em relação ao material base. Outro aspecto interessante é que a baixa variabilidade do processo GTAW-DWF também resultou em vidas em fadiga significativamente mais longas para alta confiabilidade em comparação com as condições C-GTAW e BM. Por exemplo, para uma confiabilidade de 95%, o GTAW-DWF com 10 Hz tem uma vida útil prevista de 120.393 ciclos em comparação com apenas 543 ciclos a um nível de tensão de 481 MPa.

Tabela 7 - Análise de Weibull: vidas em fadiga para condições Metal Base, C-GTAW e GTAW-DWF 10 Hz a níveis de tensão de 535 MPa, 512 MPa e 481 MPa

Confiabilidade (%)	Metal Base				C-GTAW		GTAW-DWF 10 Hz		
	535 MPa	512 MPa	481 MPa	535 MPa	512 MPa	481 MPa	535 MPa	512 MPa	481 MPa
50	2.648	17.009	149.209	1.604	2.992	7.359	116.096	148.842	511.449
70	1.563	13.973	102.072	436	728	3.784	109.297	129.489	353.586
90	594	9.741	50.849	40	54	1.116	97.838	100.278	179.588
95	335	7.873	33.701	10	12	543	91.646	86.232	120.393

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 REGRESSÃO LINEAR DOS RESULTADOS DE FADIGA

Apresenta-se agora a análise estatística de modelos de regressão linear Tensão-Número de Ciclos (S-N) para os dados de fadiga. A análise estatística foi feita para garantir a confiabilidade dos resultados da fadiga (ASTM, 2015).

Os testes de normalidade para todas as condições experimentais foram realizados. Os testes de normalidade objetivaram confirmar a normalidade dos dados de fadiga antes da análise de regressão. Foi aplicada a estatística Ryan-Joiner com nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). O coeficiente de correlação para Metal Base (BM), GTAW-DWF 0,5 Hz, GTAW-DWF 5 Hz, GTAW-DWF 10 Hz, GTAW-DWF 15 Hz e condições C-GTAW foram 0,953, 0,926, 0,974, 0,917, 0,828 e 0,972, respectivamente. A estatística Ryan-Joiner tem como objetivo avaliar a força da correlação entre os dados de fadiga e os escores normais dos dados. Como o coeficiente de correlação foi próximo a 1 para todas as condições experimentais, os logaritmos das vidas em fadiga podem ser considerados normalmente distribuídos (Nielsen, Mark A, 2011).

A Figura 64 mostra que os modelos de regressão linear forneceram um gráfico de linha ajustado com coeficientes de determinação altos ou adequados (R-sq) para as condições Metal Base (BM), GTAW-DWF 5 Hz e GTAW-DWF 10 Hz. O R-sq é uma medida

estatística do ajuste dos dados de fadiga aos modelos de regressão. Portanto, essas condições foram bem ajustadas aos modelos lineares. As condições que não apresentaram coeficiente de determinação elevado foram as condições GTAW-DWF 0,5 Hz, GTAW-DWF 15 Hz e C-GTAW. Este comportamento para as condições GTAW-DWF 0,5 Hz e GTAW-DWF 15 Hz ocorreu principalmente devido a alguns pontos como outliers das bandas de confiança de 95%. O baixo ajuste da condição C-GTAW é explicado pela presença de defeitos de soldagem que aumentam a variabilidade da resistência a fadiga.

A Figura 63 também mostra as bandas de confiança de 95% ou intervalos de confiança (IC), que são bandas hiperbólicas onde a equação do modelo de regressão seria incluída em 95% dos casos. Portanto, foi possível observar quais pontos estavam dentro da faixa de confiança de 95%. Os intervalos de predição (PI) são sempre maiores do que o IC porque correspondem aos pontos dentro do intervalo de predição de 95% dos valores prováveis para cada resposta de ponto único. A maior parte dos pontos de dados experimentais de fadiga estava dentro do IC, o que dá suporte à confiabilidade estatística dos modelos de regressão linear aplicados.

As equações de regressão linear de predição de vida de acordo com ASTM E739, para cada condição experimental, são mostradas nas equações (7) a (13):

Material de base (como laminado)

$$S = 724,5 - 52,80 \text{ Log (N)} \quad (7)$$

Material de base (lixado) $S = 704,0 - 46,78 \text{ Log (N)}$ (8)

C-GTAW $S = 638,8 - 40,05 \text{ Log (N)}$ (9)

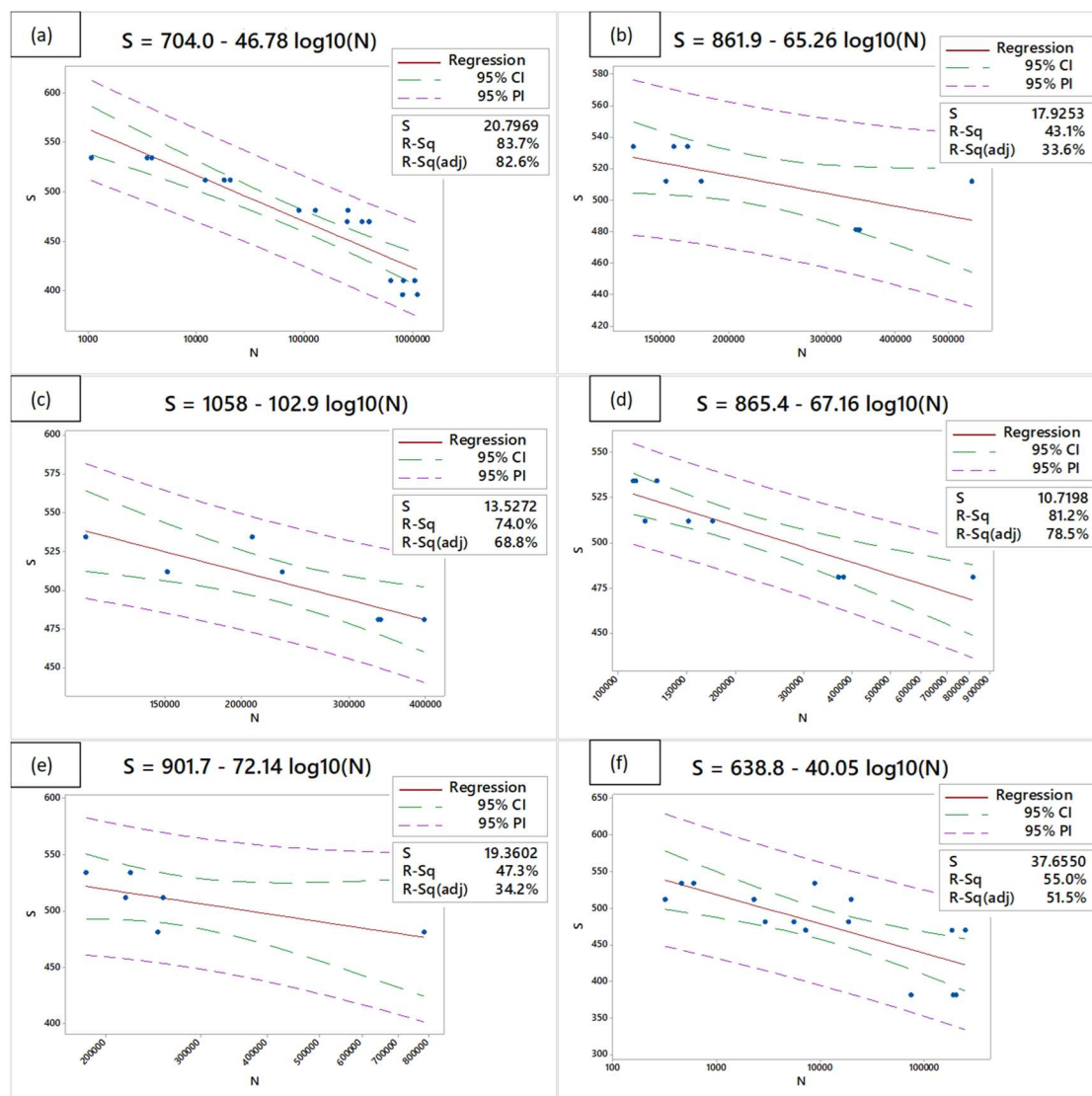
GTAW-DWF (0,5 Hz) $S = 861,9 - 65,26 \text{ Log (N)}$ (10)

GTAW-DWF (5 Hz) $S = 1058 - 102,9 \text{ Log (N)}$ (11)

GTAW-DWF (10 Hz) $S = 865,4 - 67,16 \text{ Log (N)}$ (12)

GTAW-DWF (15 Hz) $S = 901,7 - 74,14 \text{ Log (N)}$ (13)

Figura 64- Gráficos de regressão linear



Fonte: Elaborado pelo autor.

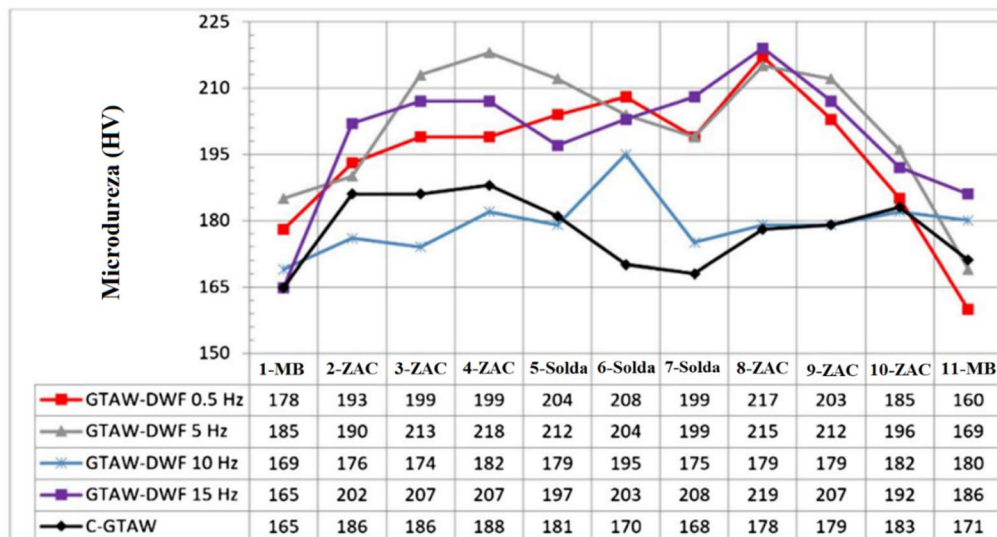
Obs.: **Condições:** (a) Metal Base, (b) GTAW-DWF 0,5 Hz, (c) GTAW-DWF 5 Hz, (d) GTAW-DWF 10 Hz, (e) GTAW -DWF 15 Hz, (f) C-GTAW

4.8 MICRODUREZA NAS JUNTAS SOLDADAS

Os perfis de micro dureza para uma carga de 500 gf (HV 0,5) são mostrados na Figura 65. Os perfis de micro dureza mostraram uma tendência de altos níveis de dureza na zona de fusão do metal de solda em GTAW-DWF em comparação com a zona afetada pelo calor e o metal base não afetado. A composição química em metais de solda diluídos mostra na Tabela 6 que o teor de Mn é alto com GTAW-DWF do que com C-GTAW e este fato pode contribuir

para atingir alta micro dureza nos metais de solda.

Figura 65- Perfis de micro dureza HV0,5 para C-GTAW e GTAW-DWF na seção transversal do cordão de solda



Fonte: Elaborado pelo autor.

O GTAW-DWF 10 Hz apresentou menores níveis de micro dureza em relação ao processo de soldagem de 0,5, 5 e 15 Hz. O GTAW convencional apresentou menor micro dureza na zona de fusão do metal de solda do que qualquer frequência dos processos de alimentação dinâmico de arame testada. A zona afetada pelo calor do GTAW convencional apresenta maior micro dureza do que a zona de fusão por soldagem. O GTAW-DWF com 10 Hz apresenta perfis de micro dureza homogêneos na zona afetada pelo calor em comparação ao metal base não afetado. Essa frequência apresenta os menores níveis de dureza na ZAC comparando-se com as demais frequências testadas com GTAW-DWF e menor dureza pode indicar melhor tenacidade à nucleação de trincas por fadiga.

Foi observada uma combinação de menor micro dureza na zona afetada pelo calor com alta micro dureza na zona de fusão do metal de solda nos processos com alimentação dinâmica de arame. Esse comportamento é bem distinto do processo convencional.

No C-GTAW apresenta combinações deletérias dos efeitos associados como maiores micro dureza na ZAC em relação a zona bruta de fusão. Mas a zona da solda, com menor micro dureza, apresenta micro defeitos. Essa combinação de efeitos metalúrgicos pode explicar a rápida nucleação e propagação das trincas por fadiga no processo convencional.

Pode-se destacar também os efeitos das frequências na microdureza das ZACs: com aumento acelerado entre 0,5 e 5 Hz, baixando fortemente com 10Hz e voltando a aumentar com 15Hz. Aparenta existir o intervalo de frequências no processo GTAW-DWF com menor

dureza na ZAC e menor pico de dureza na zona fundida. Essa combinação de efeitos pode contribuir para explicar o comportamento em fadiga da frequência 10Hz.

4.9 MICROESTRUTURAS NAS JUNTAS SOLDADAS

As Figuras de 66 a 70 mostra os perfis de micro dureza relacionados à microestrutura. As fotos das micrografias foram tiradas na mesma coordenação cartesiana para manter a rastreabilidade relacionada aos recuos de micro dureza. A extensão das zonas afetadas pelo calor foi verificada por regiões onde os grãos com deformações plásticas iniciaram as etapas de recuperação e recristalização. Nessas posições, foi estimado o tamanho dos grãos de acordo com ASTM E 112. O grão torna-se grosso a partir da transição da ZAC para a linha de fusão e metal de solda. O tamanho do grão é maior no GTAW convencional em comparação com o GTAW-DWF. Nesta comparação pode-se associar os efeitos de granulação fina e grosseira em relação ao comportamento em fadiga. A granulação mais fina nas juntas soldadas com GTAW-DWF contribui para o aumento da vida em fadiga.

O número de tamanho de grão ASTM foi medido para vários processos e regiões de soldagem. Conforme o número de tamanho de classificação dos grãos diminui, as dimensões dos grãos aumentam, de acordo com ASTM E112. Os tamanhos de grãos apresentados nas discussões correspondem à classificação da ASTM E112 e BS EN ISO 643.

A Figura 66 mostra a microestrutura do processo C-GTAW. A Figura 66a mostra a zona de metal base não afetada pelo calor com grãos com deformação plástica devido à laminação. A microestrutura do metal base corresponde à perlita e ferrita.

A Figura 66b mostra a zona de transição no lado direito: metal base para recristalização da zona afetada pelo calor de grãos de tamanhos 9 a 10 de perlita e ferrita. A Figura 66c mostra os grãos de ZAC com tamanhos de 6 a 7 com morfologia de perlita e ferrita.

A Figura 66d mostra a ZAC e a Linha de Fusão com tamanho de grãos de 4 a 5 e morfologia de perlita e ferrita.

A Figura 66e mostra a linha de fusão e grãos de metal de solda com tamanhos de 4 a 5 e morfologia de perlita e ferrita.

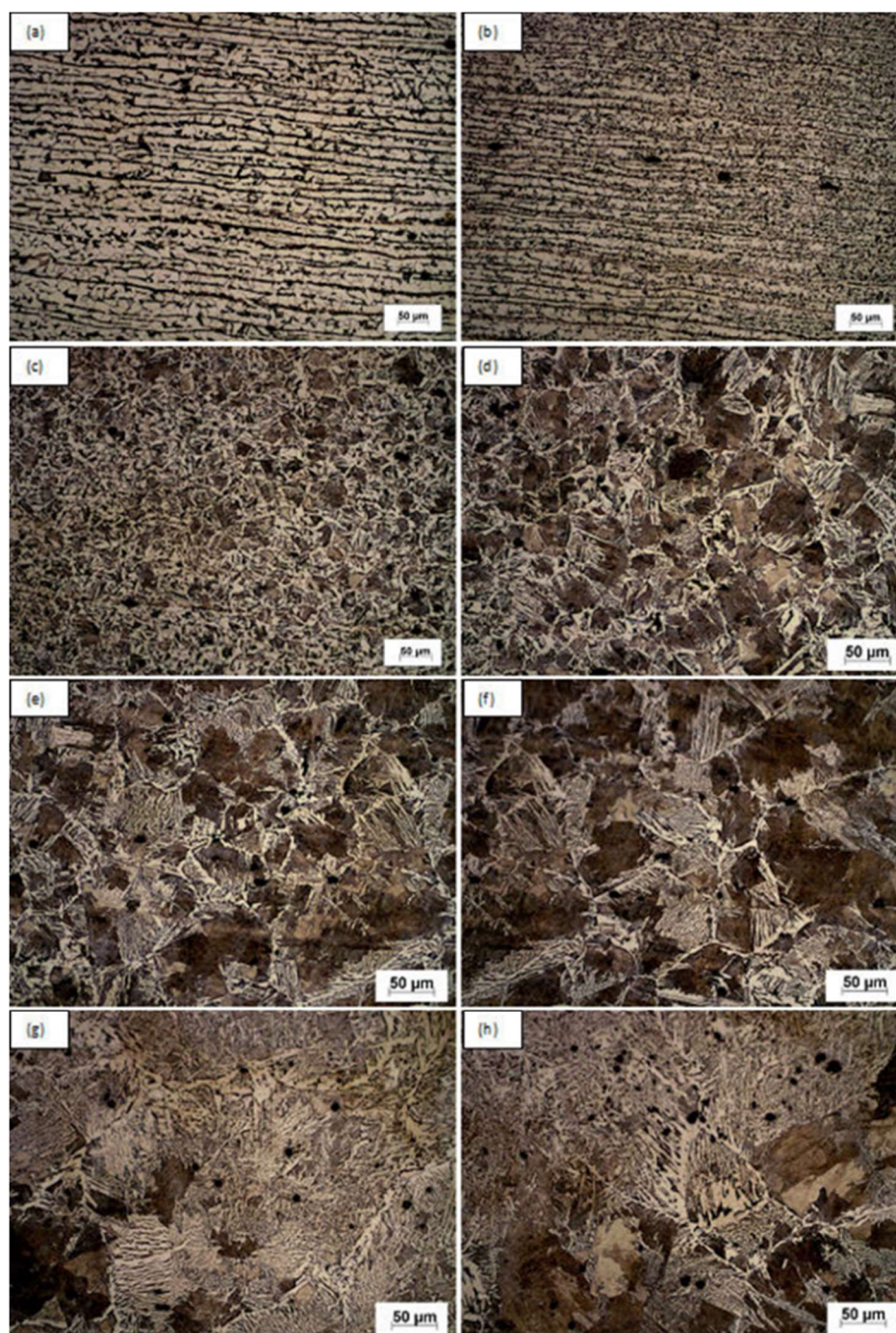
A Figura 66f corresponde à região do Metal de Solda com tamanhos de Grãos de 3 a 4 e morfologia de perlita e ferrita.

A Figura 66g mostra a zona de fusão do metal de solda com grãos de tamanho 3.

A Figura 66h mostra a zona de fusão do metal de solda com grãos de tamanho 2.

A Figura 67 demonstra o posicionamento detalhado da linha de fusão.

Figura 66 - C-GTAW- Microestruturas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde .:

(a) Zona de metal base não afetada pelo calor (*8,0).

(b) Zona de transição no lado direito: Metal Base para aquecer a zona afetada - Recristalização (*7,0).

(c) ZAC (*5,0).

(d) ZAC e Linha de Fusão (*4,0).

(e) Linha de fusão/ZAC e metal de solda (3,5 mm).

(f) Solda de metal (3,0 mm).

(g) Zona de fusão de metal de solda (*2,0).

(h) Zona de fusão de metal de solda (*3,0)

Todas as imagens foram obtidas a 1 mm da linha da superfície (distância em relação da linha de centro da solda (mm)).

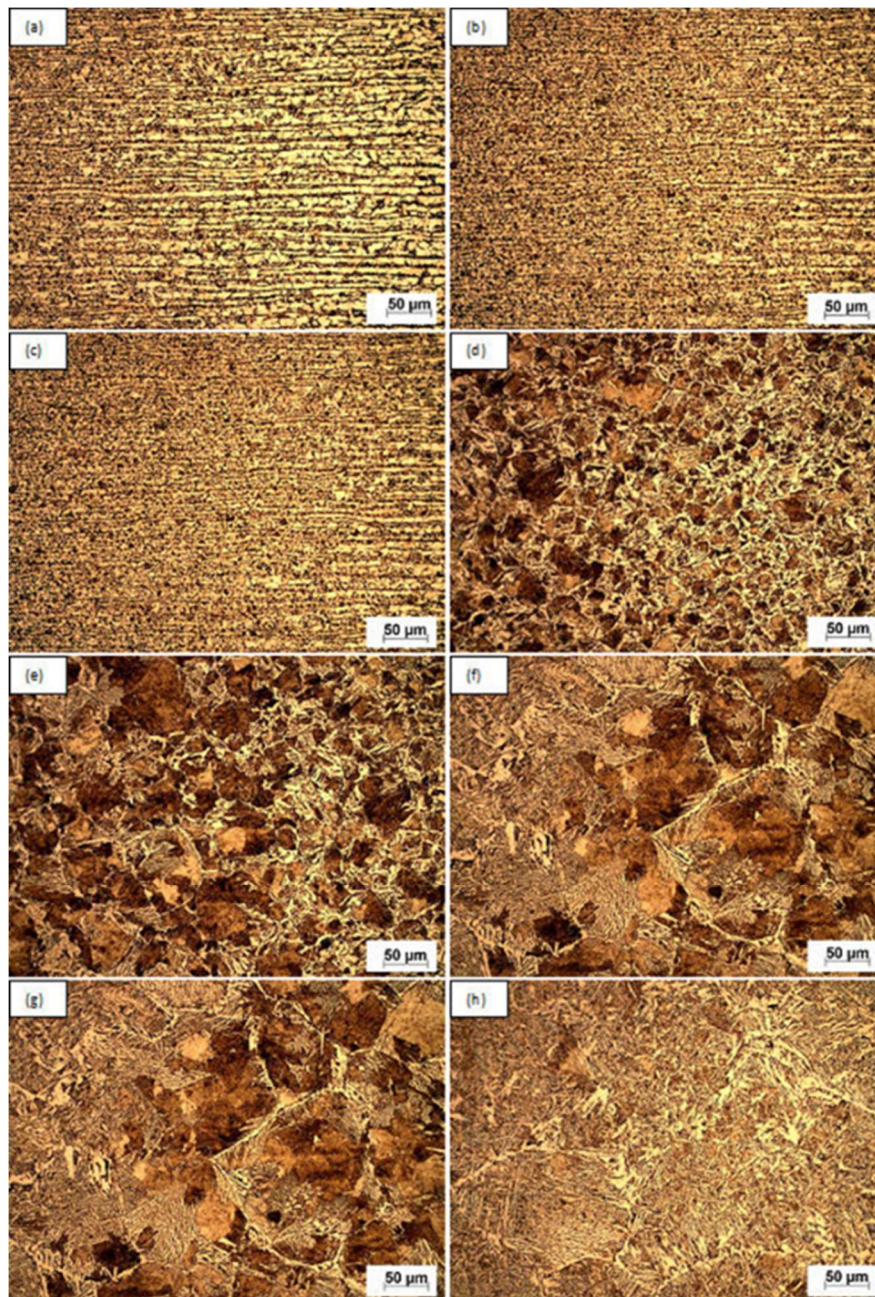
Figura 67 - C-GTAW



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 68 mostra a microestrutura do GTAW-DWF 0,5Hz. A Figura 68a mostra a zona de metal base não afetada pelo calor com tamanho de grãos de 9 e deformação plástica devido à laminação com morfologia de perlita e ferrita. A Figura 68b mostra a zona de transição no lado esquerdo e a borda da zona afetada pelo calor com estágios de recuperação e recristalização com tamanho de grãos de 10. Figuras 68c (tamanhos de grãos de 7 a 8), 68d (tamanho de grãos 5 a 7), 68e (tamanhos de grãos de 5 a 6) e 68f (tamanhos de grãos de 4 a 5) corresponde à ZAC. A Figura 68g mostra a transição entre ZAC e linha de fusão (tamanho de grão de 4). A Figura 68h mostra a linha de fusão e as regiões do metal de solda por fusão (tamanhos de grãos de 3 e 4). A Figura 69 demonstra o posicionamento detalhado da linha de fusão.

Figura 68- GTAW -DWF 0,5 Hz (microestrutura)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

(a) Zona de metal base não afetada pelo calor(*8,0).

(b) Zona de transição no lado esquerdo e borda de ZAC (*7,50).

(c) ZAC (*6,50).

(d) ZAC (*6,0).

(e) ZAC (*5,5).

(f) ZAC (*4,50).

(g) ZAC e linha de fusão (*4,5).

(h) Linha de fusão/ZAC e metal de solda bruto de fusão (*3,5)

Todas as imagens foram obtidas a 1 mm a superfície (*distância em relação da linha de centro da solda).

Figura 69 - GTAW -DWF 0,5 Hz

Linha de Fusão



Fonte: Elaborado pelo autor.

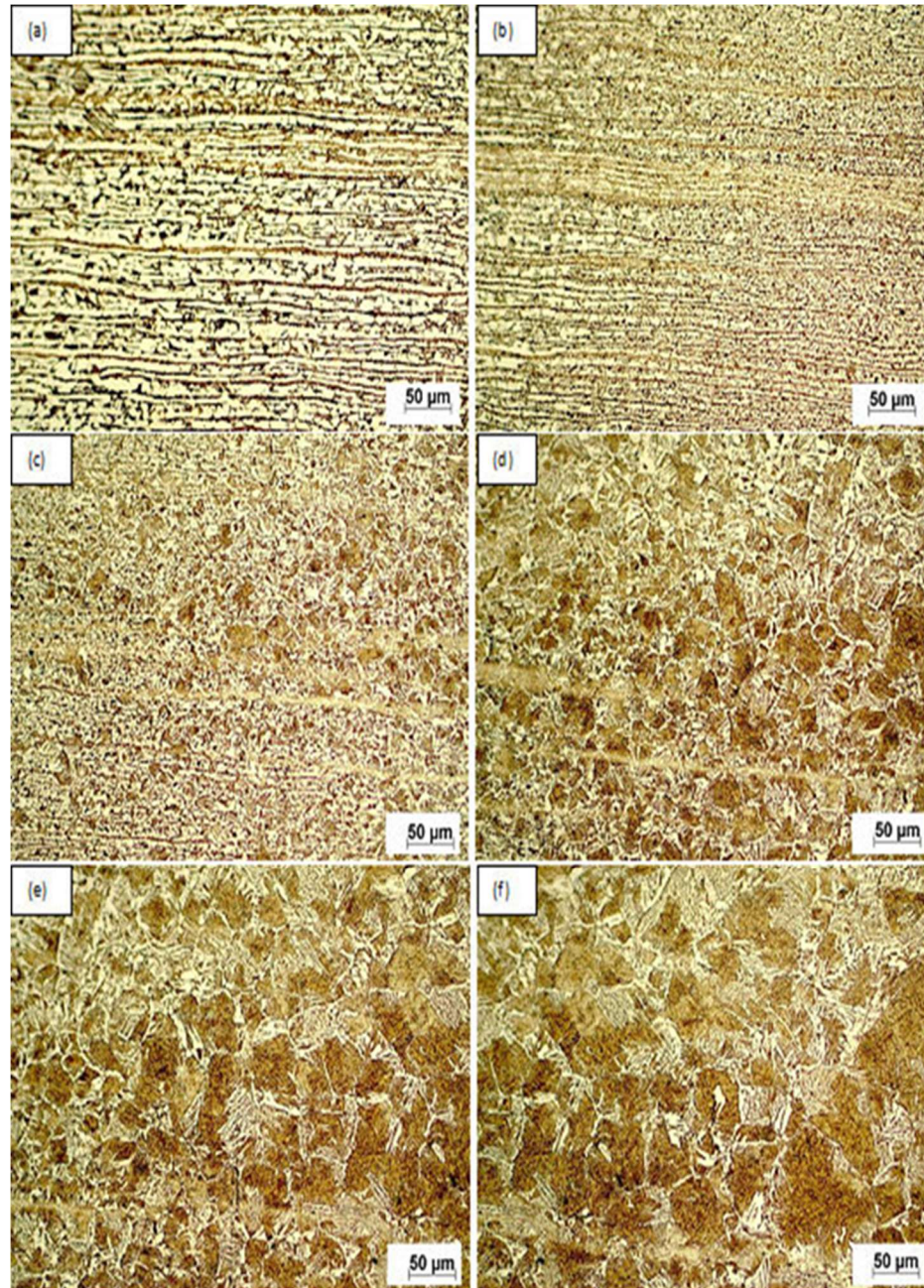
A Figura 70 mostra a microestrutura do GTAW -DWF 5Hz. A Figura 70a mostra a zona de metal de base não afetada pelo calor com tamanho de grãos de 9 e deformação plástica devido à laminação. A microestrutura corresponde a perlita e ferrita.

A Figura 70b mostra a borda de ZAC no lado direito com tamanho de grãos de 9 a 10. A Figura 70c mostra a ZAC com tamanho de grãos de 6 a 7.

As Figuras 70d, 70e e 70f correspondem à ZAC (tamanho de grãos de 5), ZAC e Linha de Fusão (tamanho de grão 5) e zonas de metal de solda e linha de fusão (tamanho de grãos 4), respectivamente.

A Figura 71 demonstra o posicionamento detalhado da linha de fusão.

Figura 70- GTAW -DWF 5Hz (microestrutura)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

(a) Zona de metal base não afetada pelo calor (*7,0).

(b) Borda de ZAC (*6,0).

(c) ZAC (*5,0).

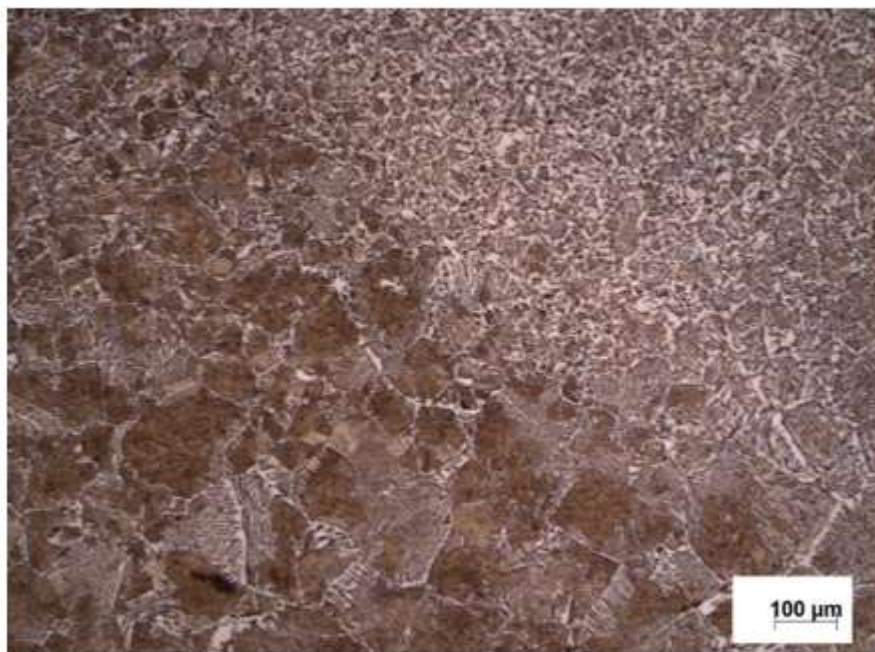
(d) ZAC (*4,0).

(e) ZAC e linha de fusão (*3,5).

(f) Zonas de metal de solda bruto de fusão e linha de fusão (*3,0).

Todas as imagens foram obtidas a 1 mm a superfície (*distância em relação da linha de centro da solda).

Figura 71- GTAW - DWF 5 Hz

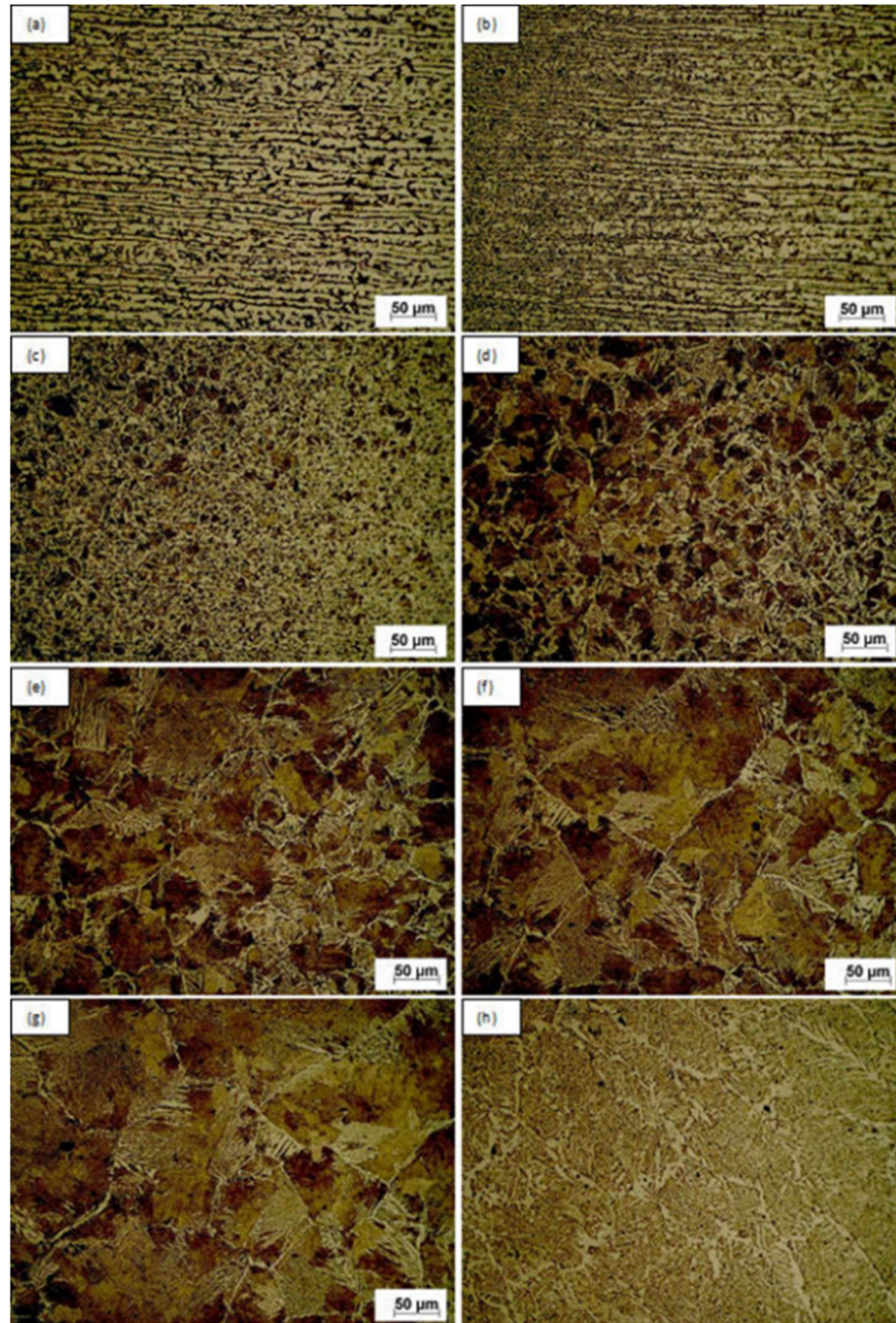
Linha de Fusão

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 72 mostra a microestrutura do processo de soldagem GTAW-DWF 10Hz. A Figura 72a mostra os grãos de metal base não afetados pelo calor com deformação plástica e microestruturas de perlita e ferrita. A zona de transição no lado esquerdo e a borda da zona afetada pelo calor com estágios de recuperação e recristalização podem ser observados na Figura 72b. A ZAC pode ser observada nas Figuras 72c, 72d e 72e com a recuperação dos grãos pelo recozimento devido à temperatura do processo do ciclo térmico de soldagem. As Figuras 72f e 72g mostram a ZAC e a linha de fusão. A Figura 72f mostra a zona do metal de solda por fusão com morfologia de padrão dendrítico.

A Figura 73 demonstra o posicionamento detalhado da linha de fusão.

Figura 72- GTAW -DWF 10Hz (microestrutura)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

(a) Metal base não afetado pelo calor (*7,50).

(b) Zona de transição no lado esquerdo na borda da ZAC (*6,50).

(c) ZAC (*5,50).

(d) ZAC (*4,50).

(e) ZAC (*3,50).

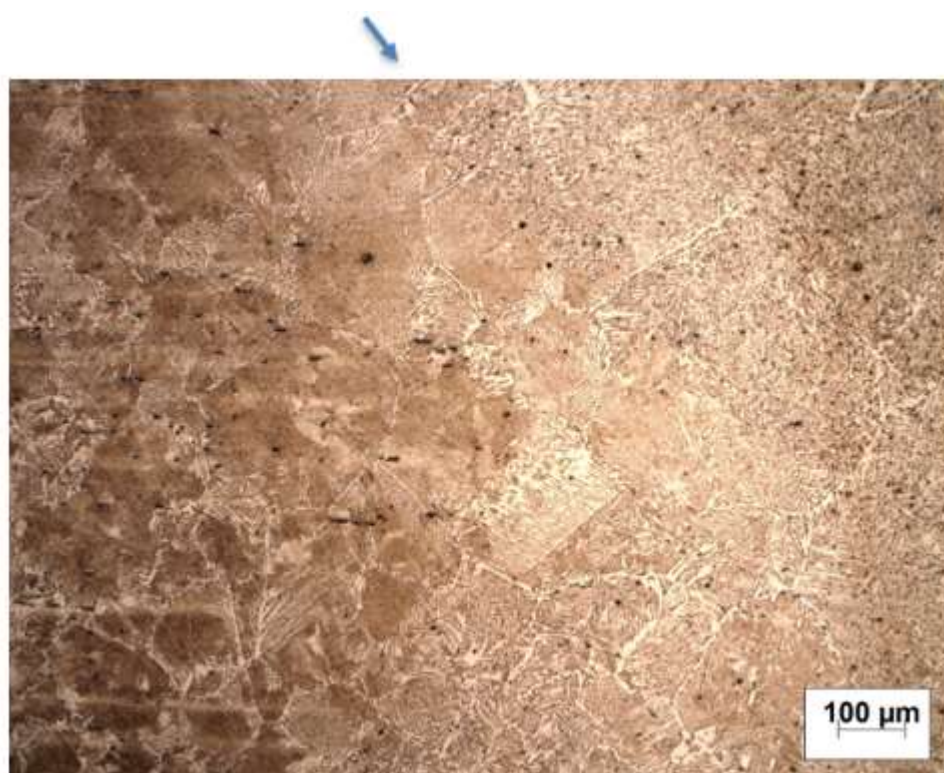
(f) ZAC e Linha de Fusão (*3,0).

(g) Linha de fusão e metal de solda (*2,50).

(h) Zona de metal de solda bruto de fusão (*1,50).

Todas as imagens foram obtidas a 1 mm a superfície (*distância em relação da linha de centro da solda).

Figura 73- GTAW -DWF 10Hz – Linha de Fusão



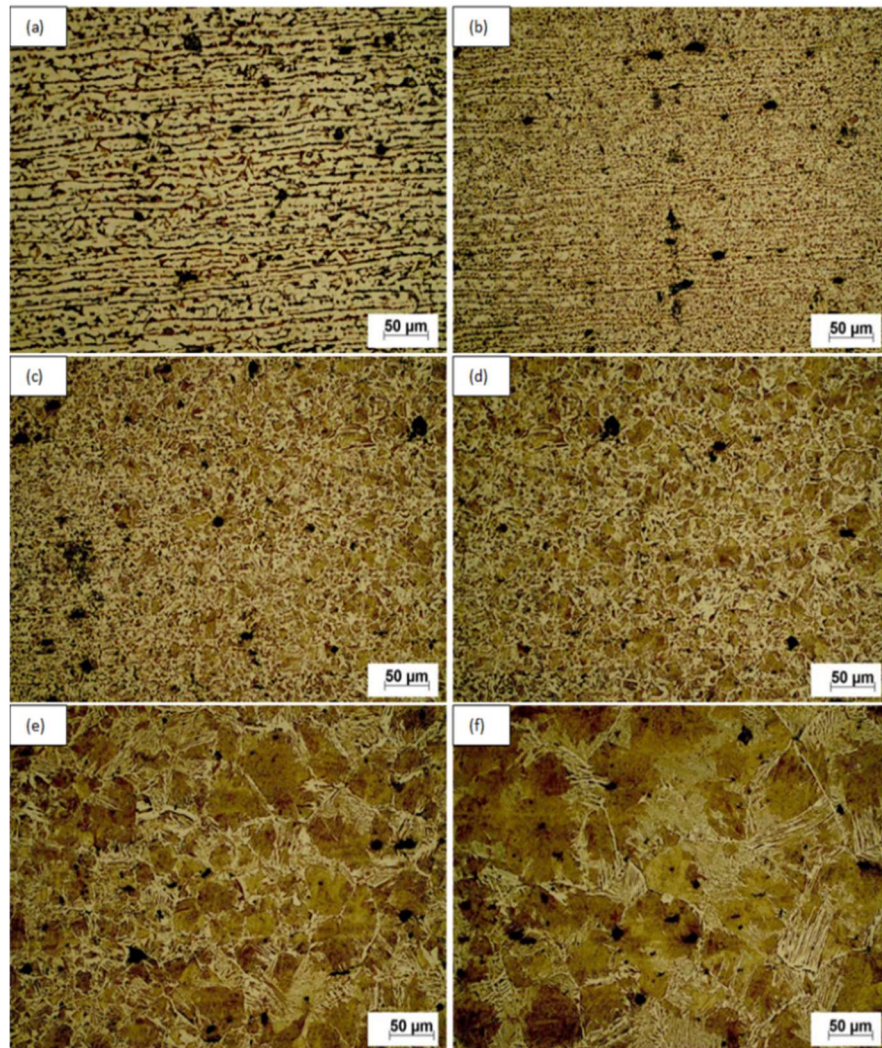
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 74 mostra a microestrutura do processo de soldagem GTAW-DWF 15Hz. A Figura 74a mostra o metal base não afetado pelo calor.

A transição entre as regiões de ZAC e metal de base não afetado por calor (Figura 74b), ZAC (Figuras 74c e 74d), linha de fusão (Figura 74e) e metal de fusão de solda (Figura 74f) teve tamanhos médios de grão de 10, 8-9, 4-5 e 3, respectivamente. Portanto, as dimensões dos grãos aumentam perto do metal de fusão de solda e ZAC em comparação com o metal base.

A Figura 75 demonstra o posicionamento detalhado da linha de fusão.

Figura 74- GTAW-DWF 15Hz (microestrutura)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

(a) Metal base não afetado pelo calor. (*8,0).

(d) ZAC (*5,0).

(b) ZAC e metal base não afetado pelo calor (*6,5).

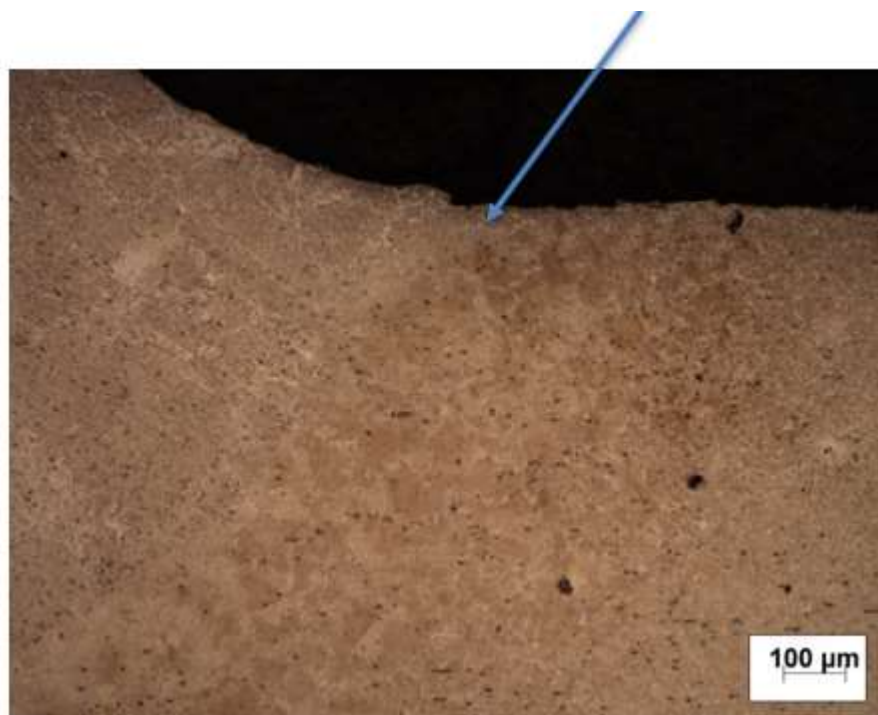
(e) Linha de fusão e ZAC (*4,0).

(c) ZAC (*5,5).

(f) Metal de solda bruto de fusão (*3,0).

Todas as imagens foram obtidas a 1 mm da linha da superfície (distância em relação da linha de centro da solda (mm)).

Figura 75- GTAW-DWF 15Hz Linha de Fusão



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.10 MEDIÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE BRAÇOS DENDRÍTICOS SECUNDÁRIOS

A Figura 76 mostra microestruturas na zona bruta de fusão representativas para estudos de condições de soldagem com os processos C-GTAW e GTAW-DWF. As linhas amarelas indicam dendritos usados para medir SDAS de acordo com o método descrito anteriormente.

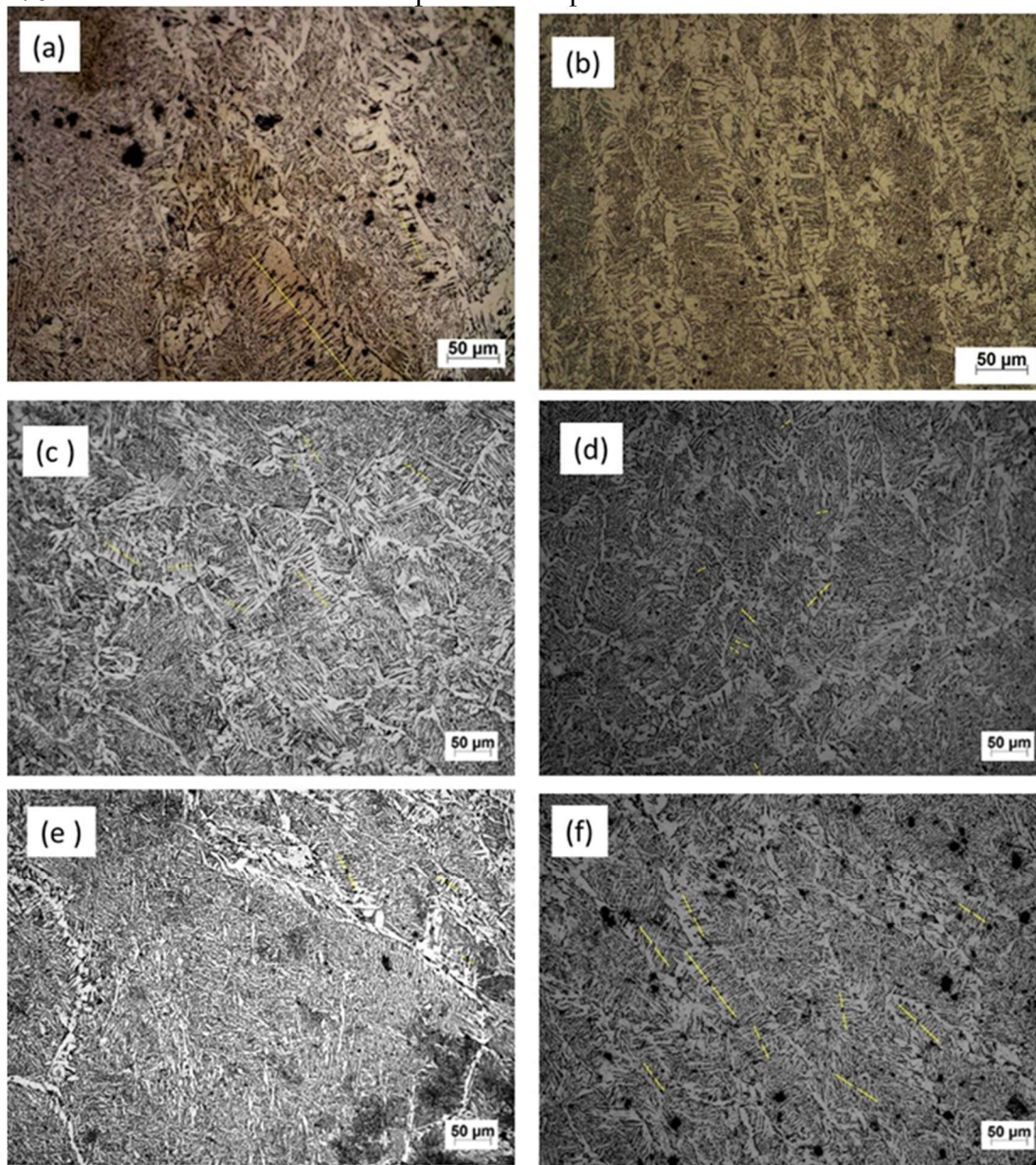
A Figura 76 mostra as medições SDAS, média e desvio padrão: (a/b) C-GTAW = $6,0 \pm 1,4 \mu\text{m}$, (c) GTAW-DWF 0,5 Hz = $5 \pm 0,8 \mu\text{m}$, (d) GTAW-DWF 5Hz = $4,0 \pm 1,0 \mu\text{m}$, (e) GTAW-DWF 10 Hz = $2,0 \pm 0,3 \mu\text{m}$ e (f) GTAW-DWF 15 Hz = $4,0 \pm 0,7 \mu\text{m}$.

Correlações entre o SDAS e a resistência a fadiga foram encontradas para as condições de soldagem C-GTAW e GTAW-DWF. A correlação da diminuição do SDAS para GTAW-DWF em comparação com o processo de soldagem convencional parece ser um parâmetro para o aumento da resistência à fadiga. O processo GTAW convencional apresenta espaçamento dos braços dendríticos secundários maior que o GTAW-DWF.

Para materiais com estrutura dendrítica, o SDAS poderia estar relacionado de forma semelhante, em termos de microestrutura, ao tamanho de grão em materiais processados mecanicamente, ou seja, a diminuição do SDAS implica em aumento da resistência mecânica

e da dureza (CAMPBELL, 2003; SCHNEIDER, RASBAND; ELICEIRI, 2012; VANDERLUIS; RAVINDRAN, 2017).

Figura 76 - Microestrutura dendrítica representativa próxima ao centro dos cordões de solda



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

(a) e (b) GTAW-C,

(c) GTAW-DWF-0,5Hz,

(d) GTAW-DWF-5Hz,

(e) GTAW-DWF-10Hz,

(f) GTAW-DWF-15Hz.

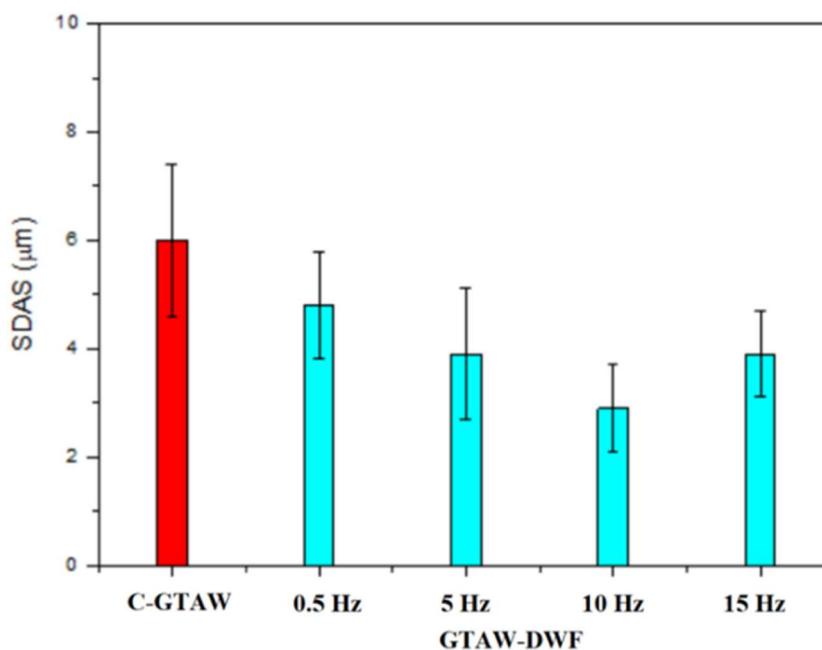
A Figura 77(a) mostra as médias globais do espaçamento do braço dendrítico secundário (SDAS) dos processos de soldagem convencionais C-GTAW e GTAW-DWF

correlacionando com a resistência a fadiga. Os histogramas na Figura 77(a) indicam a tendência de SDAS maior que 5 μm para o processo GTAW manual convencional, o processo GTAW-AD automático com alimentação dinâmica tem uma tendência a SDAS médio de menos de 5 μm .

Analisando o conjunto de amostras do GTAW-DWF, verificou-se que a menor frequência utilizada (0,5 e 5,0 Hz) tende a ter maior SDAS e as frequências de 10 Hz e 15 Hz têm os menores valores médios.

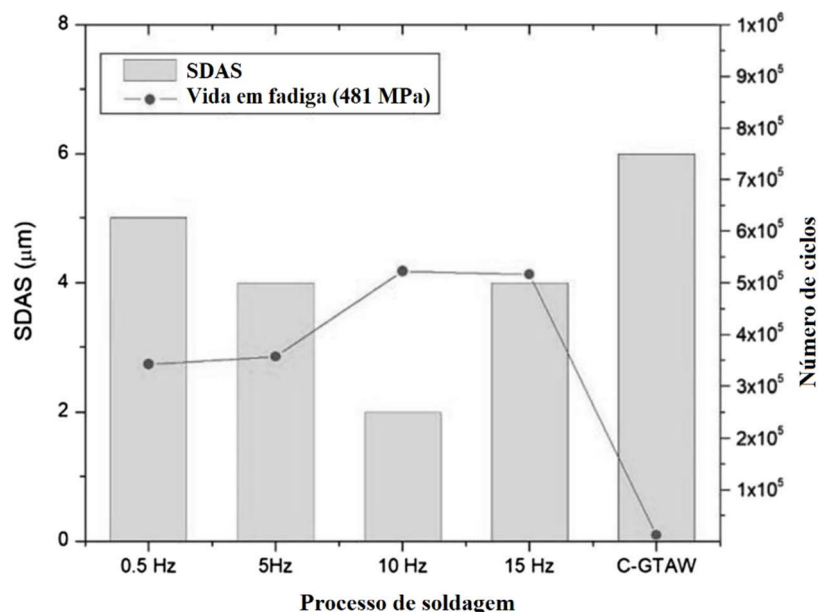
O processo GTAW-DWF de 10 Hz tem SDAs médios de menos de 4 μm . A Figura 77(b) mostra a correlação entre SDAS e a vida média de fadiga a um nível de tensão máxima de 481 MPa. A condição SDAS inferior (GTAW-DWF 10 Hz) corresponde à vida máxima de fadiga. Além disso, a condição SDAS mais elevada (C-GTAW) corresponde à vida mínima à fadiga. Para o C-GTAW, a presença de defeitos de solda é responsável pela diferença significativa nos resultados de vida em fadiga. No entanto, as medições SDAS explicam as diferenças no comportamento de fadiga observadas para diferentes frequências de alimentação de arame dinâmica. Outras posições analisadas das soldas estão detalhadas com SDAS e histogramas do Imagem J no Anexo 1.

Figura 77- (a) Média global do espaçamento dos braços dendríticos secundários



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 77- (b) Média global do espaçamento dos braços dendríticos secundários e correlação com resistência fadiga



Fonte: Elaborado pelo autor

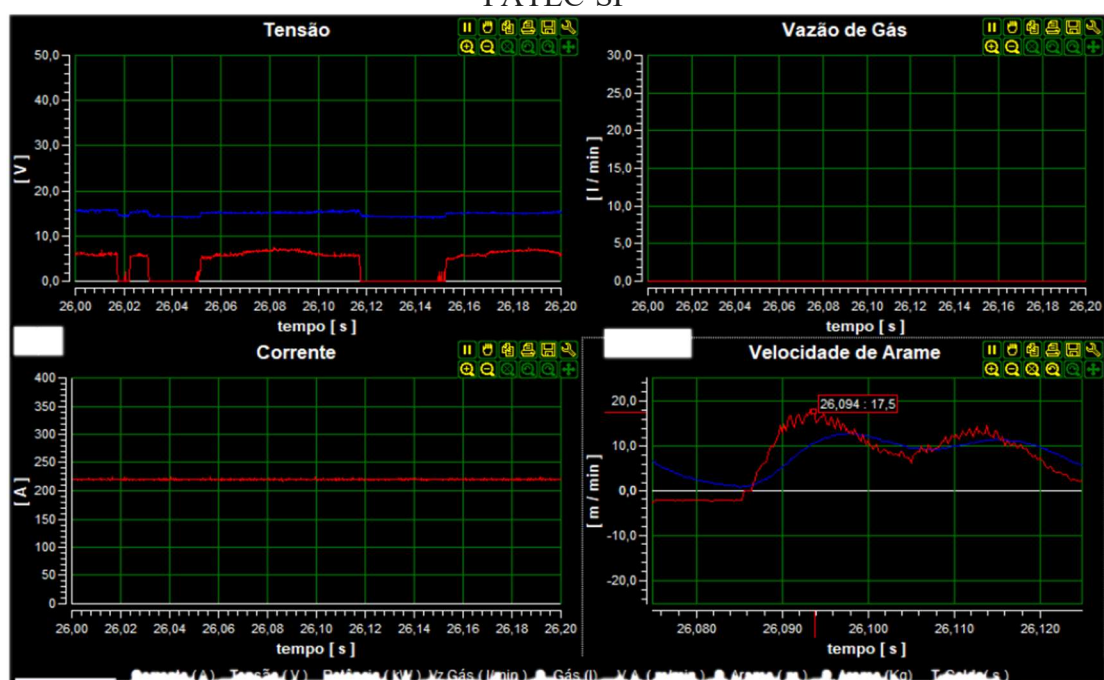
4.11 ANÁLISE DA VELOCIDADE DO ARAME NO PROCESSO GTAW-DWF

A velocidade de alimentação nominal do arame foi mantida constante com 1,5 m/min. Nas Figuras 78, 79 e 80 a seguir, verifica-se a tendência de aceleração nos instantes de avanço dinâmico no sistema de tracionamento do arame e desaceleração no retorno. No sistema SAP VADA4.43, os registros das leituras das variações das acelerações desacelerações indicam a influência das frequências de avanço e retrocesso estabelecidas no MAD.

Pode-se verificar, as indicações dos picos de Velocidade de alimentação de arame (Va) : Figura 78- 10 Hertz = 17,5 m/min - Figura 78- 5 Hertz = 7,3m/min - Figura 80- e 0,5 Hertz = 3,6 m/min. O sensor de velocidade do arame foi posicionado próximo à guia de saída para evitar erros de leitura decorrentes dos efeitos das histereses dos guias condutores de arame.

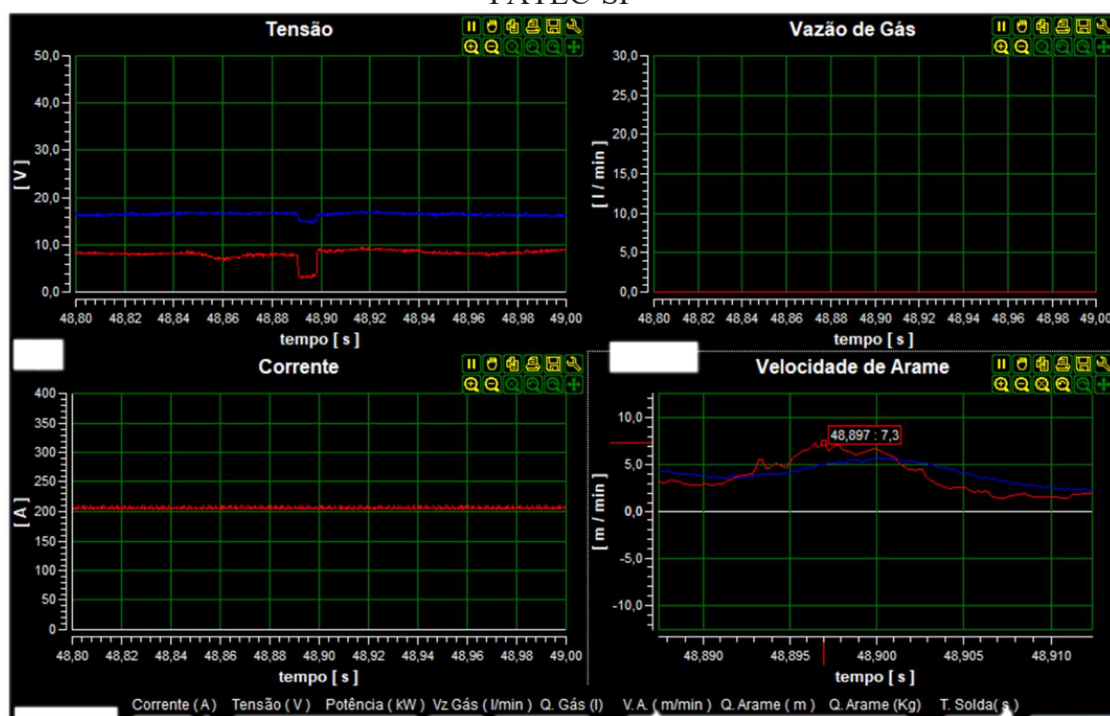
Pode-se observar a aceleração e aumento da velocidade de entrada do arame na poça de fusão no processo GTAW-DWF. Este incremento de velocidade do arame pode promover “turbulência” na poça de fusão, alterando o modo de solidificação e o espaçamento Inter dendrítico.

Figura 78 - Pannel do SAPVADA4.43. Soldagem com 10 Hz. Pico de $V_a = 17,5$ m/min - FATEC-SP



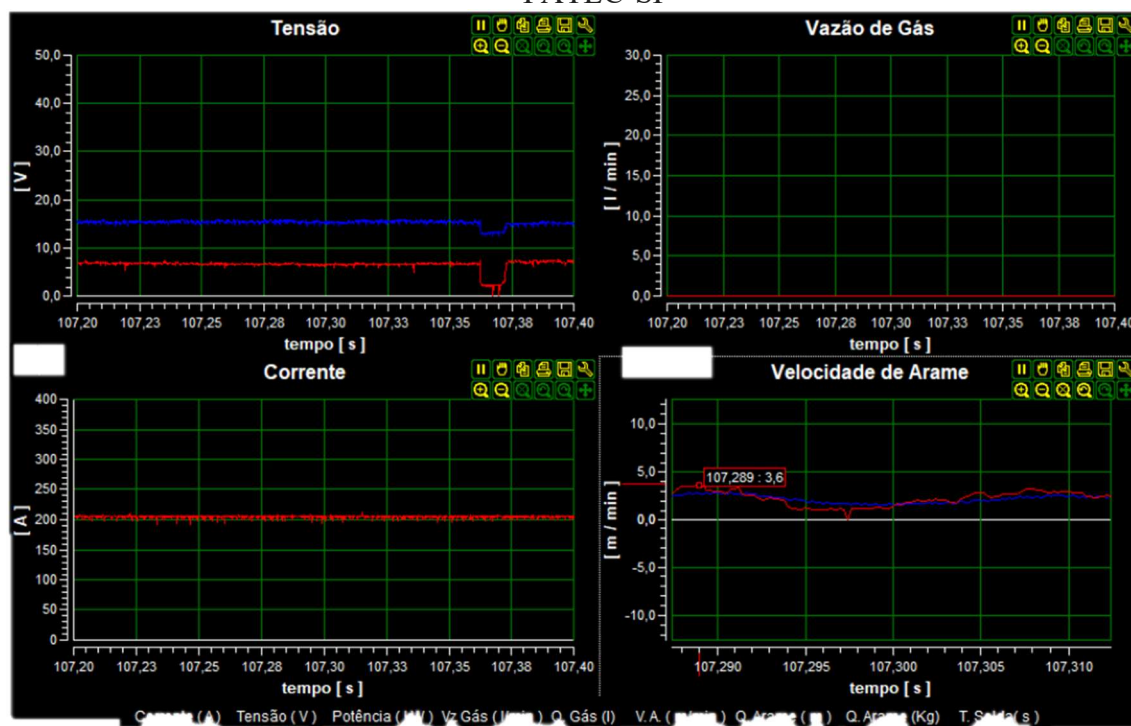
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 79- Pannel do SAPVADA 4.43. Soldagem com 5 Hertz. Pico de $V_a = 7,3$ m/min - FATEC-SP



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 80- Pannel do SAPVADA4.43. Soldagem com 0,5 Hertz. Pico de $V_a = 3,6\text{m/min}$ - FATEC-SP



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.11.1 Tempos de interação do arame na poça de fusão

No sistema SAP VADA4.43, os registros das leituras de tensão permitem visualizar os contatos do arame e sua permanência na poça de fusão. Pode-se relacionar os efeitos das acelerações e interações em função das frequências e velocidade nominal de alimentação de arame com a poça de fusão. A ligação dos sensores de tensão adotada é diferente dos trabalhos do Riffel, K. (2020). Desta forma a tensão zero indica que o arame não se encontra em contato com a poça de fusão. Pode-se verificar, nas Figuras 78, 79 e 80, as indicações das tendências das frequências 10 Hertz com 0,02s, 5 Hertz com 0,01s, e 0,5 Hertz com 0,015s nos tempos médios sem contato com a poça de fusão.

4.12 ANÁLISE DE FRATURAS

As fraturas das amostras dos corpos de prova de fadiga rompidos na região da solda foram analisadas utilizando-se microscopia eletrônica de varredura (MEV)

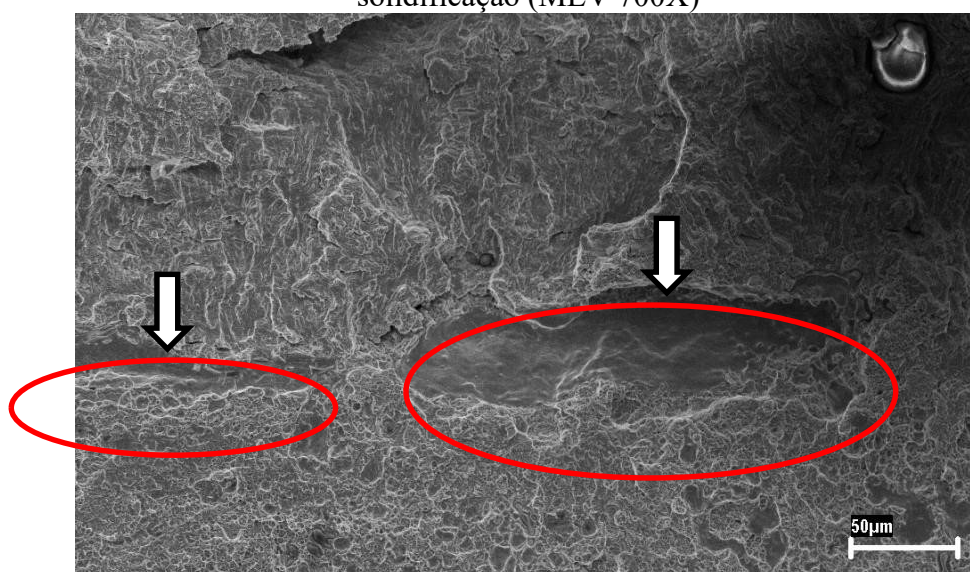
Nas Figuras 81 a 84 observou-se a ocorrência de defeitos de micro solidificação nas amostras de espécimes soldadas com um processo convencional de manual C-GTAW. Por

outro lado, essas características não foram observadas no processo GTAW-DWF, como pode ser visto nas Figuras 85 a 88.

Além disso, observou-se a presença de dimples no processo automático GTAW-DWF com alimentação dinâmica nas frequências de 0,5Hz, 5,0Hz, 10,0Hz e 15Hz. Essas características são características da fratura dúctil.

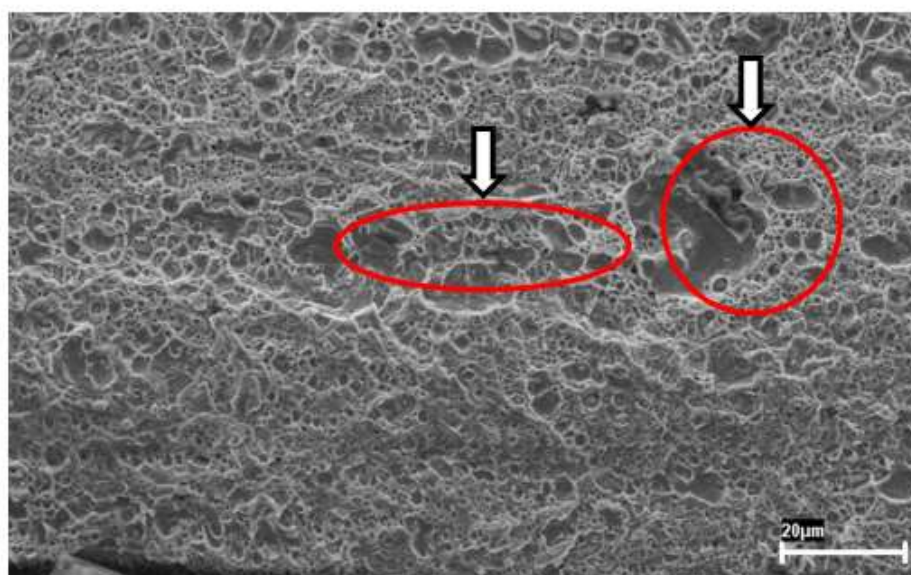
Nas Figuras 89 a 94 encontram-se os possíveis pontos de nucleação das trincas de fadiga.

Figura 81 - C-GTAW Micro cavidades de fusão/solidificação (setas)-frentes de solidificação (MEV 700X)



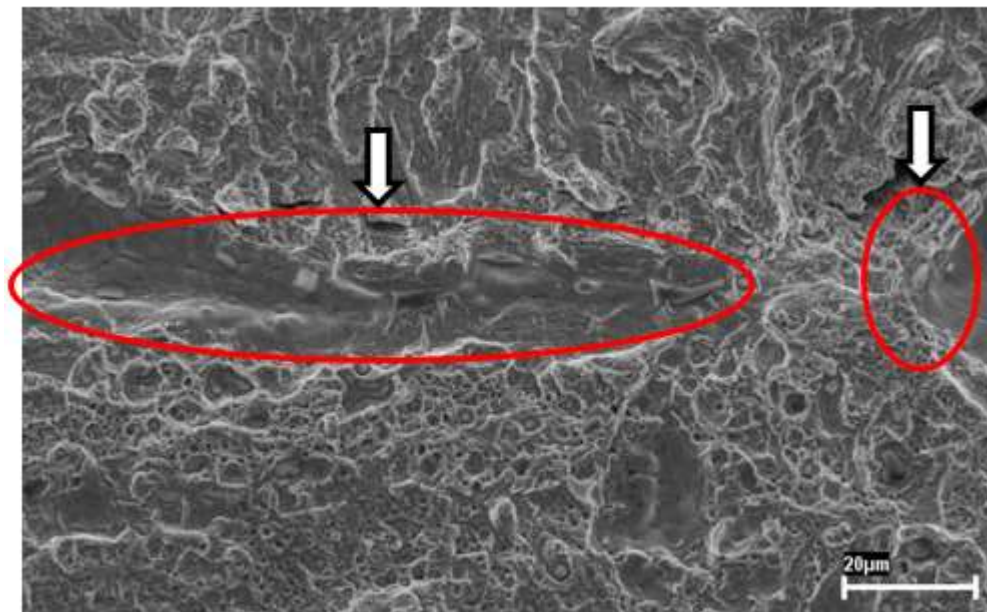
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 82 - C-GTAW Micro cavidades de fusão/solidificação (setas) – (MEV 2.000X)



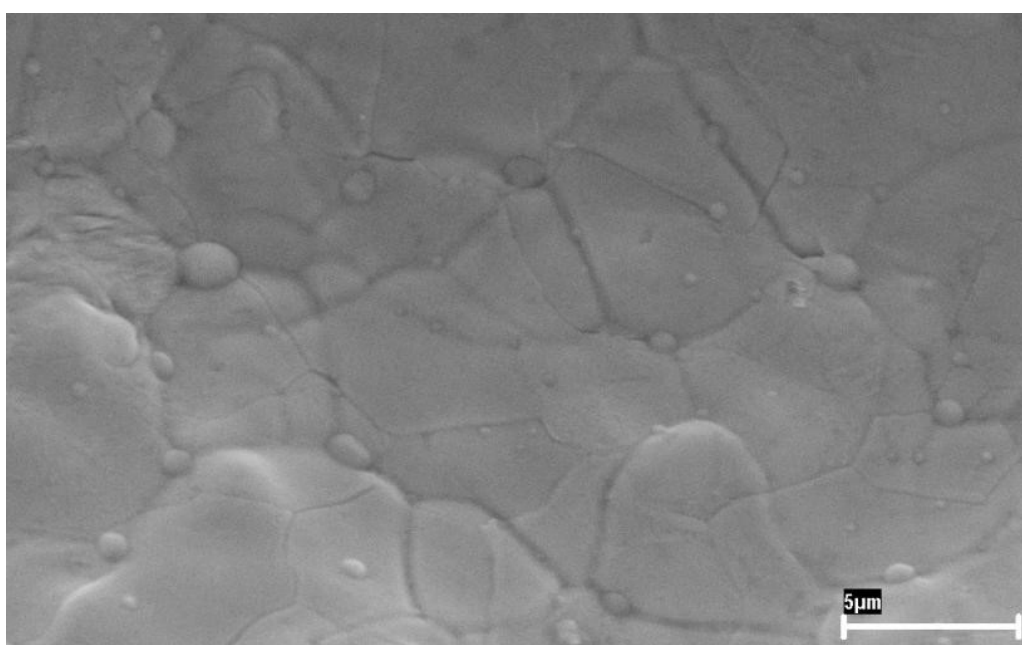
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 83 - C-GTAW Cavidade extensas- falta de fusão/solidificação (setas). (MEV 2.000X)



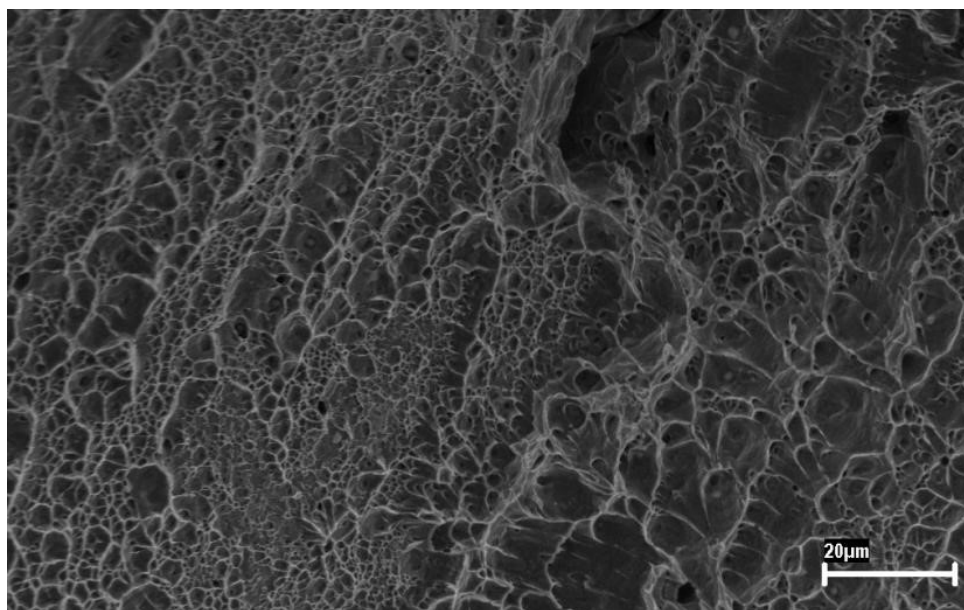
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 84 - C-GTAW Visão detalhada da Micro falta de fusão/solidificação (MEV 10.000X)



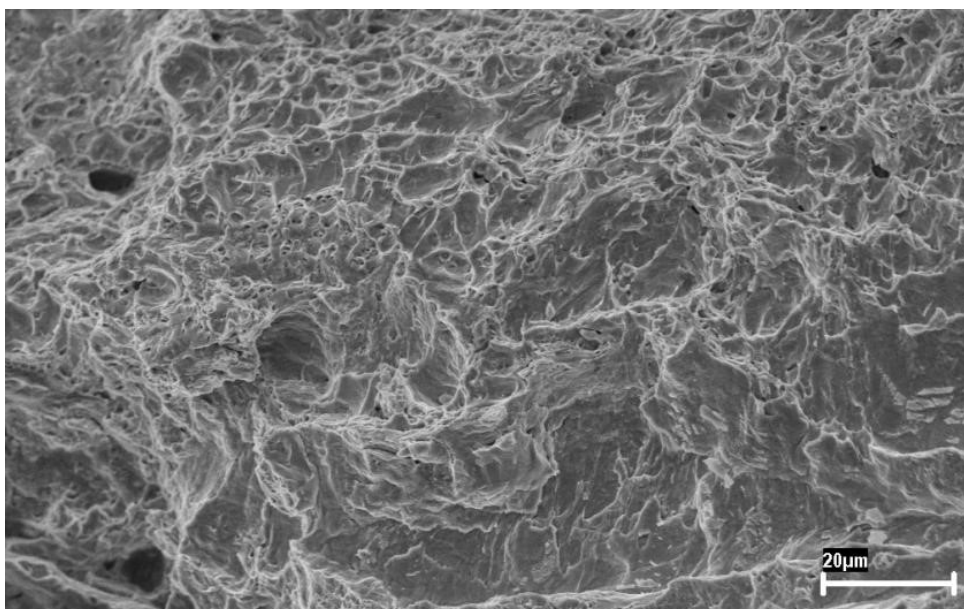
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 85 - GTAW-DWF 0.5 Hz. (MEV 2.000X)



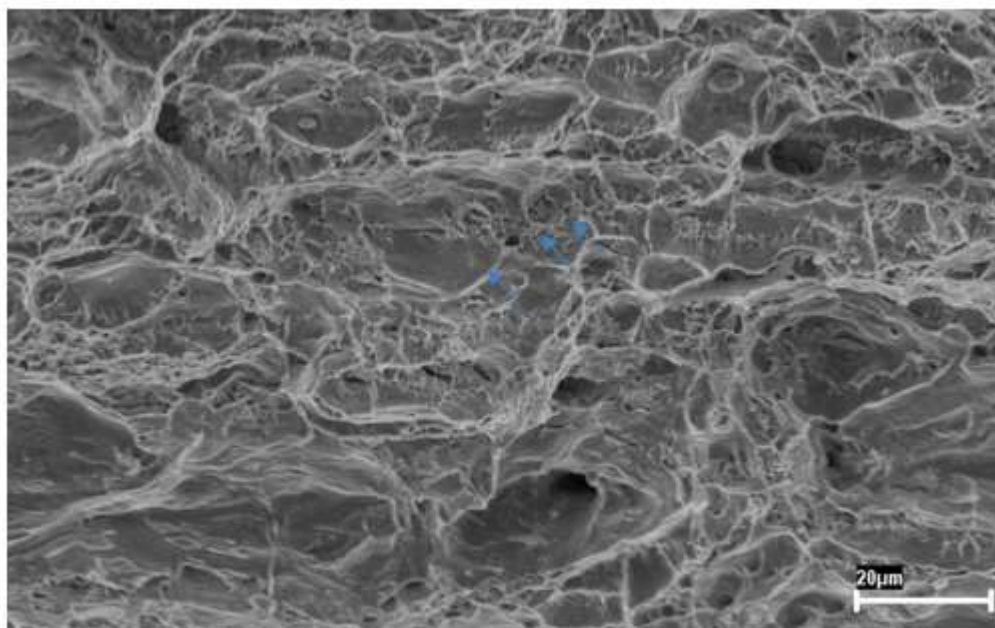
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 86- GTAW-DWF 5Hz. (MEV 2.000X)



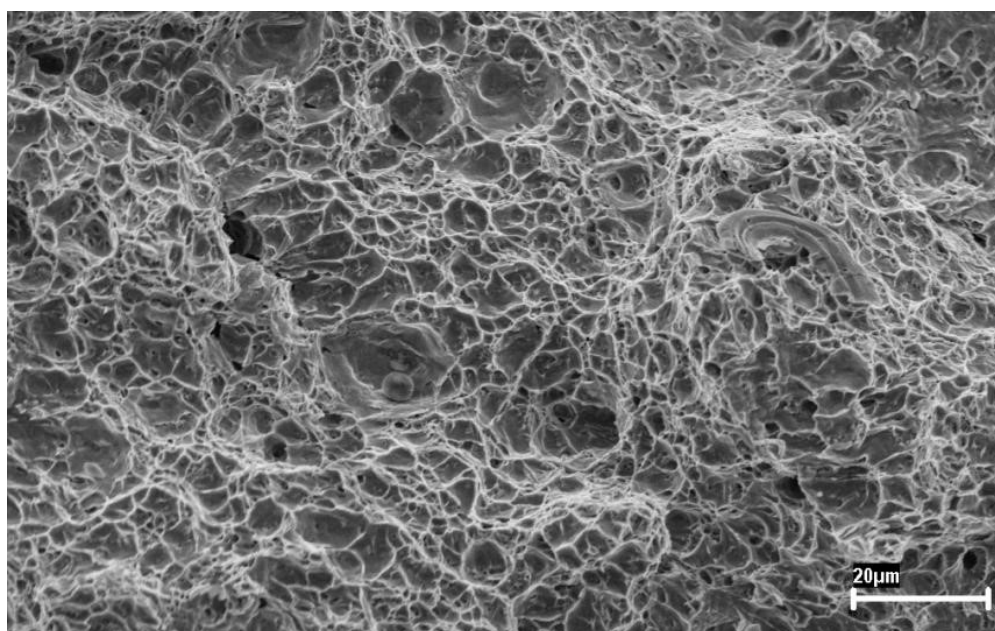
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 87 - GTAW-DWF 10 Hz. (MEV 2.000X)



Fonte: Elaborado pelo autor.

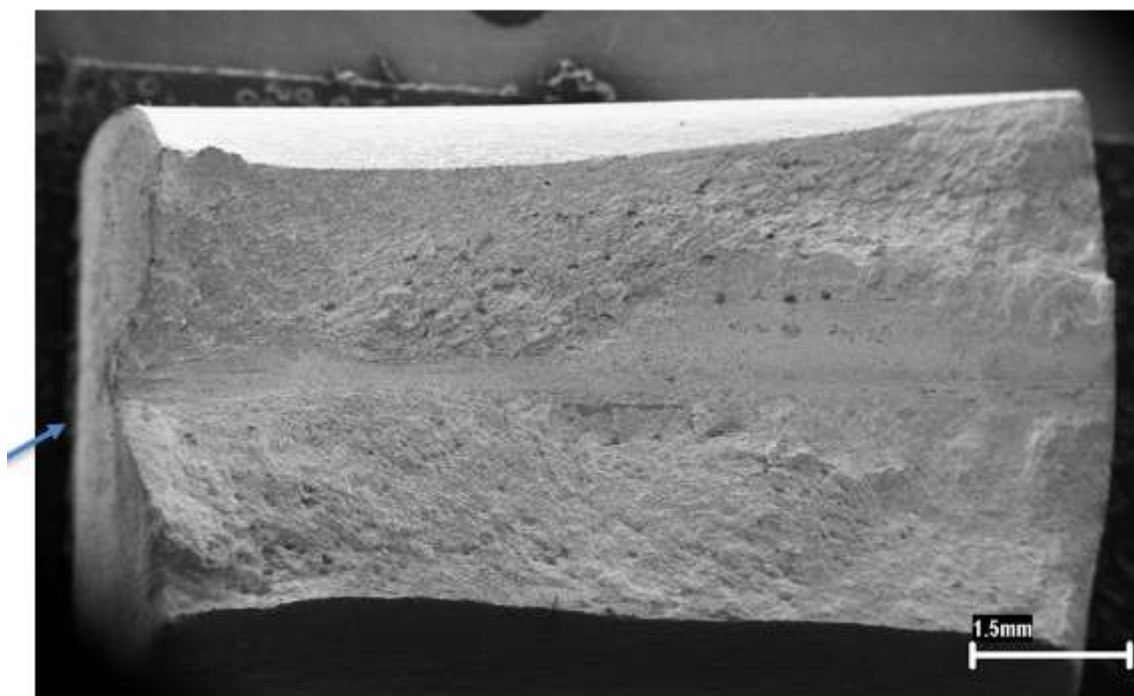
Figura 88 - GTAW-DWF 15 Hz. MEV 2.000X



Fonte: Elaborado pelo autor.

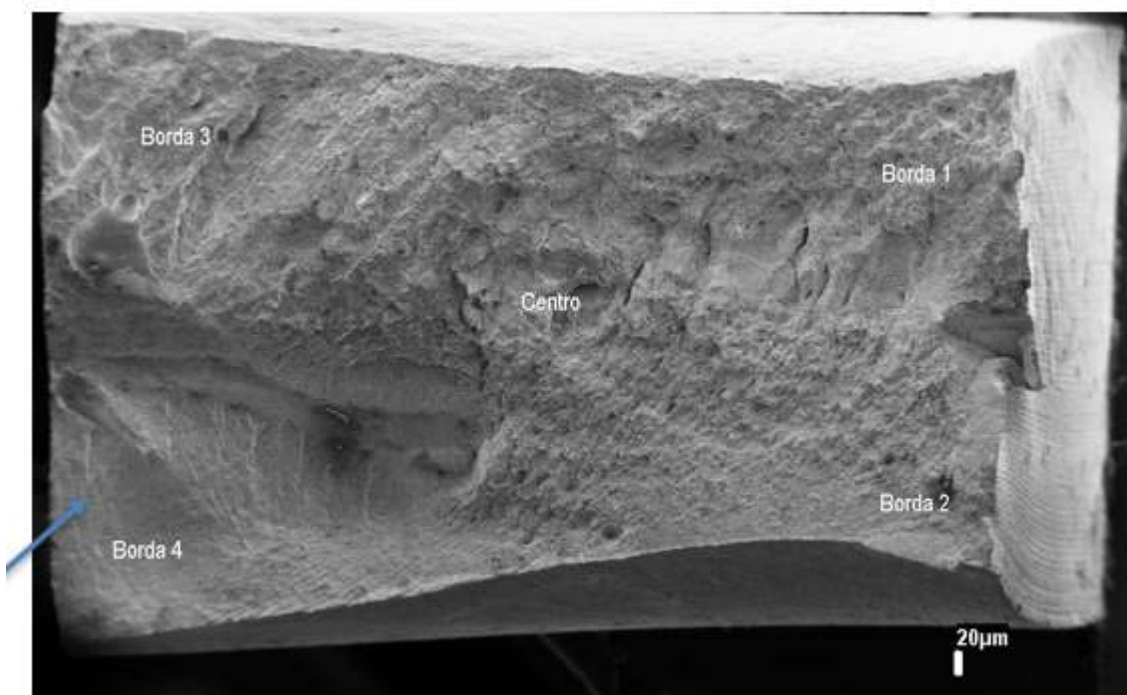
Obs.: Note os dimples característicos da fratura dúctil.

Figura 89 – Nucleação da trinca de fadiga nas bordas C-GTAW MEV



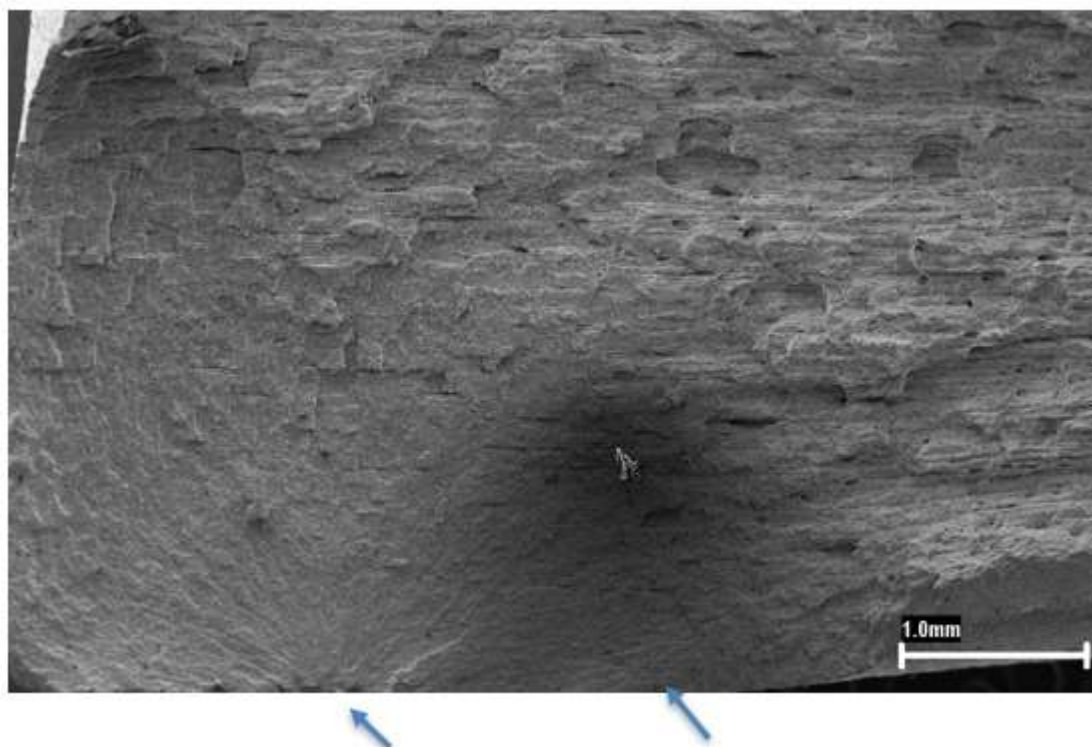
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 90 – Nucleação da trinca de fadiga nas bordas 3 e 4 GTAW-DWF 0,5 Hz. MEV



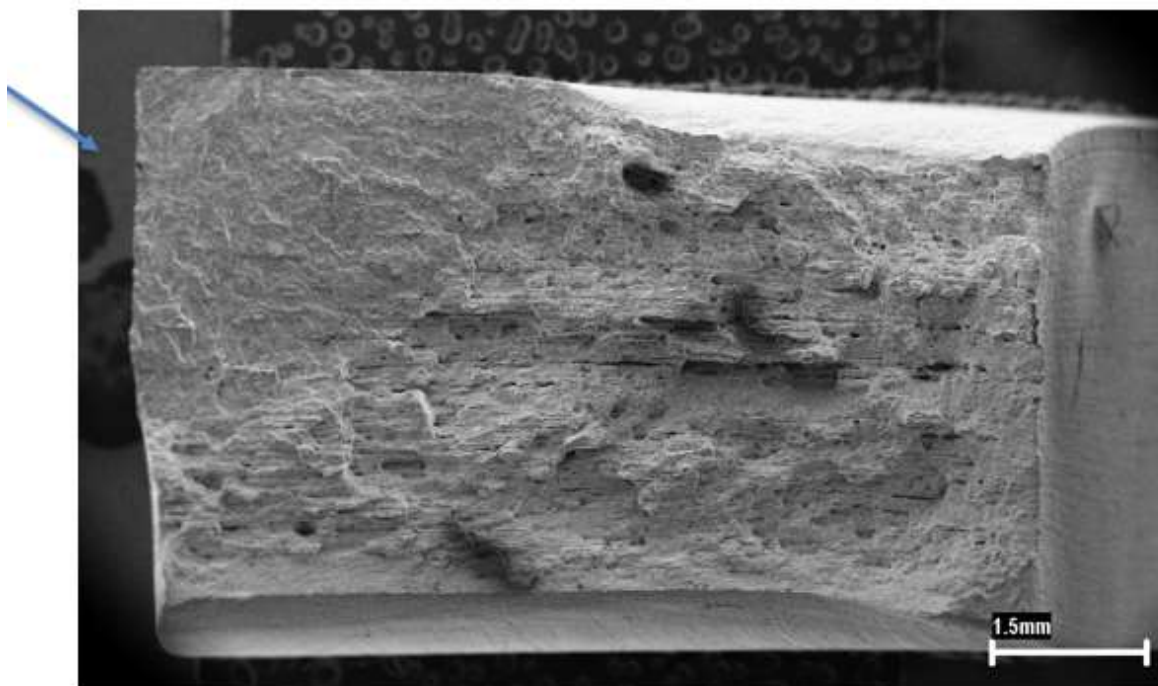
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 91 – Nucleação da trinca de fadiga nas bordas 4 GTAW-DWF 5 Hz. MEV



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 92 – Nucleação da trinca de fadiga nas bordas GTAW-DWF 5 Hz. MEV



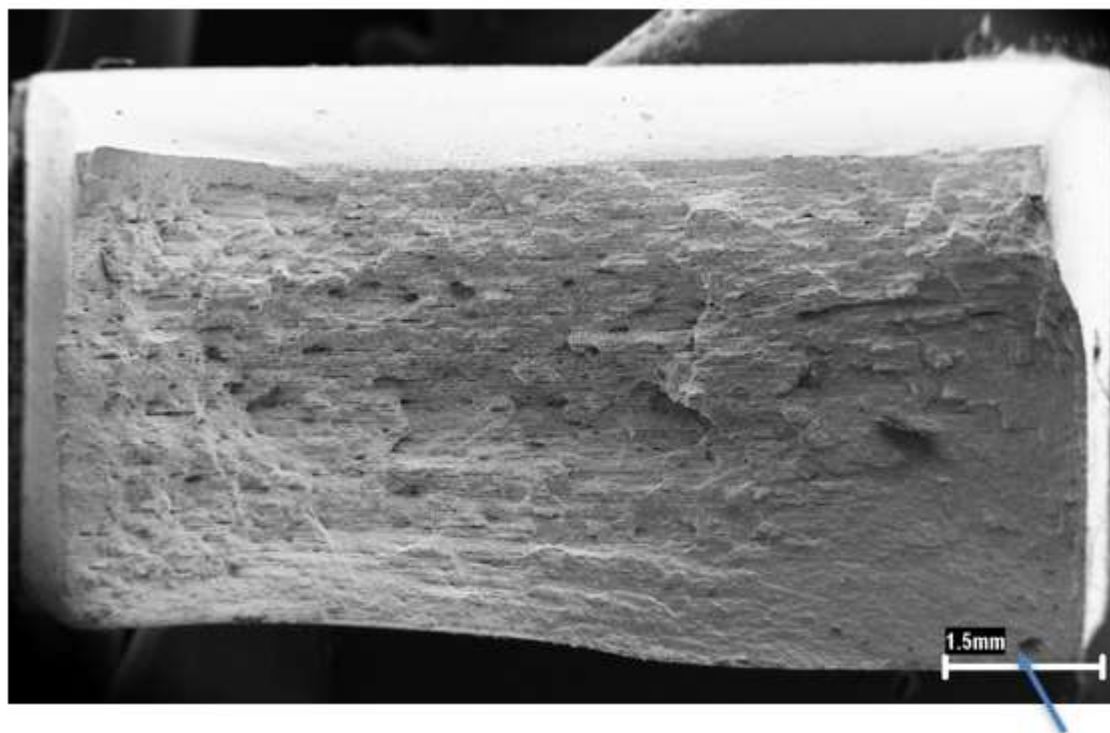
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 93 – Nucleação da trinca de fadiga nas bordas GTAW-DWF 10 Hz. MEV



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 94 – Nucleação da trinca de fadiga nas bordas GTAW-DWF 15 Hz. MEV



Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONTRIBUIÇÕES DE INOVAÇÕES NO CONHECIMENTO CIENTÍFICO

A literatura e as normas indicam a redução da vida em fadiga das juntas soldadas em relação ao metal base de Fustar Lukacevic Dujmovic (2018), Hobbacher (2015), e demais referencias citadas.

Destaca-se os trabalhos publicados como o “*Review of Fatigue Assessment Methods for Welded Steel Structures*” do Fustar Lukacevic Dujmovic (2018) e a norma do IIW publicada pelo A. Hobbacher “*Recommendations for fatigue design of welded joints and components*”, *IIW document IIW-2259-15, International Institute of Welding, Cambridge, UK, 2015*. Estes documentos corroboram com a redução da resistência a fadiga para juntas soldadas em aço e alumínio.

Por exemplo, no critério de projeto para aço, o FAT 160 ($N=10^7$ ciclos), para o metal base com FAT 140, a norma recomenda reduzir para o FAT 112 (na melhor condição da junta soldada: - NDT 100%, acabamento superficial com lixamento para eliminar descontinuidades superficiais e remoção do reforço da solda). Desta forma, para junta de topo semelhante ao tipo que estamos usando, a norma especifica redução de 20%. na vida em fadiga em relação ao metal base (CALLISTER, 2016; PASTOUKHOV; VOORWALD, 2010). A publicação do Rudy, J.F., no trabalho inicial com o processo *Dabber Gas Tungsten Arc Welding Drabber* TIG indica redução da vida em fadiga de 20 a 25% com 10^5 ciclos em relação em relação ao metal base (RUDY, 1982).

As curvas S x N obtidas com processo de soldagem GTAW-DWF indicam a tendência de aumentos significativos da resistência a fadiga das juntas soldadas comparando-se com o processo de soldagem convencional C-GTAW. Estes resultados e as tendências identificados neste projeto, até o presente momento, indicam o potencial desenvolvimento científico e tecnológico nas seguintes áreas:

- Influência das variáveis geométricas nas soldagens em Junta de Topo duplo V com processo TIG com alimentação dinâmica.
- Tendência de aumento significativo na vida em fadiga das juntas soldadas, com processo TIG com alimentação dinâmica, em relação ao metal base.
- Desenvolvimento de metodologia para análise e medição do SDAS.

6 CONCLUSÕES

Para indicação das conclusões relevantes deste trabalho, analisa-se previamente a sequência metodológica utilizada. Inicialmente encontrou-se a baixa resistência à fadiga das juntas soldadas com processo TIG convencional (C-GTAW) e os resultados da distribuição de weibull : menores valores do parâmetro de forma que resultou em uma variabilidade significativamente maior da vida em fadiga com consequente menor confiabilidade. Análise das fraturas por MEV demonstraram microdefeitos de solidificação que reduzem a resistência à fadiga.

Os ajustes do procedimento de soldagem do TIG com alimentação dinâmica (GTAW-DWF) produziu soldas com penetração total em chapas de 6,5mm isentas de micro defeitos de solidificação. A metodologia inédita de análise e medição dos espaçamentos interdendríticos dos braços secundários (SDAS) demonstram que o processo GTAW-DWF produziu soldas com menores SDAS em relação ao TIG convencional. O estudo mostra que a redução dos valores SDAS com GTAW-DWF em comparação com o processo convencional é uma abordagem para justificar o aumento da vida em fadiga. A frequência de 10Hz apresentou os menores valores de SDAS médios em relação com as demais frequências utilizadas no GTAW-DWF.

Os perfis de microdureza mostraram uma tendência de altos níveis de dureza na zona de fusão do metal de solda em GTAW-DWF em comparação com a zona afetada pelo calor e o metal base não afetado. Esse efeito pode contribuir para aumentar a resistência a fadiga para níveis superiores ao do metal base. Pode-se destacar também os efeitos das frequências na microdureza das ZACs: com aumento acelerado entre 0,5 e 5 Hz, baixando fortemente com 10Hz e voltando a aumentar com 15Hz. Aparenta existir o intervalo de frequências no processo GTAW-DWF com menor dureza na ZAC e menor pico de dureza na zona fundida. Essa combinação de efeitos pode contribuir para explicar o comportamento em fadiga da frequência 10Hz.

6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Considerando a abrangência desta pesquisa e os resultados obtidos, elencamos os temas relevantes para trabalhos futuros:

- Estudos dos ciclos térmicos com o processo GTAW-DWF; e,
- Investigação das aplicações do processo GTAW-DWF em materiais não ferrosos.

REFERÊNCIAS

- AIR LIQUIDE. **TOP TIG: A new robot welding process for industry**. [2021]. Disponível em: <http://www.airliquidewelding.com/file/otherelement/pj/w00026037344403.pdf>. Acesso em 30 abr. 2021.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. **Designation E8/E8M – 16a Standard** Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM, 2016.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. **Designation: E466 – 15**. Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM, 2020. Disponível em: <https://tajhizkala.ir/doc/ASTM/E466-15.pdf>. Acesso em 30 abr. 2021.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. **Designation: E739 – 10 (Reapproved 2015)**. Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data. West Conshohocken: ASTM, 2015. Disponível em: https://www.techstreet.com/standards/astm-e739-10-2015?product_id=1905506. Acesso em 30 abr. 2021.
- AYGÜL, M. *et al.* A comparative study of different fatigue failure assessments of welded bridge details. **International Journal of Fatigue**, Guildford, v.49, n.0. p.62-72, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014211231200357X>. Acesso em 30 abr. 2021.
- CALLISTER, WD. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9 ed. São Paulo: LTC, 2016.
- CAMPBELL, J. **Castings**, Butterworth-Heinemann- An imprint of Elsevier Science, Pag 270-302. Second edition 2003
- CHEN, S. J. *et al.* Effect of Torch Height on Arc Stability in Divided Arc Processes. **Welding Journal**, Miami, 2016. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-Torch-Height-on-Arc-Stability-in-Divided-Chen-Zhang/>. Acesso em 30 mai. 2018.
- CHRYSSANTHOPOULOS, M.K.; RIGHINIOTIS, T.D. Fatigue reliability of welded steel structures. **Journal of Constructional Steel Research**, s.l., v. 62, n;11, p.1199-1209, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X0600126X> Acesso em 30 abr. 2021.
- COMMITTEE II.2. Fatigue and fracture. In: **18TH INTERNATIONAL, SHIP AND OFFSHORE STRUCTURES CONGRESS** s.l.: COMMITTEE II.2, 2012. Disponível em: <http://www.stg-online.org/publikationen.html>. Acesso 08 jun 2022.
- DAVID, S.A.; BABU, S.S.; VITEK, J.M. Welding: Solidification and Microstructure. **JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society**. Novelty, v.1, n.1, p. 14-20, 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-003-0134-7>. Acesso em 30 abr. 2021.

DIAMOND GROUND. **Diamond Ground Products**. [2014]. Disponível em: <http://www.diamondground.com/why-buy-wolfram-tungsten-electrodes/>. Acesso em 30 abr. 2021.

EFFERTZ P.S. *et al.* Fatigue life assessment of friction spot welded 7050-T76 aluminium alloy using Weibull distribution. **International Journal of Fatigue**, Guildford, v. 87, p.381-390, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.02.030>.

EUROCODE, Comitê Europeu de Padronização. **EN 1993-1-9/CEN, Eurocode 3: Projeto de Estruturas Metálicas, Parte 1-9: Fadiga**. Bruxelas: EUROCODE, 2005. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/np-en-1993-1-9-2010-pdf-free.html>. Acesso em 30 abr. 2021.

EWM GROUP. **TigSpeed drive - TIG Quality Welding at MIG/MAG Speed**. [2015]. catálogo do fabricante. Disponível em: [https://tajhizkala.ir/doc/ASTM/E739-1020\(Reapproved202015\).pdf](https://tajhizkala.ir/doc/ASTM/E739-1020(Reapproved202015).pdf). Acesso em 30 abr. 2021.

FOURLAKIDIS, V. **Dendritic Morphology and Ultimate Tensile Strength of Pearlitic Lamellar Graphite Iron**. s.l. 2019. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1293214&dswid=-1781>. Acesso em 30 abr. 2021.

FERNANDES, J. L., MELO, P.F.F., CARVAJAL, S.R.O. A Model of Fractional Factorial Design of experiments in aircraft components engine. **18TH International Congress of Mechanical Engineering – COBEM**, Ouro Preto, 2005. Disponível em: [http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/cobem/2005/PDF/COBEM 2005-1456.pdf](http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/cobem/2005/PDF/COBEM%2005-1456.pdf). Acesso em 05 abr. 2021.

FERNANDES, M. F. *et al.* **AISI 4140 Steel Fatigue Performance: Cd Replacement by Electroplated Zn-Ni Alloy Coating**. 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/201567>. Acesso em 30 abr. 2021.

FUSTAR, B.; LUKACEVI, I.; DUJMOVI, D. Review of Fatigue Assessment Methods for Welded Steel Structures, **Hindawi- Advances in Civil Engineering**. London. 2018. v.2018, Article ID 3597356, 16 p. Disponível em: [https://www.hindawi.com/journals/ ace/ 2018/3597356/](https://www.hindawi.com/journals/ace/2018/3597356/). Acesso em 30 abr. 2021.

GENG, H. *et al.*, Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing, **Journal of Materials Processing Technology**. London. v.243, n.1, p.40-47, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013616304137>. Acesso em 30 abr. 2021.

HAMDULAY, H.; MATTHEW, M.; WANI, S. Study of Fatigue and Life Assessment of Steel Structures: IS 800:2007 Provision. **International Journal of Scientific & Engineering Research**. Navi Mumbai. v. 5, n. 12, p. 17-21, 2014. Disponível em: <https://www.ijser.org/researchpaper/Study-of-Fatigue-and-Life-Assessment-of-Steel-Structures-IS-800-2007-Provision.pdf>. Acesso em 30 abr. 2021.

HEBERT, P.; PIKE, G.; RICE, D. **Evaluation of the tip tig welding system, a semi-automatic hot wire GTAW process, compared to manual GTAW**. [2013]. Disponível em: https://www.nsrp.org/wp-content/uploads/2015/10/Deliverable-2005-341r29-Tip_Tig_vs_Tig_Final_Report-Newport_News_Shipbuilding.pdf. Acesso em 30 mai. 2018

HOBBACHER A. Stress intensity factors of welded joints. **Eng Fract Mech**, s.l., v.46, n.2 p.173–182,1993.

HOBBACHER A. **Recommendations for fatigue design of welded joints and components: IIW document IIW-2259-15 ex XIII-2460-13/XV-1440-13, this document is a revision of XIII-215r4-07/XV-1254r4-07** (Recomendações para o Design de Fadiga de Juntas e Componentes Soldadas, Documento IIW IIW-2259-15). Instituto Internacional de Soldagem. Cambridge: Springer, 2015.

HOBBACHER, A. **Recommendations for fatigue design of welded Joints and components. IIW document IIW-1823-07 ex XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07**. [2008]. Disponível em: <https://community.ptc.com/sejnu66972/attachments/sejnu66972/cpanalysis/5465/1/XIII-1823-.pdf>. Acesso em 30 abr. 2021.

IMC Soldagem. **SAP-4 - Sistema de Aquisição Portátil**. [2021].Disponível em: http://www.imc-soldagem.com.br/sap_4.html. Acesso em 30 abr. 2021.

ISA, M.R. *et al.* Improvement of mechanical properties and fatigue life by shot peening process on ASTM A516 Grade 70 steel, **Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences**. Johor Bahru, v.14, n. 4, p.440-442, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/331375873>. Acesso em 30 mai. 2018

JETLINE ENGINEERING. **Operation manual for CWF-23-E-9900 Dabber-Type Wire Feeder**. [2013]. Disponível em: <https://paperzz.com/doc/8995417/operation-manual-for-cwf-23e-9900-dabber>. Acesso em 05 abr. 2021.

JOLLY, M. Prof. John Campbell's Ten Rules for Making Reliable Castings. 2005. **JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society**. s.l., v.57, n.5, p.19-28, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/225481948Prof_John_Campbell%27s_ten_rules_for_making_reliable_castings. Acesso em 29 abr. 2021.

K-TIG. **K-TIG Advanced Welding Technologie**. [2011]. Disponível em: <http://www.k-tig.com/>. Acesso em 30 abr. 2021.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. [2002]. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471434027/>. Acesso em 30 abr. 2021.

LI, S-C. *et al.* On specimen design for high cycle fatigue testing of welded joint. **International Journal of Fatigue**, Guildford, v. 136, n.1, p.105597, 2020. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/On-specimen-design-for-high-cycle-fatigue-testing-Li-Zhang/f05793882dbcff543ffb67b1241475b44bb32336>. Acesso em 30 abr. 2021.

LIPPOLD, J.C. **Welding Metallurgy and Weldability**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2014.

MADISON, D.J. **Investigation of solidification defect formation by three-dimensional reconstruction of dendritic structures**. Orientador: Prof. Dr. Tresa M. Pollock. 2010. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Materials Science and Engineering) in The University of Michigan [2010]. Chair Disponível em: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/76001>. Acesso em 30 abr. 2021.

MARQUES, C. **Análise de Técnicas e Efeitos Físicos da Alimentação Dinâmica do Arame no Processo de Soldagem MIG/MAG com Vistas ao Desenvolvimento de um sistema Flexível Nacional**. Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra. 2017. 210 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica). UFSC. Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/182905>. Acesso em 30 mai. 2018

NASCIMENTO, M.P.; VOORWALD, H.J.C. Considerations on corrosion and weld repair effects on the fatigue strength of a steel structure critical to the flight-safety. **International Journal of Fatigue**, Guildford, v. 32, n.1, p. 1200-1209, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/9409>. Acesso em 30 abr. 2021.

NASCIMENTO, M.P; VOORWALD, H.J.C.; PAYÃO FILHO, J.C. Fatigue strength of tungsten inert gas-repaired weld joints in airplane critical structures. **Journal of Materials Processing Technology**. Amsterdam, v. 211, n. 6, p. 1126-1135, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013611000288>. Acesso em 30 abr. 2021.

NEVES, N. *et al.* Effects of GTAW Dynamic Wire Feeding Frequencies on Fatigue Strength of ASTM A516-70 Steel Welded Joints. **Journal of Materials Engineering and Performance**. Novelty, v. 31, n.1, p. 6435–6450, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06868-4>. Acesso em 30 abr. 2022.

NEVES, N. **Estudo da Nucleação de Trincas de Solidificação e Propagação por Fadiga em Aço Carbono Manganês Soldado com Arco Submerso**. Orientador: Prof. Dr. Hermam Jacobus Cornelis Voorwald. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista – UNESP Guaratinguetá, 1993.

NIELSEN, M.A., **Parameter Estimation for the Two-Parameter Weibull Distribution**. [2011]. Disponível em: <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/2509>. Acesso em 30 mai. 2021.

OLIVARES, E.A.G. **Uma abordagem Técnica e Científica do Processo TIG Keyhole a Luz de Novas Tecnologias e Aspectos Comparativos como Processo Plasma**. Orientador: Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra. 2015. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/136470/335898.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 30 abr. 2021.

PAES, L.E. **Soldagem TIG Orbital: Técnica de Alimentação Dinâmica do Arame Visando Aumento na Produtividade**. Orientador: Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra. 2016. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/176703/347848.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 30 mai. 2018

PASTOUKHOV, V.A.; VOORWALD, H.J.C. **Introdução à mecânica da integridade estrutural**. 1ª ed. São Paulo: UNESP, 2010.

PEDERSEN, M. M. Thickness Effect in Fatigue of Welded Butt Joints: A Review of Experimental Works. **International Journal of Steel Structures**. Arthus, v.19, n.6, p.1930–1938, 2019. Disponível em: <http://fatiguetoolbox.org/wp-content/uploads/2019/08/FatButt final. pdf>. Acesso em 30 abr. 2021.

PETROBRÁS. N – 133-Rev. **Soldagem** – Norma da Petrobras. Rio de Janeiro. 2004. Disponível em: <https://canalforneceador.petrobras.com.br/pt/regras-de-contratacao/catalogo-de-padronizacao/>. Acesso em 01 mai. 2019.

PIGOZZO, I.O. **Soldagem TIG orbital: otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe de raiz**. Orientador: Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra. 2015. 132 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/134664/333915.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 30 mai. 2018.

QUITES, A.M., DUTRA, J.C. **Tecnologia da soldagem a arco voltaico**. Florianópolis: EDEME, 1979.

RIFFEL, C.R. **Avanços Tecnológicos do processo TIG: Técnicas inovadoras de alimentação de arame e procedimentos automatizados como contribuição para a união de tubos internamente cladeados**. Orientador: Prof. Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva. 2018. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/176703/347848.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 15 mai. 2020

RUDY, J.F. **Development and Application of Dabber Gas Tungsten Arc Welding for Repair of Aircraft Engine, Seal Teeth**. [1982]. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings/GT1982/79573/V002T02A005/229794>. Acesso em 10 jan. 2020.

SCHNEIDER, C.A.; RASBAND, W. S. & ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 anos de análise de imagem. **Nature Methods**. Bethesda, v.9, n.7, p. 671-675, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22930834/> Acesso em 30 abr. 2021.

SCHÖNMAIER H., *et al.* Influence of the Heat Input on the Dendritic Solidification Structure and the Mechanical Properties of 2.25Cr-1Mo-0.25V Submerged-Arc Weld Metal. **JMEPEG**. Leoben, v. 30, n.1, p.7138–7151, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11665-021-05922-x.pdf>. Acesso em 30 mai. 2021

SHANYAVSKIY, A. Crack path for run-out specimens in fatigue tests: is it belonging to high- or very-high-cycle fatigue regime? **Frattura ed Integrità Strutturale**, Moscow, v.34, p.199-207, 2015. Disponível em: <https://www.fracturae.com/index.php/fis/article/view/1572/1598>. Acesso em 30 abr. 2021.

SILVA, R.H.G. *et al.* Effect of dynamic wire in the GTAW process. **Journal of Materials Processing Technology**. Amsterdam. v. 269, p. 91-101, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013619300391#!>. Acesso em 30 abr. 2021.

SILVA, R.H.G. *et al.* TIG welding process with dynamic feeding: a characterization approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** (2018) 96:4467–4475. London. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1929-6> Acesso em 30 abr. 2021.

SPS- SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM. **OrbiTIG**. [2018] Disponível em: <http://www.sps-soldagem.com.br/orbitig.php>. Acesso em 05 out. 2018.

TIP TIG INTERNATIONAL AG. TIP TIG - **It's an Evolution of the TIG Welding**. [S.l.]. **Catálogo do fabricante**. [2018]. Disponível em: <http://tiptig-international.com/TTI%20Brochure.pdf>. Acesso em 30 mai. 2018

VANDERSLUIS, E.; RAVINDRAN, C. Comparison of Measurement Methods for Secondary Dendrite Arm Spacing. **Metallography, Microstructure, and Analysis**. New York. v. 6, p.89–94, 2017. Acesso em 30 abr. 2021.

WAINER, E., BRANDI S.D, MELO V.O. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 7ª ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2010.

WEI-CHANG Z. *et al.* Failure mechanisms and design of dissimilar welds of 9%Cr and CrMoV steels up to very high cycle fatigue regime. **International Journal of Fatigue**, Guildford, v.113, p.367-376, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112318301713>. Acesso em 30 abr. 2021

WEIZENMANN, G.S. **Desenvolvimento de Infra-Estrutura para o Estudo dos Efeitos da Oscilação Longitudinal da Tocha de Soldagem (Switch Back) e Avaliação de Desempenho no Processo TIG Autógeno**. Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra. 2015. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC Florianópolis, 2015. Disponível em: https://labsolda.ufsc.br/publicacoes/teses_dissertacoes/disse_2015_guilherme.pdf. Acesso em 30 mai. 2018.

WU, W. *et al.* Effect of Temperature on High-Cycle Fatigue and Very High Cycle Fatigue Behaviours of a Low-Strength Cr-Ni-Mo-V Steel Welded Joint. **Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. (FFEMS)**, s.l., [2016]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/303300497_Effect_of_temperature_on_high-cycle_fatigue_and_very_high_cycle_fatigue_behaviours_of_a_low-strength_Cr-Ni-Mo-V_steel_welded_joint. Acesso em 30 abr. 2021.

YANG; H. *et al.* Fatigue Behavior of Square Tube-to-Plate Welded Joints in Bogie Frames: an Experimental Study and Traction Structural Stress-based Analysis. **International Journal of Fatigue**, Guildford, v.165, p.107-216, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112322004674?via%3Dihub>. Acesso em 27 de mar.2022.

ZHANG, W-C. *et al.* Failure mechanisms and design of dissimilar welds of 9%Cr and CrMoV steels up to very high cycle fatigue regime. **International Journal of Fatigue**, Guildford, v.113, p. 367-376, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112318301713>. Acesso em 30 abr. 2021.

ZHU, M-L. *et al.* Very high cycle fatigue behavior of a low strength welded joint at moderate temperature. **International Journal of Fatigue**, Guildford, v.40, n. 1, p. 74- 83, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/256970509_Very_high_cycle_fatigue_behavior_of_a_low_strength_welded_joint_at_moderate_temperature. Acesso em 06 jun. 2022.

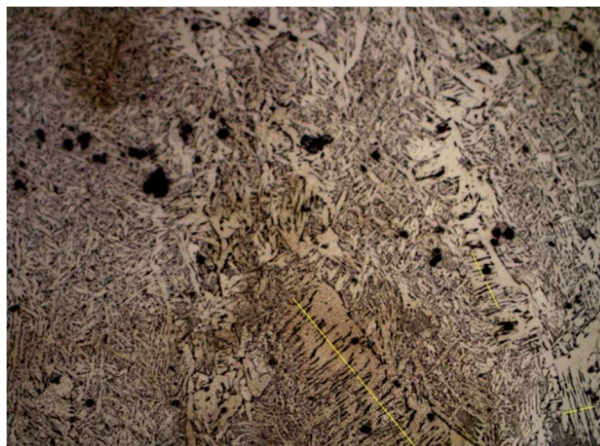
ZHU, M-L.; LIU, L-L.; XUAN, F-Z. Effect of frequency on very high cycle fatigue behavior of a low strength Cr–Ni–Mo–V steel welded joint). **International Journal of Fatigue**, Guildford, v.77, n.1, p.166-173, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112315001073>. Acesso em 06 jun. 2022.

ZHU, M-L; XUAN, F-Z. **Failure mechanisms and fatigue strength reduction factor of a Cr-Ni-Mo-V steel welded joint up to ultra-long-life regime.** MATEC Web Conference, Les Ulis Cedex A, v. 165, Article Number 21012, 9 p. 2018 12th International Fatigue Congress (FATIGUE 2018) 2018. Disponível em: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/24/mateconf_fatigue_21012/mateconf_fatigue2018_21012.html. Acesso em 06 jun. 2022.

ZHU, M-L; XUAN, F-Z; WANG, Z. **Very high cycle fatigue behavior and life prediction of a low strength weld metal at moderate temperature.** Conference: PROCEEDINGS OF THE ASME PRESSURE VESSELS AND PIPING CONFERENCE (PVP-2011), Baltimore, v. 7 2011 p. 317-329. DOI:[10.1115/PVP2011-57473](https://doi.org/10.1115/PVP2011-57473). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/256970509>. Acesso em 30 abr. 2021.

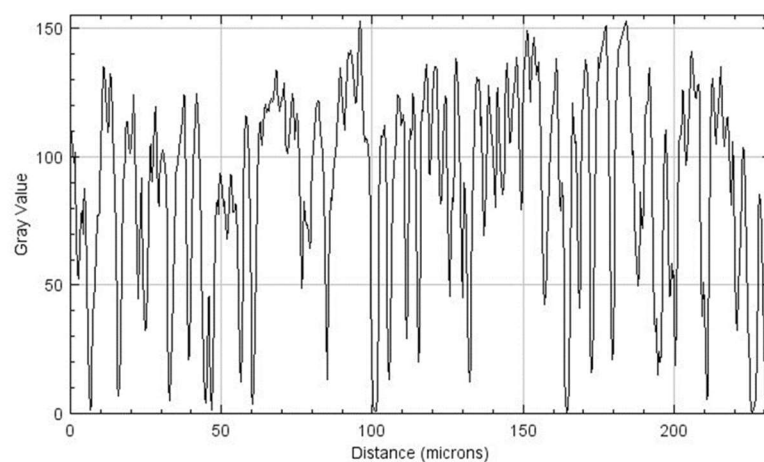
ANEXO 1 – MATERIAL COMPLEMENTAR DAS ANÁLISES DESENVOLVIDAS COM MICROSCOPIA ÓTICA E IMAGE J

ANEXO 1.1 - ANÁLISES DA ZONA FUNDIDA DAS SOLDAS



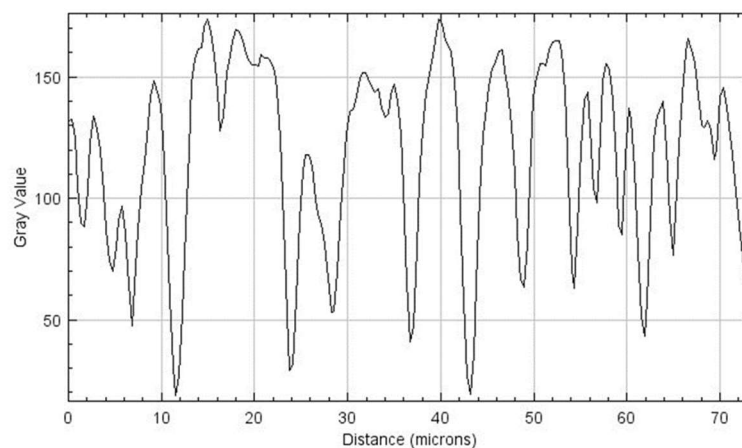
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.2 POSIÇÃO 98 - 200X - GTAW MANUAL CONVENCIONAL



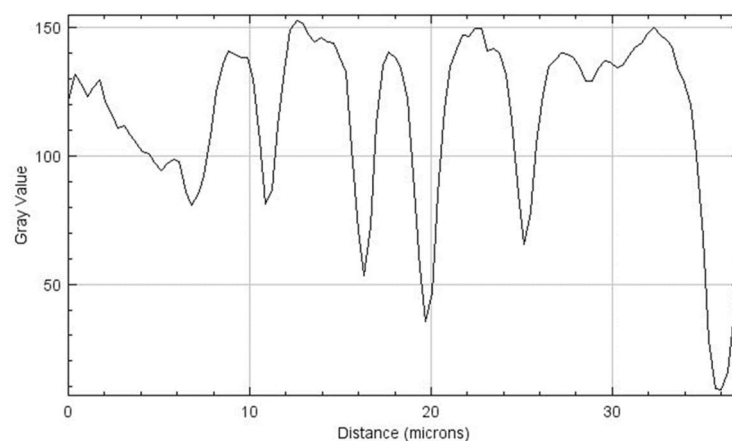
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.3. POSIÇÃO 98-1. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGE J



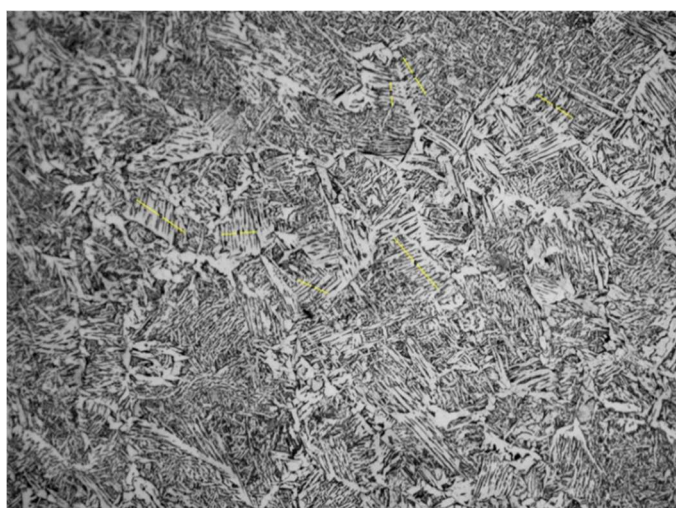
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.4. POSIÇÃO 98- HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGE J



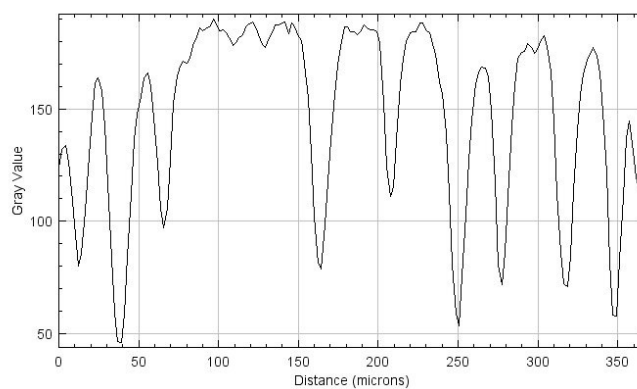
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.5. POSIÇÃO 98-3. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGE J



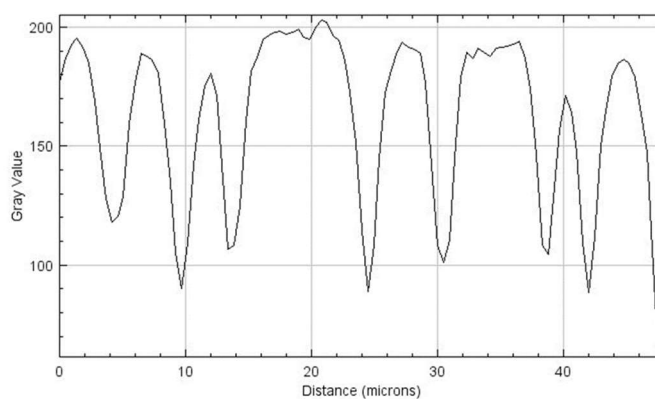
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.6. POSIÇÃO 98 – GTAW- AD – FREQUÊNCIA 0,5 HZ



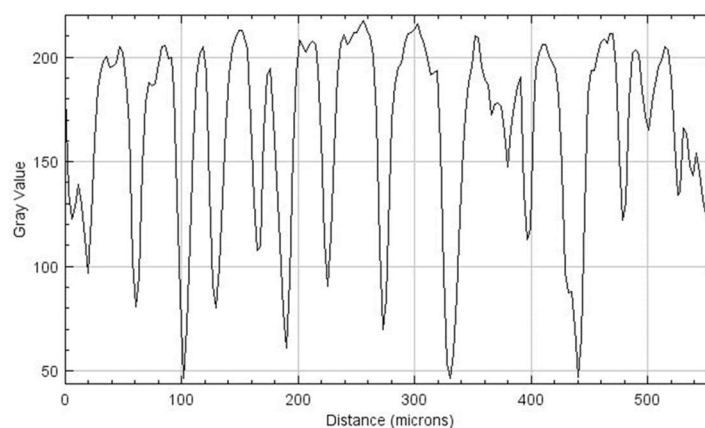
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.7. POSIÇÃO 98-1. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGE J



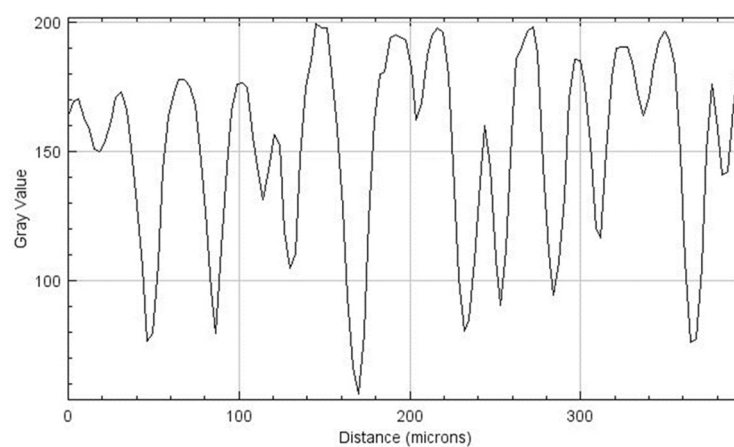
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.8. POSIÇÃO 98-2. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGE J



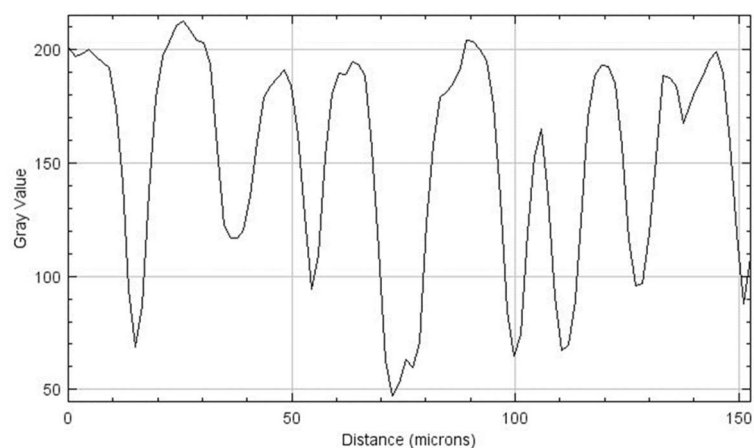
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.9. POSIÇÃO 98-3. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGE J



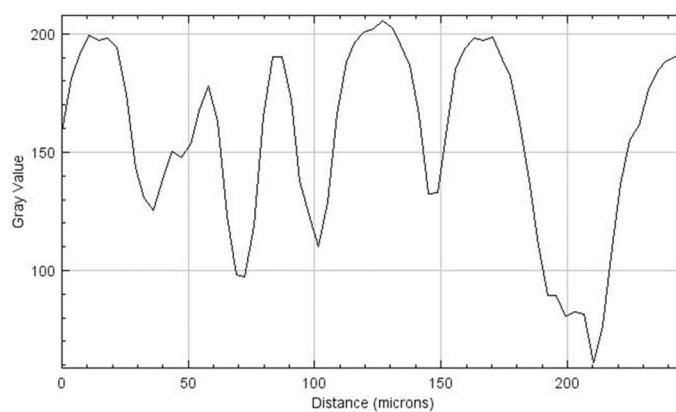
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.10 – POSIÇÃO HISTOGRAMAS DAS DENTRITAS DO IMAGE J



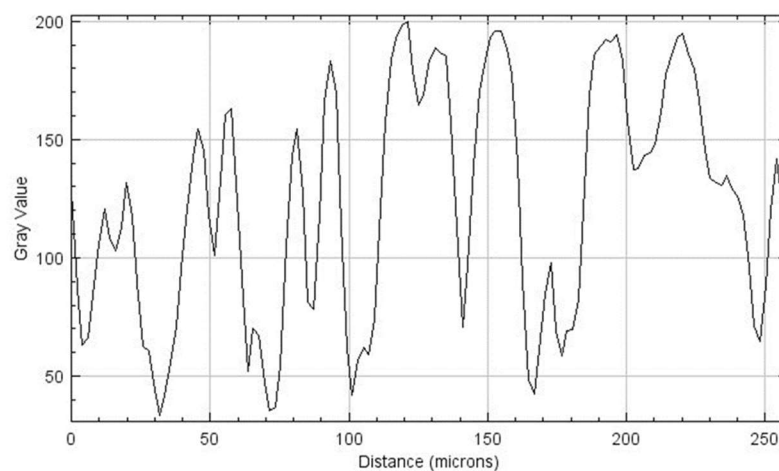
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.11. POSIÇÃO 98-5. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGEJ.



Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.12. POSIÇÃO 98-6. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGEJ.



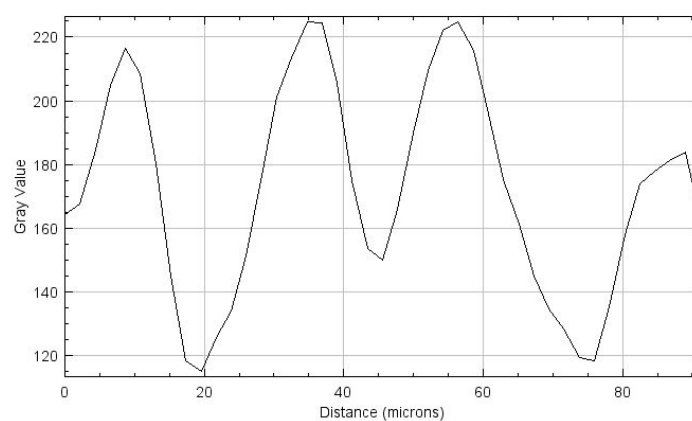
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.13- POSIÇÃO 98-7. HISTOGRAMAS DAS DENDRITAS DO IMAGEJ



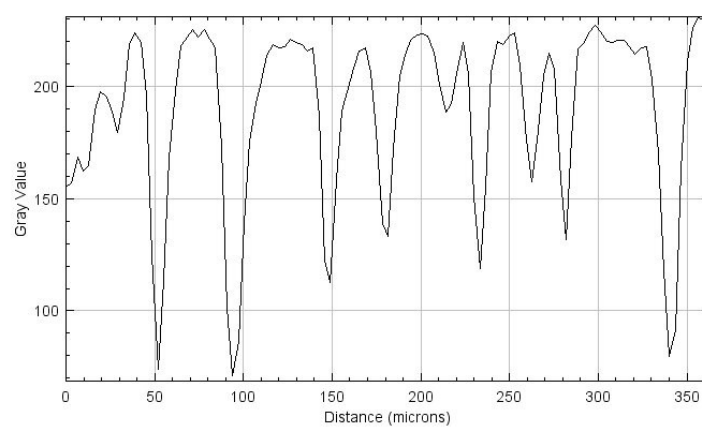
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.14- POSIÇÃO 97. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 5 HZ



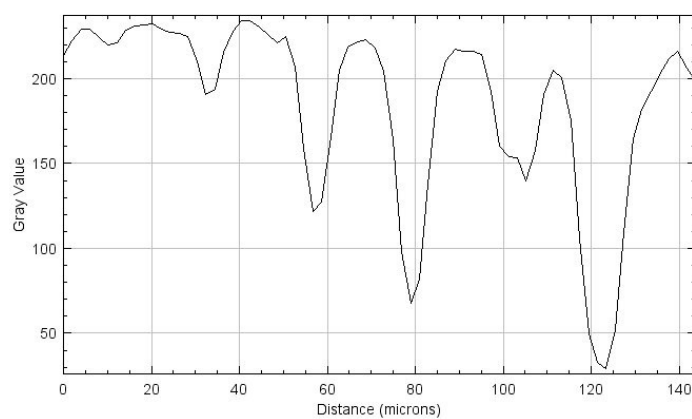
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.15- POSIÇÃO 97-1. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 5 HZ



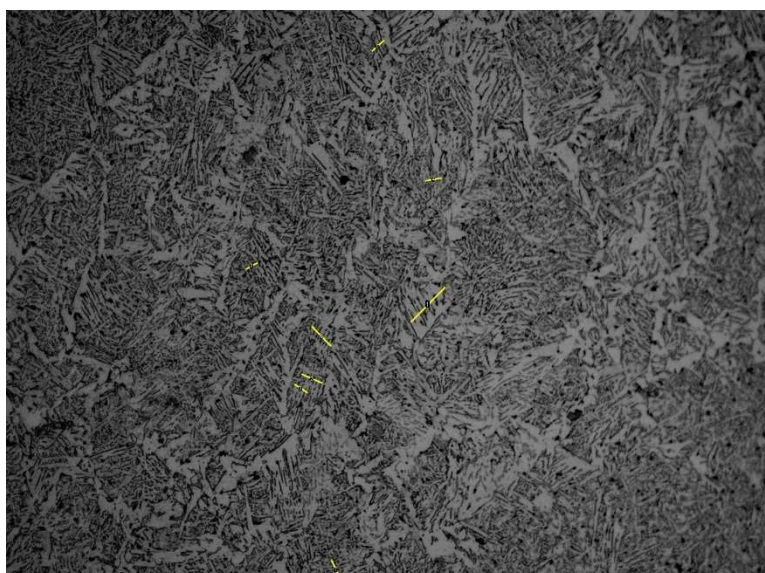
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.16- POSIÇÃO 97-2. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 5 HZ



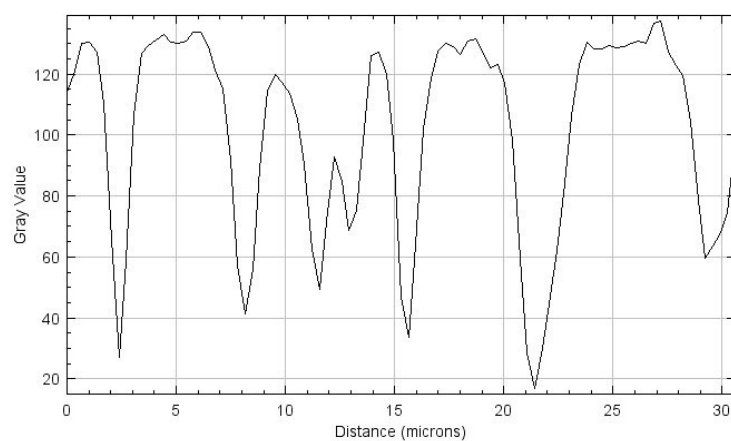
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.17- POSIÇÃO 97-3. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 5 HZ



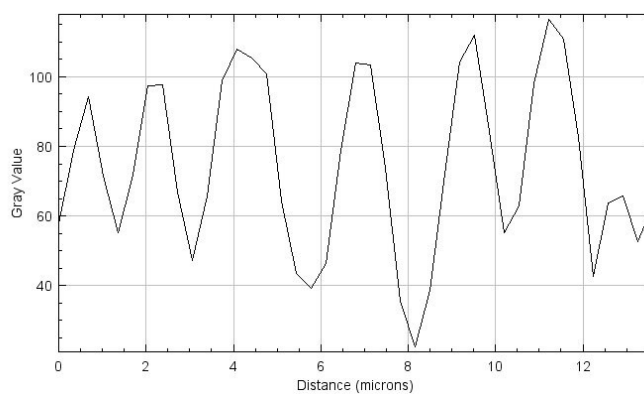
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.18- POSIÇÃO 100. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ



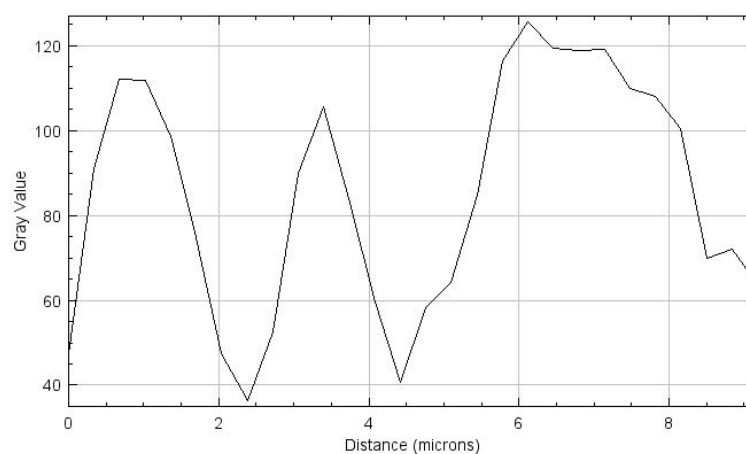
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.19- POSIÇÃO 100-1 – GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ



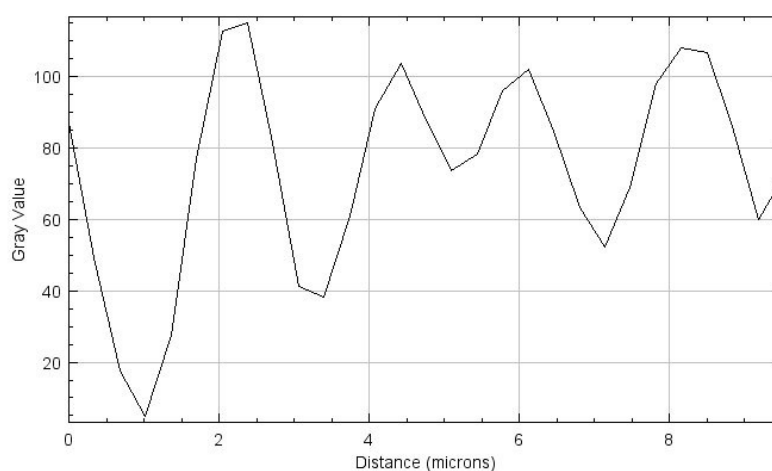
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.20- POSIÇÃO 100-2 – GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ



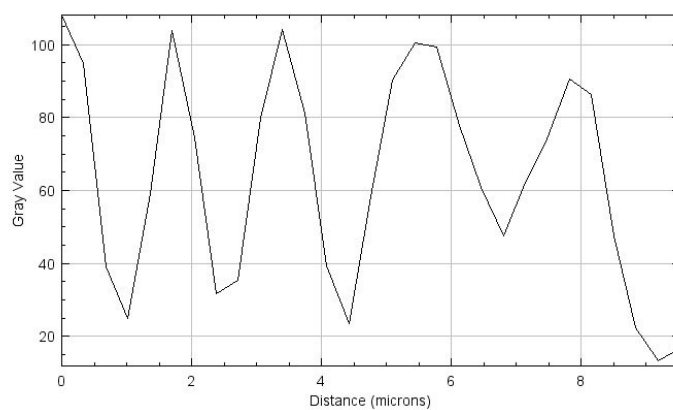
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.21- POSIÇÃO 100-3 – GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ



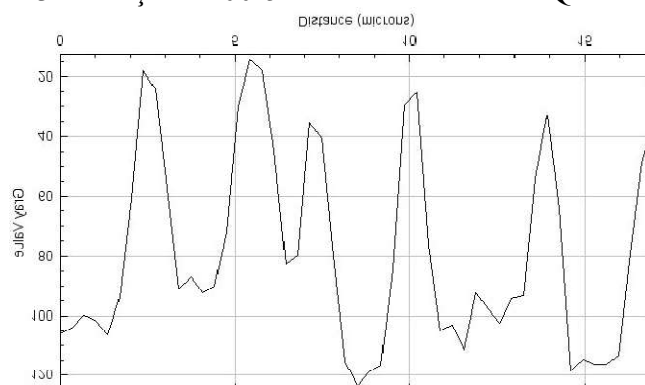
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.22- POSIÇÃO 100-4. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ



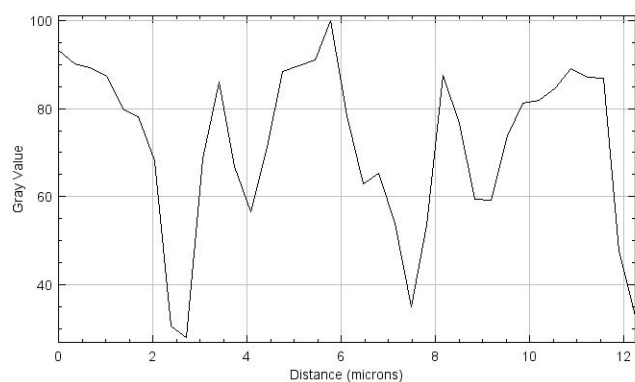
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.23 POSIÇÃO 100-5. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ



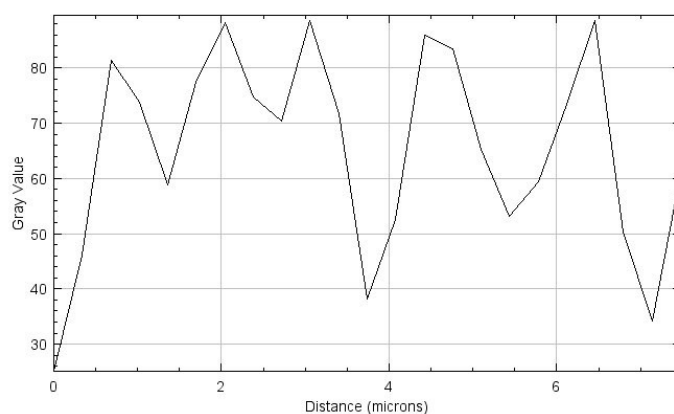
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.24. POSIÇÃO 100-6 .GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ



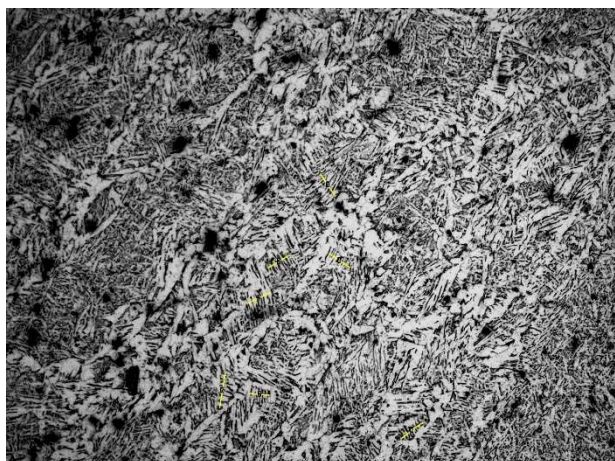
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.25 POSIÇÃO 100-7. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ



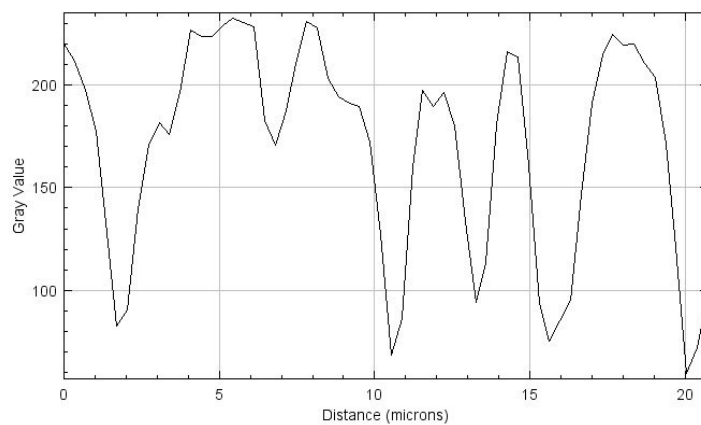
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.26 POSIÇÃO 100-8. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 10 HZ



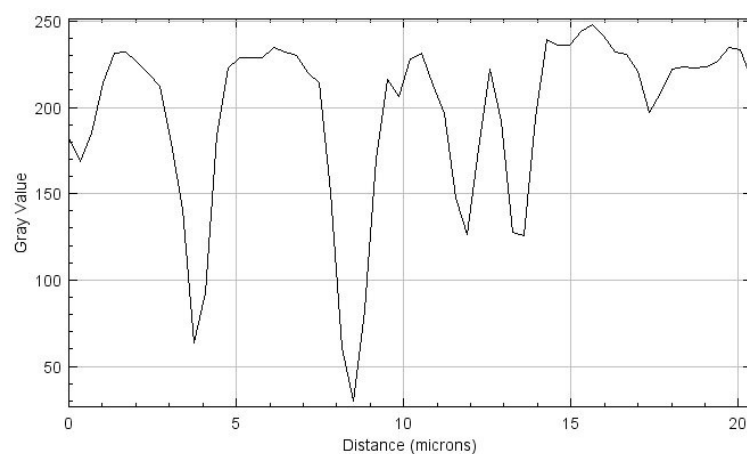
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.27 POSIÇÃO 100. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ



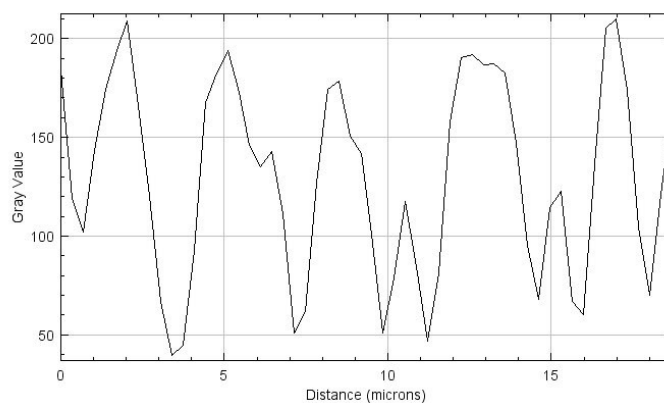
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.28 POSIÇÃO 100-1. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ



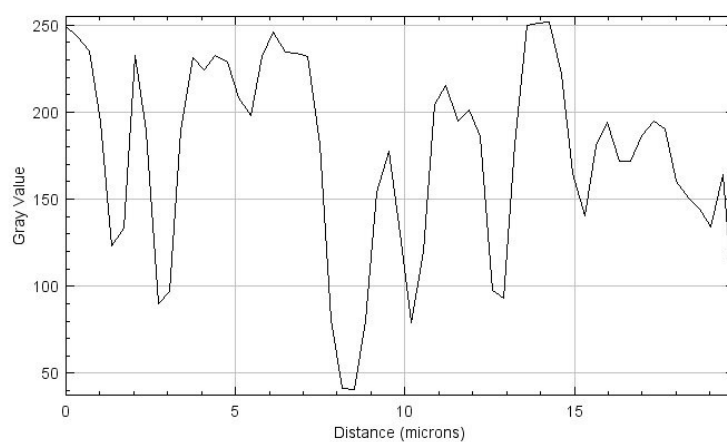
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.29 POSIÇÃO 100-2. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ



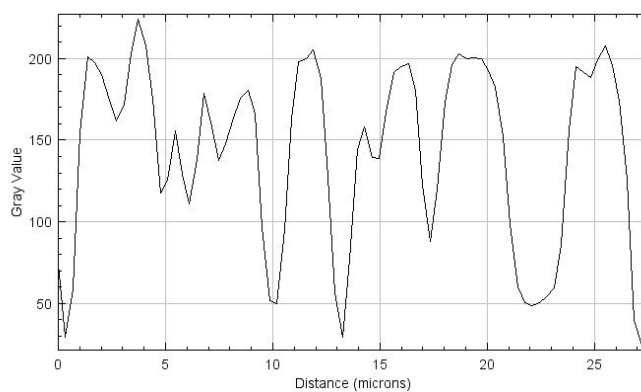
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.30 POSIÇÃO 100-3. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ



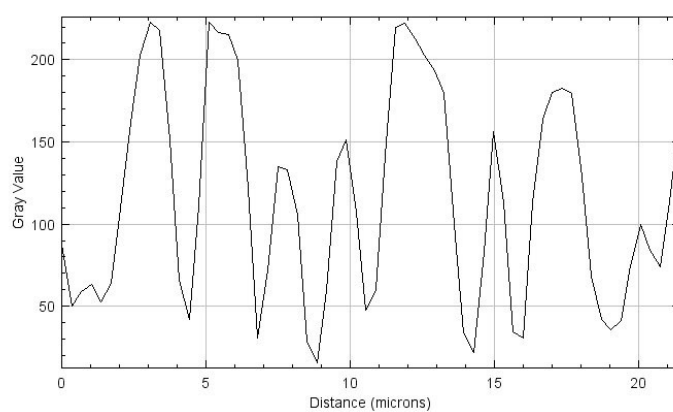
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.31 POSIÇÃO 100-4. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ



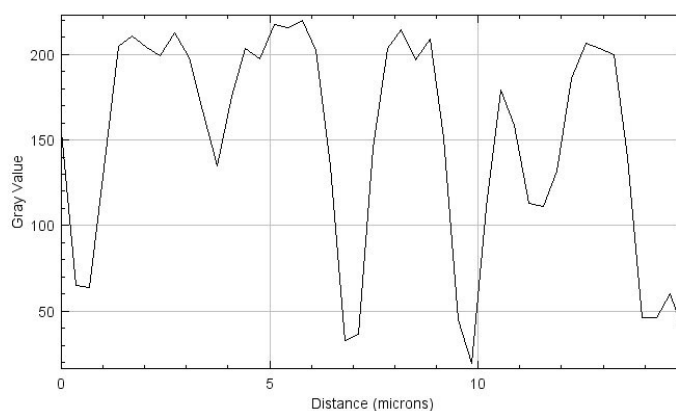
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.32 POSIÇÃO 100-5. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ



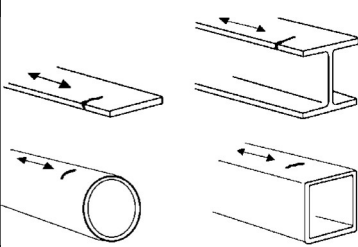
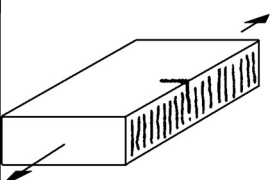
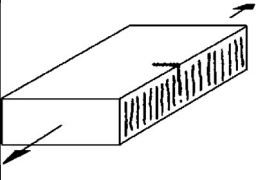
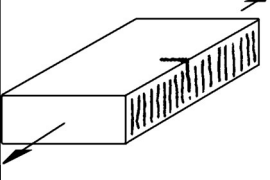
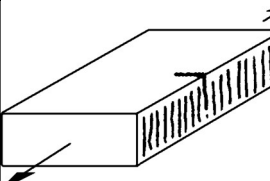
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 1.33 POSIÇÃO 100-6. GTAW- AD – FREQUÊNCIA 15 HZ



Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 2 – TABELA DE SELEÇÃO DOS FATS (A)

No.	Structural Detail	Description (St.= steel)	FAT St.	Requirements and Remarks
100	Unwelded parts of a component			
111		Rolled or extruded products, components with machined edges, seamless hollow sections. $m = 5$ St.: For high strength steels a higher FAT class may be used if verified by test. Al.: AA 5000/6000 alloys AA 7000 alloys	160	No fatigue resistance of any detail to be higher at any number of cycles Sharp edges, surface and rolling flaws to be removed by grinding. Any machining lines or grooves to be parallel to stresses
121		Machine gas cut or sheared material with subsequent dressing, no cracks by inspection, no visible imperfections $m = 3$	140	All visible signs of edge imperfections to be removed. The cut surfaces to be machined or ground, all burrs to be removed. No repair by welding refill Notch effects due to shape of edges shall be considered.
No.	Structural Detail	Description (St.= steel; Al.= aluminium)	FAT St.	Requirements and Remarks
122		Machine thermally cut edges, corners removed, no cracks by inspection $m = 3$	125	Notch effects due to shape of edges shall be considered.
123		Manually thermally cut edges, free from cracks and severe notches $m = 3$	100	Notch effects due to shape of edges shall be considered.
124		Manually thermally cut edges, uncontrolled, no notch deeper than 0.5 mm $m = 3$	80	Notch effects due to shape of edges shall be considered.

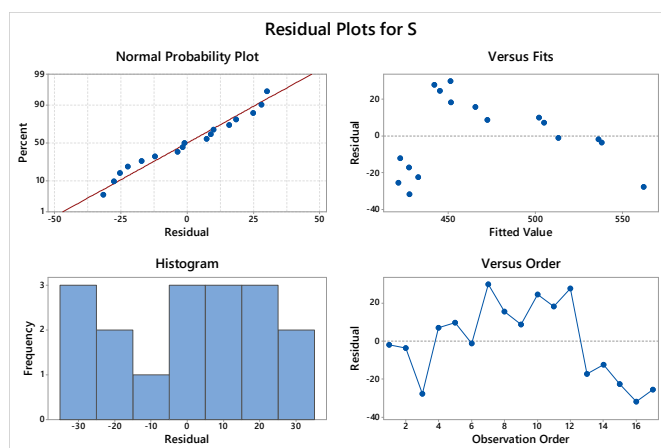
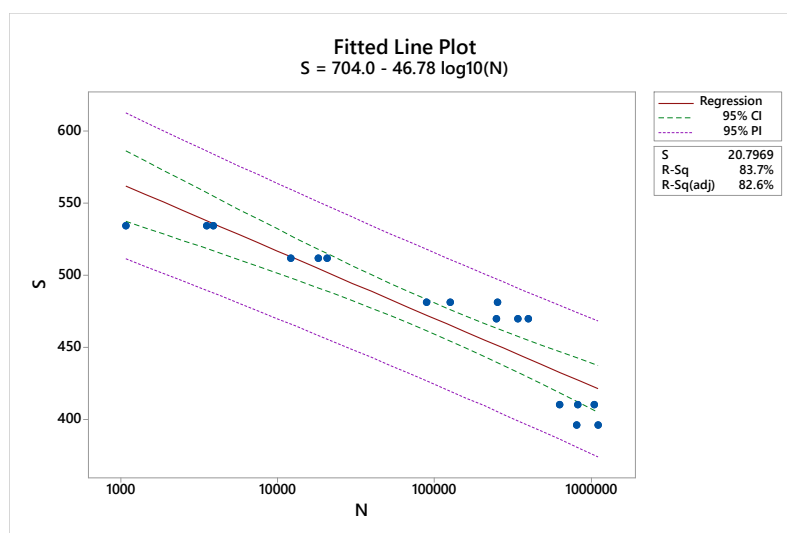
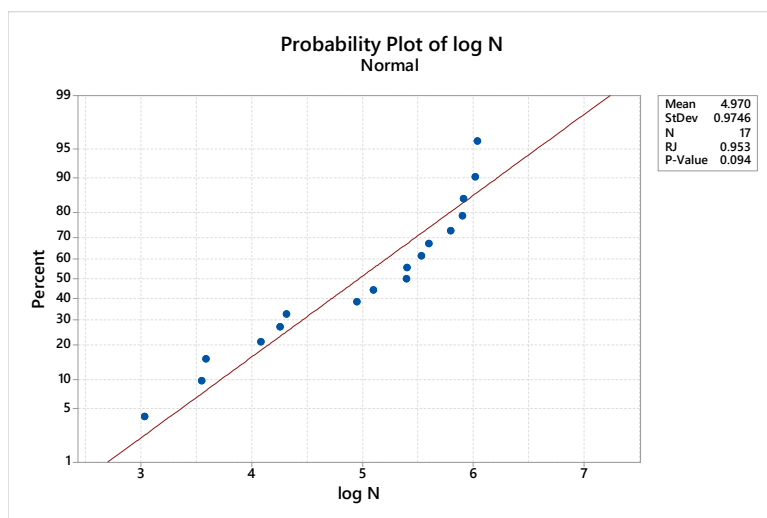
ANEXO 2.1 - TABELA DE SELEÇÃO DOS FATSS (B)

No.	Structural Detail	Description (St.= steel)	FAT St.	Requirements and Remarks
200	Butt welds, transverse loaded			
211		Transverse loaded butt weld (X-groove or V-groove) ground flush to plate, 100% NDT	112	All welds ground flush to surface, grinding parallel to direction of stress. Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed. Plate edges ground flush in direction of stress. Welded from both sides. Misalignment < 5% of plate thickness. Proved free from significant defects by appropriate NDT
212		Transverse butt weld made in shop in flat position, NDT weld reinforcement < 0.1 A thickness	90	Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed. Plate edges ground flush in direction of stress. Welded from both sides. Misalignment < 5% of plate thickness.
213		Transverse butt weld not satisfying conditions of 212, NDT A1.: Butt weld with toe angle #50E Butt welds with toe angle > 50°	80	Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed. Plate edges ground flush in direction of stress. Welded from both sides. Misalignment < 10% of plate thickness.

Fonte: Hobbacher (2008) IIW

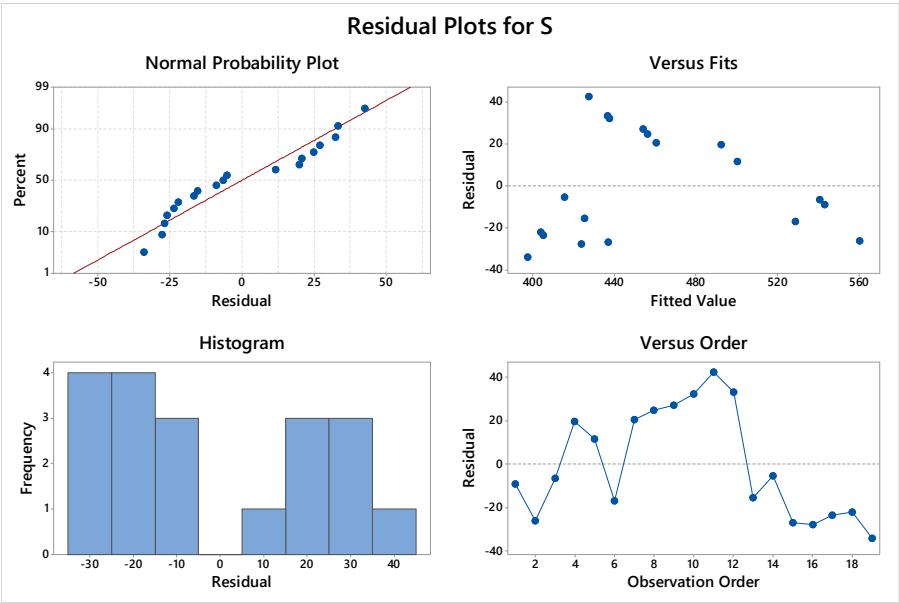
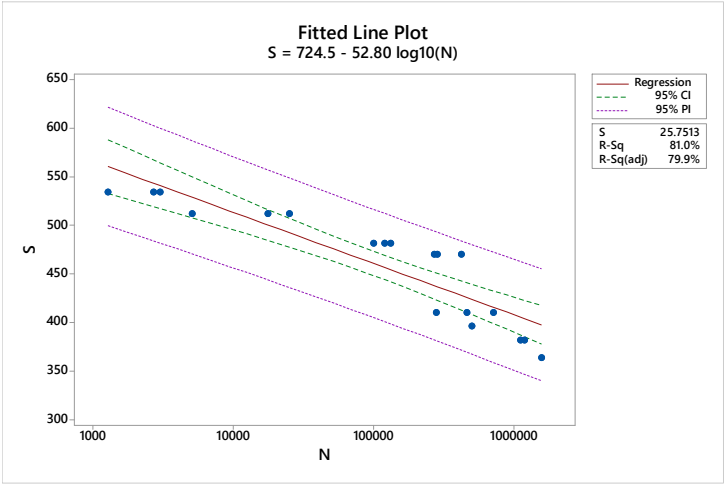
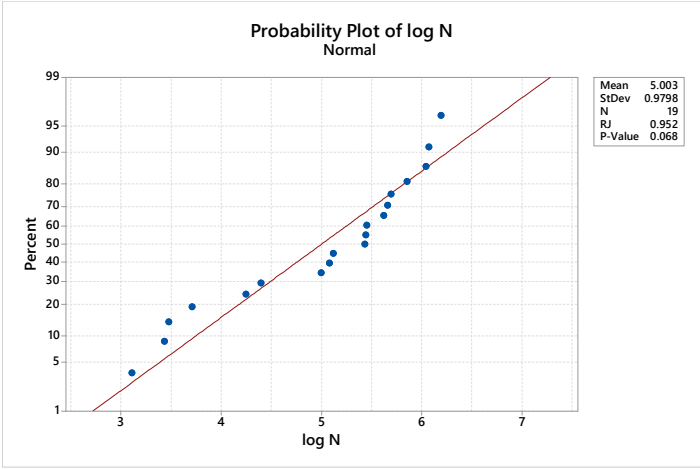
ANEXO 3 – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

ANEXO 3.1 - MATERIAL BASE COM ACABAMENTO LIXADO



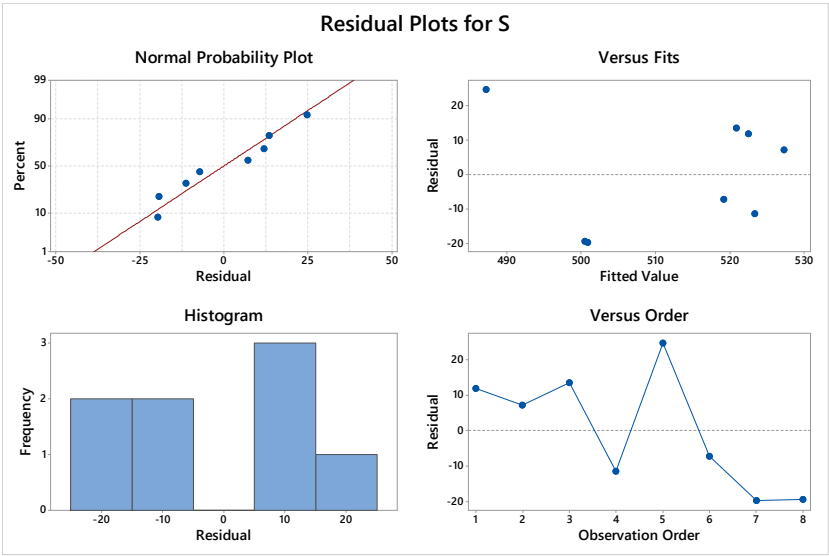
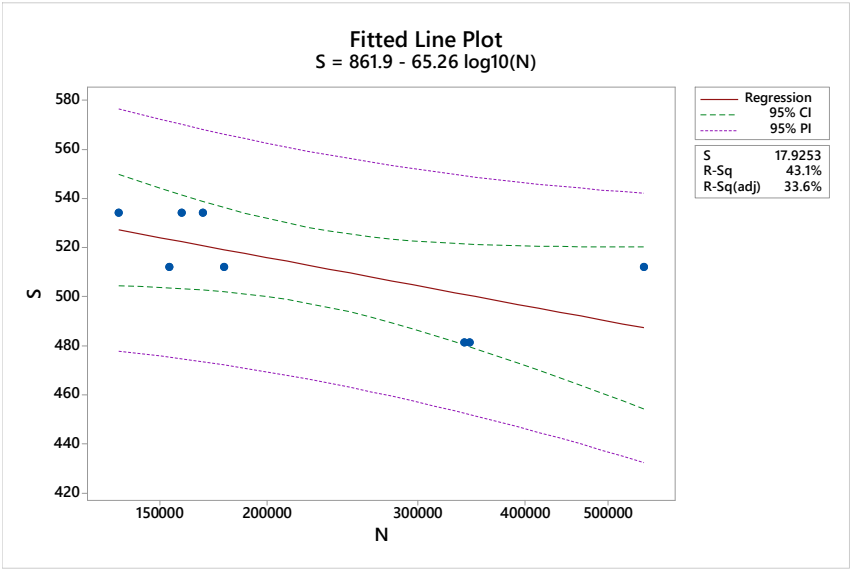
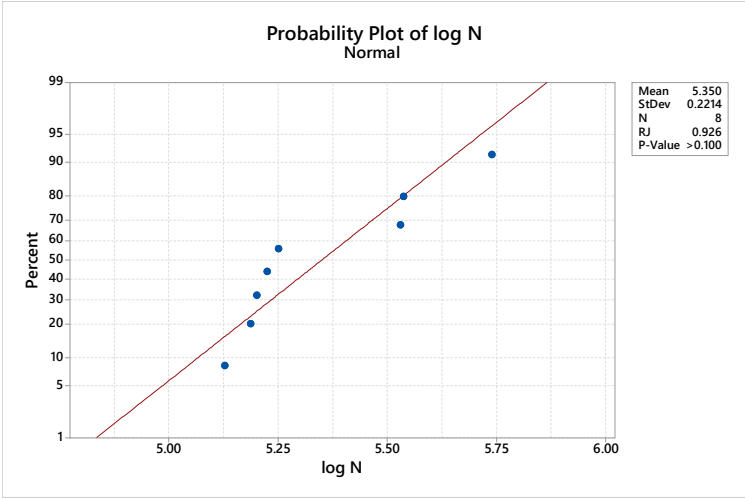
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 3.2 MATERIAL BASE COM ACABAMENTO COMO LAMINADO



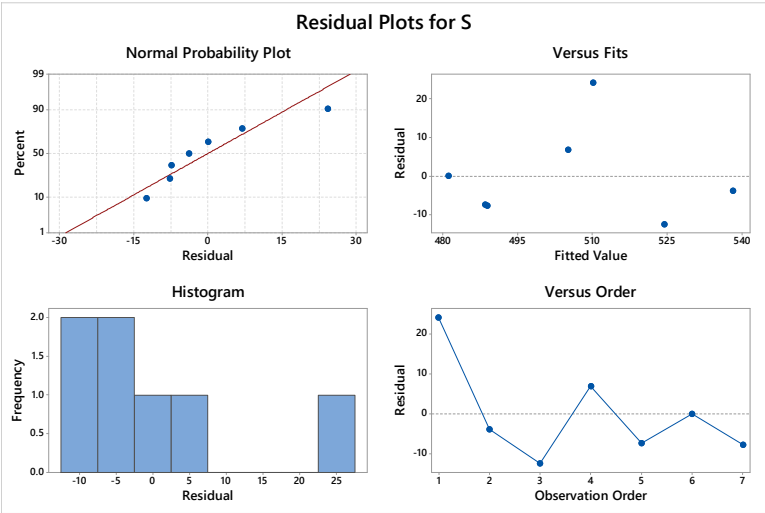
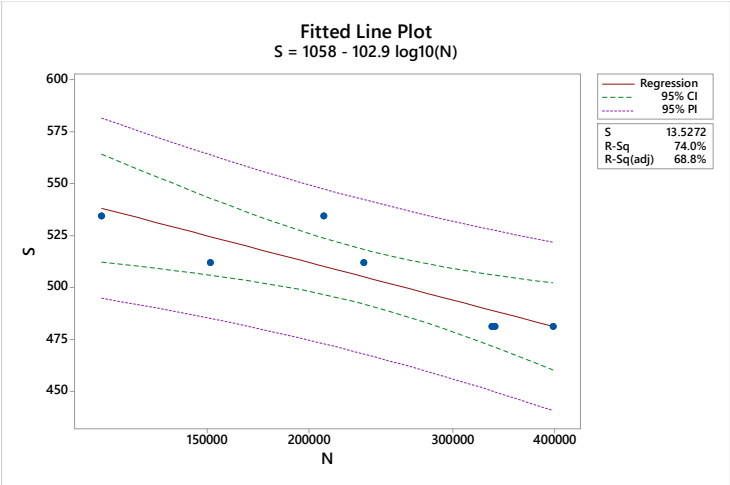
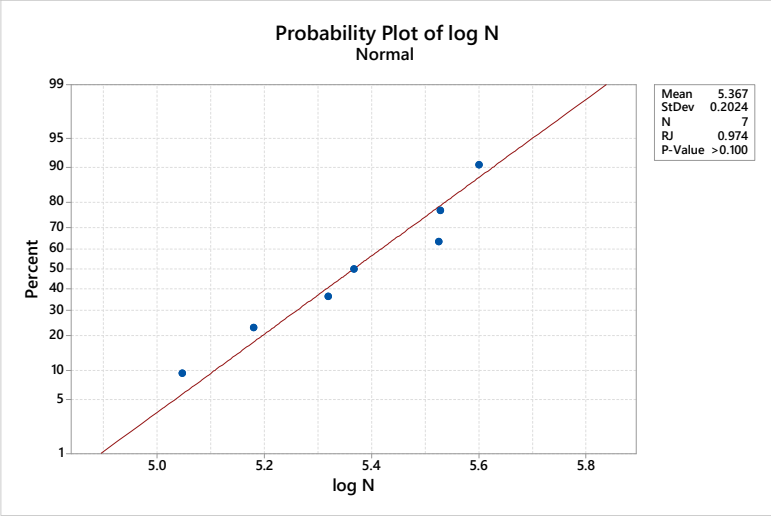
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 3.3 - JUNTA SOLDADA GTAW-DWF COM 0,5 Hz



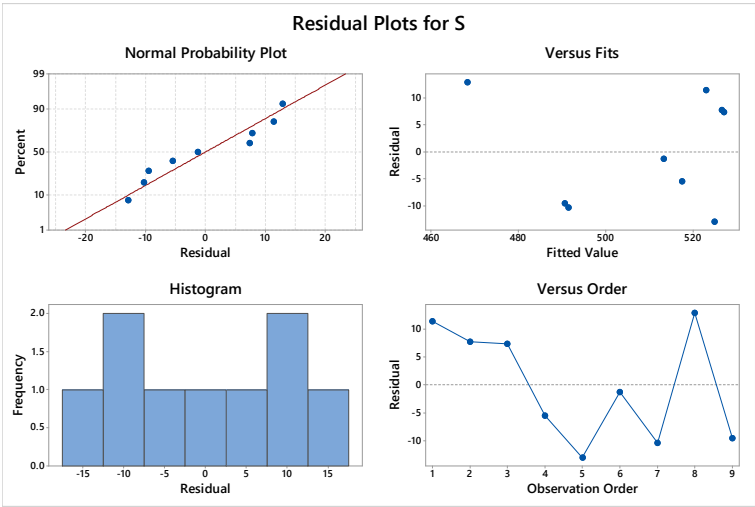
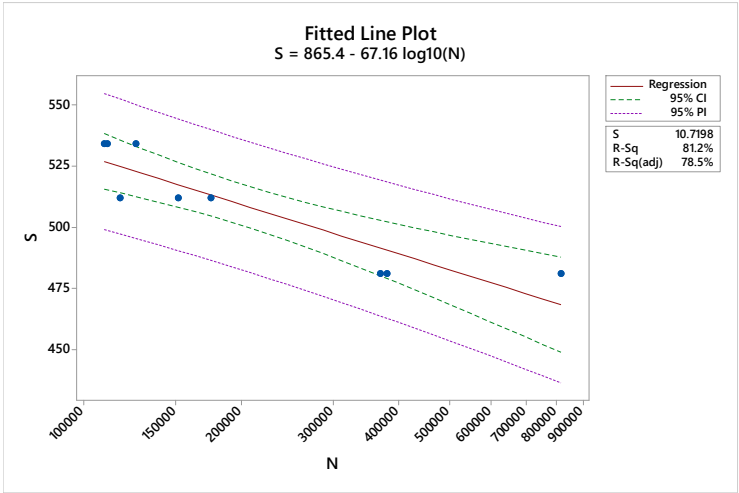
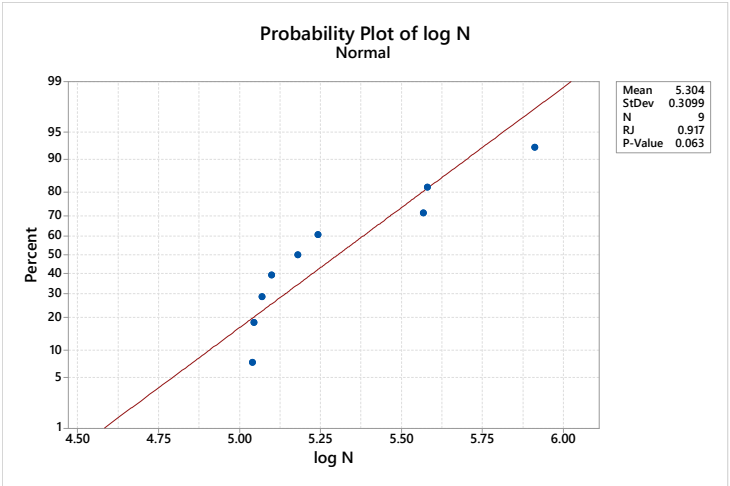
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 3.4 JUNTA SOLDADA GTAW-DWF COM 5,0 Hz



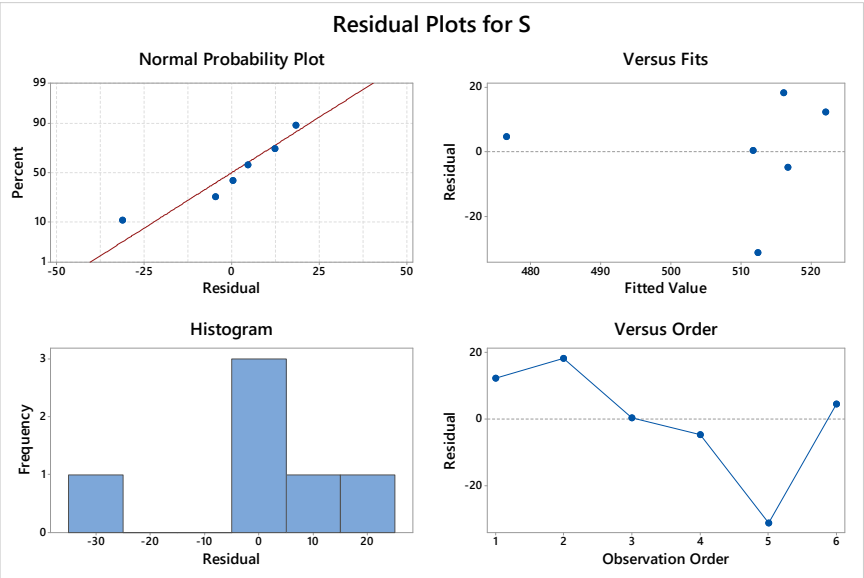
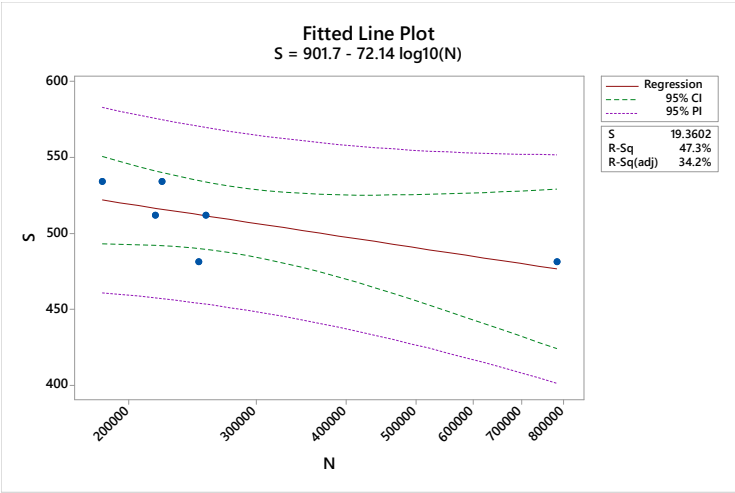
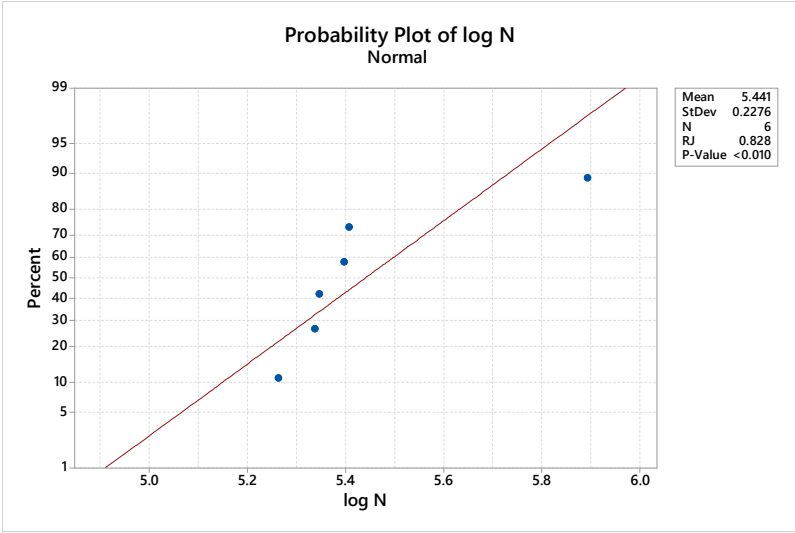
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 3.5 - JUNTA SOLDADA GTAW-DWF COM 10 Hz

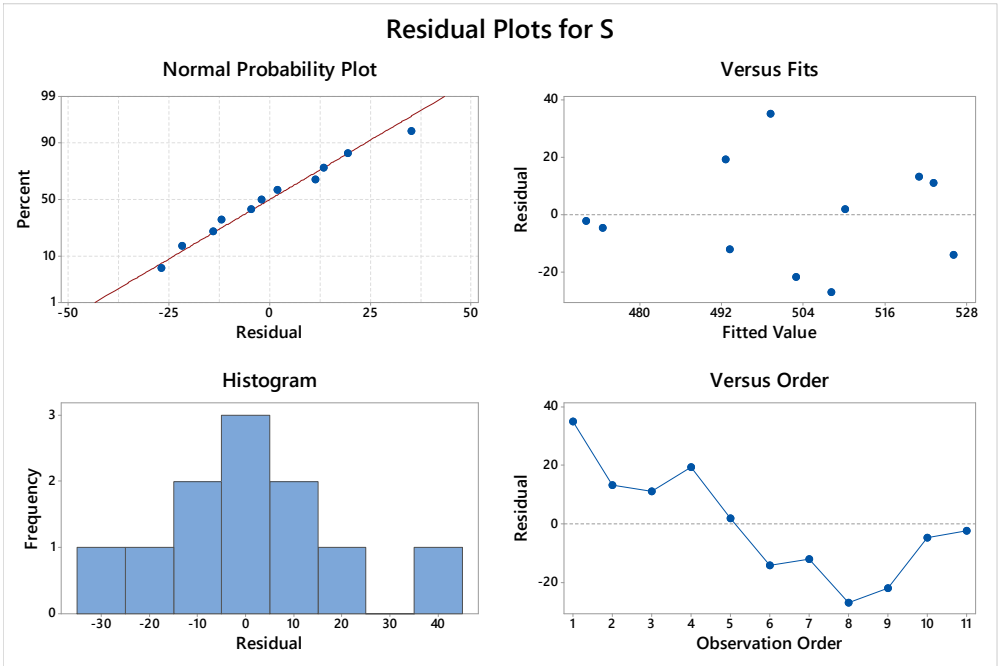
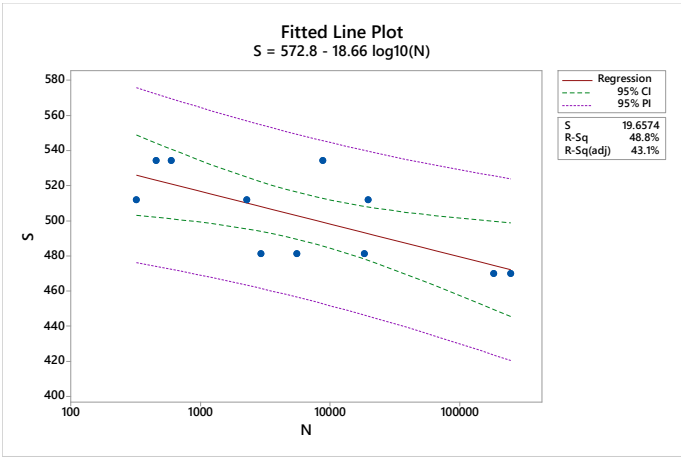
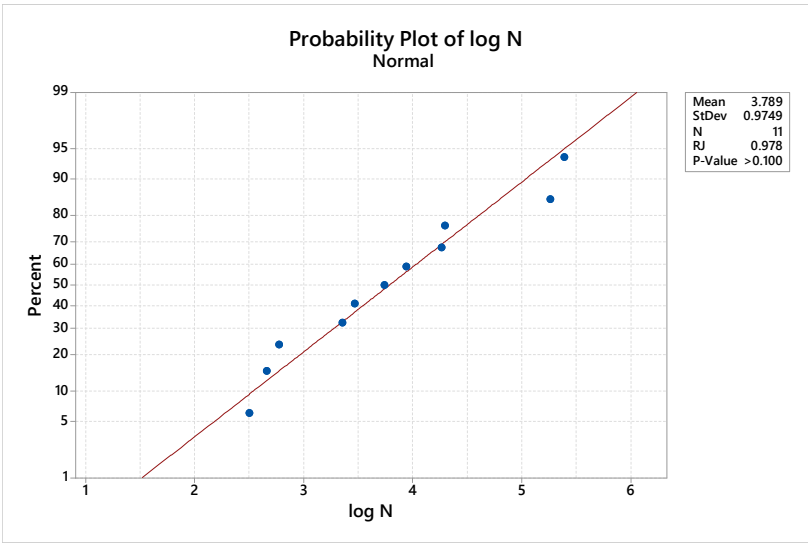


Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 3.6 - JUNTA SOLDADA GTAW-DWF COM 15 Hz



ANEXO 3.7 - TIG CONVENCIONAL C-GTAW ACABAMENTO LIXADO



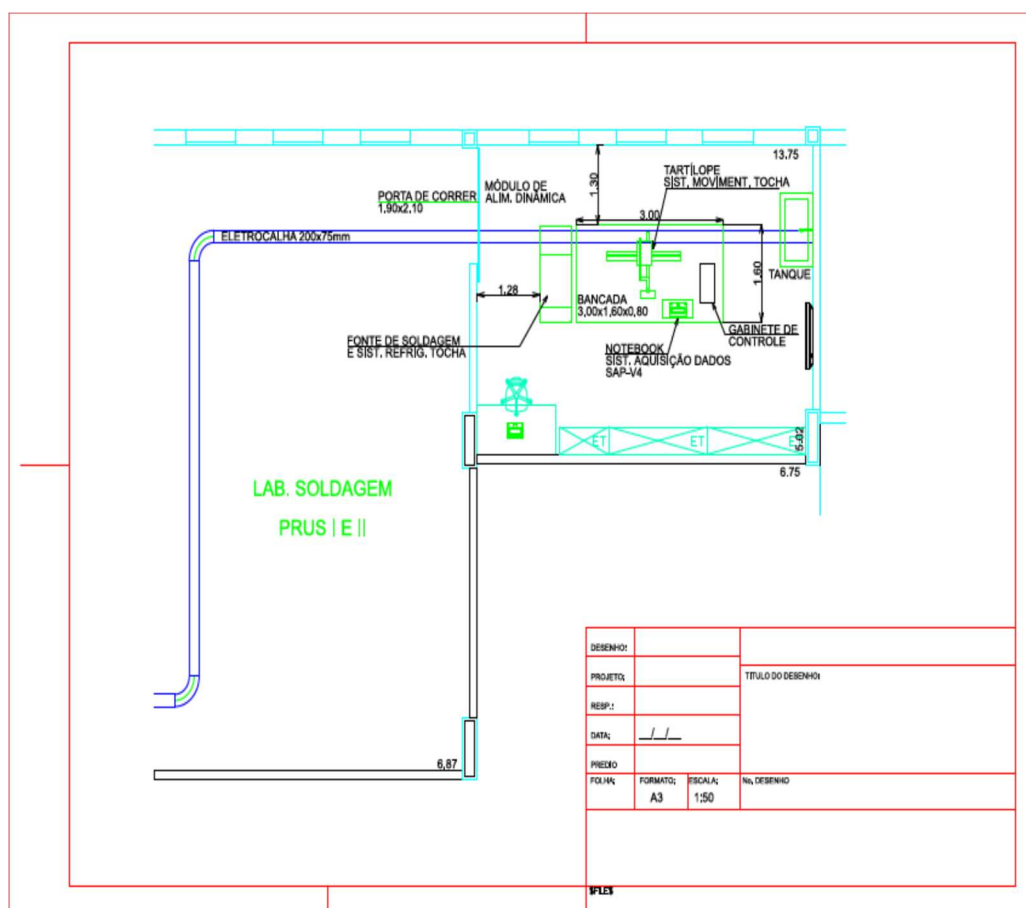
Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 4 – CERTIFICADO DE QUALIDADE DAS CHAPAS A 516 GRAU 70

USIMINAS USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A. USINA INTEGRANTE CÁMARA - IPATINGA-MG-BRASIL SEDE: BELO HORIZONTE - MG - BRASIL R. PROF. JOSÉ VIEIRA DE MENDONÇA, 3011 BARRIO EUGENIO NOGUEIRA - CP 005 - CEP: 31310-250 CNPJ: 06.984.730/0001-82 INSCRIÇÃO ESTADUAL: 313.092021-6120	CERTIFICADO DE INSPEÇÃO INSPECTION CERTIFICATE CHAPA GROSSA DO LDO STEEL PLATE	Cliente-Customer: GALAFER COMÉRCIO E SERVIÇOS EM AÇOS EIRELI EPP Tolerâncias - Tolerances Espessura-Thickness: -0,25/+0,76 mm Largura-Width: 0,00/+180,00 mm Comprimento-Length: -6,00/+22,00 mm	Nota Fiscal Fiscal Invoice: W 002989505 1 Data de Emissão Date of Issue: 13/12/2018 Ordem de Venda Sale Order: 00146597 N° Certificado Certificate N°: 4455783
A Usiminas certifica que as propriedades mecânicas foram determinadas em Dado pelo processo de ensaio mecânico (L.D. - testes de tração e ensaios de impacto) e os resultados estão de acordo com as especificações técnicas aplicáveis. A Usiminas disponibiliza, através do endereço eletrônico http://certificados.usiminas.com.br/0001-dados-certificados/ , a verificação da autenticidade dos certificados de qualidade de seus produtos. Para sua segurança, recomendamos a utilização desse recurso. Usiminas certifies that the products herein described have been produced in Brazil by using the basic oxygen process (L.D. - tested and analyzed according to the applicable technical specifications. Current values available, by using the following website http://certificados.usiminas.com.br/0001-dados-certificados/ , a tool to be used by a customer to verify the authenticity of certificates issued by the customer's sales.		Folha - Sheet = 1	
Quantidade - Steel ASTM-A516-17-70	Dimensões Nominais - Nominal Dimensions 5,30 x 2440 x 6009 mm	Borda - Edge / Oramento - Oiling NÃO APARADA E NÃO OLEADA MILL EDGE AND OILY	Aparência Superficial - Surface Appearance SUPERFÍCIE COMERCIAL COMMERCIAL SURFACE
Placa Volume Slab Package 221 843934295	Peças por Volume Pieces per Package 1	Massa Líquida Net Mass 890	Massa Bruta Gross Mass 899
Massa Líquida Real Real Net Mass = 0,800 t	Massa Bruta Real Real Gross Mass = 0,800 t	Corrida Amostra Heat Sample 247210 52536,25	Peças-Pieces = 1 Volúmenes - 1
Ensaio de Tração - Tensile Test Amostra Pos Dir EE LR EE/LR(%) AL(%) Sample YS TS TS/YS EL 52936125 DB C 388 547 71 24			
Unidade Unit = N/mm² Método de Ensaio Test Method YS = 0,25 EE = 200 mm Larg = 38,1 mm S = Retangular			
Composição Química (%) - Chemical Composition (%) Corrida Análise C Si Mn P S Al Cu Nb V Ti Cr Ni Mo Sn N As H Ca Sb Pb Heat Analysis 247210 P 0,22 0,18 1,31 0,015 0,036 0,028 0,01 0,001 0,002 0,002 0,03 0,01 0,03 0,001 0,0040 0,02 0,0001 0,0003 0,002 0,004			
Condição da Forneira - Supply Condition COMO LAMINADO - AS ROLLED			
Abreviaturas - Abbreviations LE = Limite de Escoamento - YS = Yield Strength AL = Alongamento - El = Elongation C = Transversal Transverse DB = Base do Bordo-Bottom at edge Larg = Largura-Width Diam = Diâmetro-Diameter P = Folha-Leaf			
Abreviaturas - Abbreviations TS = Limite de Resistência - TS = Tensile Strength Dir = Direção Direction Pos = Posição de Amostragem-sampling position BW = Base Média-Gauge Length S = Região Transversal-Transverse Section AL = Alongamento Total-Total Elongation			
0029055			
Certificados que este material foi inspecionado e possui nível de radiação abaixo de 70kBq/kg. We certify that this material has been inspected and the radiation level is less than 70kBq/kg. Conteúdo total de I-131, conforme CERTIFICADO DE CONTEÚDO LOCAL Nº 093-06-00257/2016 DN-02.			
Observações - Remarks PED 004'00 4100 FDS - Fichas de Dados de Segurança do Produto, disponível na Extranet da Usiminas MSDS - Material Safety Data Sheet available at Usiminas Extranet		Assinatura Heiber Luiz Oliveira Ribeiro heiber.oliveira@usiminas.com.br +55 31 3819-3315 DIRETOR GERAL, SUPERINTENDENTE GERAL DE QUALIDADE N.º GERAL DE QUALIDADE CONTROL GENERAL MANAGER	
VISTORADOR SURVEYOR		VISTORADOR SURVEYOR	

ANEXO 5 – PREPARAÇÃO DAS INFRAESTRUTURAS DO LABORATÓRIO DE SOLDAGEM

ANEXO 5.1 – LAYOUT DAS MODIFICAÇÕES DO LABORATÓRIO DE SOLDAGEM DA FATEC-SP



Fonte: Elaborado pelo autor

O Projeto de modernização do laboratório de Soldagem foi financiado pela Fundação de Apoio à Tecnologia – FAT com suporte do Departamento de Soldagem, da Diretoria da Fatec-SP, da Coordenação de Ensino Superior – CESU – e do Centro Paula Souza – CPS.

Os equipamentos foram adquiridos com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - número do processo 2018/18904-7.

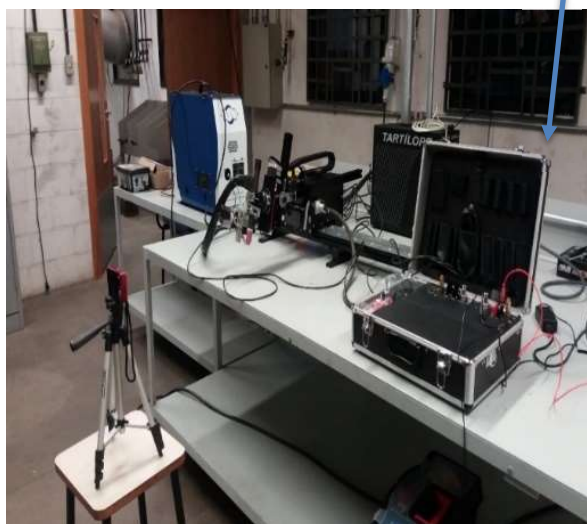
O projeto das bancadas foi otimizado para separar o MAD (Módulo de Alimentação Dinâmica) dos trilhos do Tártilope. Adotou-se bancadas duplas para evitar o risco da transmissão da vibração do módulo de alimentação dinâmica. A Figura 20 apresenta a bancada dupla utilizada para o módulo de alimentação dinâmica.

ANEXO 5.2 – BANCADA DUPLA DA FATEC-SP



Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO 5.3- MONTAGEM DO MAD, TARTILOPE E MALETA SAP NAS BANCADAS DA FATEC-SP



Fonte: Elaborado pelo autor