

**EDMUNDO BENEDETTI FILHO**

**DESEMPENHO MECÂNICO DE LIGAS DE AÇO-  
CARBONO FABRICADAS POR MANUFATURA  
ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA)**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**2024**

**EDMUNDO BENEDETTI FILHO**

**DESEMPENHO MECÂNICO DE LIGAS DE AÇO-CARBONO  
FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A  
ARCO (MADA)**

**Tese** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

**UBERLÂNDIA**

**2024**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B462 Benedetti Filho, Edmundo, 1989-  
2024 DESEMPENHO MECÂNICO DE LIGAS DE AÇOCARBONO FABRICADAS  
POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA)  
[recurso eletrônico] / Edmundo Benedetti Filho. - 2024.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.384>  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Vilarinho, Louriel  
Oliveira, 1975-, (Orient.). II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III.  
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-  
MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



## ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, nº 374, PPGEM				
Data:	27/02/2024	Hora de início:	13:15	Hora de encerramento:	16:30
Matrícula do Discente:	11913EMC002				
Nome do Discente:	Edmundo Benedetti Filho				
Título do Trabalho:	Desempenho Mecânico de Ligas de Aço-carbono Fabricadas via Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Transformação Digital da Fabricação via Manufatura Aditiva por Deposição a Arco				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: José Antonio Esmerio Mazzaferro - UFRGS; Wilian da Silva Labiapari - Aperam; Roberto Mendes Finzi Neto - UFU; Rosemar Batista da Silva - UFU; e Louriel Oliveira Vilarinho - UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/02/2024, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Mendes Finzi Neto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/02/2024, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Antonio Esmerio Mazzaferro, Usuário Externo**, em 27/02/2024, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/02/2024, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wilian da Silva Labiapari, Usuário Externo**, em 27/02/2024, às 16:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5181975** e o código CRC **B00ADA75**.

*À minha esposa, Paula, pelo amor e apoio inabalável, sem os quais, nem em sonho,  
tal empreitada teria se tornado possível.*

*Às minhas filhas, Joana e Teresa, por tão singela e potentemente enfunarem os  
panos da minha nave vida.*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, pela orientação, paciência e amizade;

Ao Programa de Pós-Graduação da FEMEC;

À CAPES, pelo suporte financeiro concedido;

Ao Laprosolda/UFU – Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem e Manufatura Aditiva – pela concessão dos recursos técnicos e materiais;

À minha esposa, Paula Zuchetti, que, por não ter abjurado de palavras e gestos de incentivo e apoio em momento algum, foi meu arrimo durante a condução deste trabalho;

À minha mãe, Gilberta, pelo amor e constantes e entusiásticas motivações;

Ao Prof. Kleber Eduardo Bianchi, pelas discussões científicas e por sua indispensável contribuição neste trabalho;

Aos demais professores do Laprosolda: Prof. Valtair A. Ferraresi, pela amizade e pelos conselhos, tanto pessoais como profissionais; Prof. Américo Scotti, pelos ensinamentos e discussões científicas, sempre muito frutíferas; Prof. Volodmir Ponomarov, pelas anedotas, curiosidades e experiências de vida compartilhadas, e Prof. Ruham Pablo Reis, pelo incentivo e motivação;

Aos amigos e colegas de trabalho, Victor Eduardo Silva Alves (Kaki), Lucas Alves do Nascimento (Cabeça), Douglas Mazer (Batuta), Henrique Nardon Ferraresi (Cleitinho), Daniel Dominices, Leandro João da Silva (Gaúcho) e Diandro Fernandes, pela direta colaboração na execução deste trabalho;

Aos membros da Banca Examinadora, por prontamente se disporem a avaliar este trabalho;

Aos demais amigos e colegas de trabalho pelo incentivo e momentos de descontração.

BENEDETTI FILHO, E. **Desempenho Mecânico de Ligas de Aço-Carbono Fabricadas Por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)**. 2024. 138p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

Num contexto de acelerada evolução tecnológica em termos de fabricação sustentável de componentes mecânicos e estruturais, tem se destacado o processo de Manufatura Aditiva por Deposição à Arco (MADA), que, astuciosamente se aproveitando de processos originalmente concebidos para a união (soldagem) de peças e partes, tão amplamente conhecidos e consolidados, se configura como uma disruptiva técnica de manufatura aditiva que, juntamente com outros pilares, edificam a possível e provável “nova era” da indústria: a quarta revolução industrial, a Indústria 4.0.

Contudo, como todo processo de inovação, há desafios e incertezas inerentes, para os quais devem existir respostas rápidas e assertivas que garantam a tão almejada consolidação como opção alternativa aos processos de fabricação convencionais, que têm se mostrado ineficientes e ambientalmente insustentáveis em um cenário de crise climática que requer ampla atenção da comunidade científica, bem como, das grandes corporações.

Em sendo, portanto, um processo em desenvolvimento baseado na tecnologia, equipamentos e consumíveis utilizados em soldagem, é importante conhecer e entender como se comportam, especialmente os consumíveis, especificamente os metais de adição, sob condições de MADA.

Desta feita, o objetivo do presente trabalho como forma é elucidar questões práticas de aplicação dessa tecnologia, por meio da deposição de pré-formas de geometria simples (paredes) de, aproximadamente, 300 mm de comprimento por 220 mm de altura por 18 mm de largura, utilizando como metais de adição os arames-eletrodos das classes ER70S-3, ER70S-6, G4Si1, ER80S-G, ER80S-B2 e ER110S-1, de 1,20 mm de diâmetro nominal, para que fossem levantadas, avaliadas e analisadas as propriedades mecânicas de tais materiais quando aplicados na construção de componentes via MADA.

Em adição, buscou-se estabelecer uma metodologia que permitisse a comparação do desempenho mecânico destes materiais em relação ao que se tem de dados disponíveis sobre suas respectivas, e bem conhecidas, aplicações em soldagem, bem como a comparação entre eles, em termos de resistência à tração, ao impacto e à fadiga, tendo sido levantados e analisados dados a respeito da integridade estrutural, dureza e metalurgia dos materiais resultantes da deposição por MADA.

De modo geral, a avaliação é de que estes materiais apresentaram comportamento consideravelmente dúctil, superando os requisitos de deformação estabelecidos pelas respectivas normas de fabricação, acompanhado de queda na tensão de escoamento e limite de resistência, tendo, além disso, demonstrado baixo ou inexistente grau de anisotropia. Em concordância, notou-se elevada resistência ao impacto, mostrando alta capacidade de absorção de energia à temperatura de -50 °C.

Somado a isso, tem-se que os valores de dureza superam por demais aqueles encontrados quando ensaiados aços estruturais de composição química similar fabricados por meios convencionais, apresentando aspectos metalúrgicos que, ainda que complexos, demonstraram boa homogeneidade, sem a presença de fases deletérias e/ou indesejáveis, mesmo sob condições termodinâmicas críticas (intensos e sucessivos ciclos térmicos).

Por fim, o material ER110S-1 apresentou resultados surpreendentes nos ensaios de fadiga, havendo comparação possível apenas com aços de matriz predominantemente austeníticas.

**Palavras-chave:** MADA; Manufatura Aditiva por Deposição a Arco; Propriedades Mecânicas; RAQI; Gerenciamento térmico; Indústria 4.0.

BENEDETTI FILHO, E. **Mechanical Properties of Carbon Steel Alloys Manufactured by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)**. 2024. 138p. Doctoral Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

## ABSTRACT

In a context of accelerated technological evolution in terms of sustainable manufacturing of mechanical and structural components, the process of Additive Manufacturing by Arc Deposition (AMAD) has stood out, which, cunningly taking advantage of processes originally designed for joining (welding) and parts, so widely known and consolidated, it is configured as a disruptive additive manufacturing technique that, together with other pillars, builds the possible and probable “new era” of the industry: the fourth industrial revolution, the Industry 4.0.

However, like any innovation process, there are inherent challenges and uncertainties, for which there must be quick and assertive responses that guarantee the much-desired consolidation as an alternative option to conventional manufacturing processes, which have proven to be inefficient and environmentally unsustainable in a scenario of climate crisis that requires broad attention from the scientific community, as well as large corporations.

Therefore, as it is a developing process based on technology, equipment and consumables used in welding, it is important to know and understand how they behave, especially consumables, specifically filler metals, under AMAD conditions.

For that reason, the objective of the present work as a form is to elucidate practical issues regarding the application of this technology, through the deposition of preforms of simple geometry (walls) of approximately 300 mm in length by 220 mm in height by 18 mm in width, using as filler metals the electrode wires of classes ER70S-3, ER70S-6, G4Si1, ER80S-G, ER80S-B2 and ER110S-1, with 1.20 mm nominal diameter, so that they could be evaluated and analyzed the mechanical properties of such materials when applied in the construction of components via AMAD.

In addition, we sought to establish a methodology that would allow the comparison of the mechanical performance of these materials in relation to available data on their respective, well-known, welding applications, as well as the comparison

between them, in terms of resistance to traction, impact and fatigue, with data regarding the structural integrity, hardness and metallurgy of the materials resulting from AMAD deposition being collected and analyzed.

In general, the assessment is that these materials showed considerably ductile behavior, exceeding the deformation requirements established by the respective manufacturing standards, accompanied by a drop in yield stress and resistance limit, having, in addition, demonstrated a low or non-existent degree of anisotropy. In agreement, high impact resistance was noted, showing high energy absorption capacity, even at very low temperatures (-50 °C).

Added to this, the hardness values far exceed those found when testing structural steels of similar chemical composition manufactured by conventional means, presenting metallurgical aspects that, although complex, demonstrated good homogeneity, without the presence of deleterious phases and /or undesirable, even under critical thermodynamic conditions (intense and successive thermal cycles).

Finally, the ER110S-1 material showed surprising results in fatigue tests, with comparison only possible with steels with predominantly austenitic structure.

**Keywords:** AMAD; Additive Manufacturing by Arc Deposition; Mechanical properties; NIAC; Thermal management; Industry 4.0.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Seis áreas possíveis para ganhos em sustentabilidade na utilização de MA (retirado de Despeisse et al., 2017).....	2
Figura 2.1 – Deposição de peça robusta por MADA (Laprosolda-UFU, 2022).....	5
Figura 2.2 – Peça como depositada ( <i>as printed</i> ) por MADA (à esquerda) e após as operações de acabamento (à direita) (modificado de Avianik, 2019) .....	6
Figura 2.3 – Incidência de porosidade no passe mais externo da peça (Laprosolda-UFU, 2022) .....	8
Figura 2.4 – Aparecimento de defeitos na peça após as operações de usinagem de acabamento (Laprosolda, 2022) .....	8
Figura 2.5 – Representação das dimensões das larguras efetiva e largura total associadas à ondulação das superfícies laterais em MADA.....	9
Figura 2.6 – Exemplo de falta de molhabilidade durante deposição de peças (Laprosolda-UFU, 2023) .....	11
Figura 2.7 – Ilustração esquemática do conceito de RAQI em comparação com as abordagens de gerenciamento térmico natural e passivo (a dimensão das setas é proporcional à intensidade da dissipação de calor), onde $Q_{cond}$ = dissipador de calor por condução, $Q_{conv}$ = dissipador de calor por convecção e $Q_{rad}$ = dissipador de calor por radiação (modificado de Silva et al., 2020).....	12
Figura 3.1 - Representação esquemática da placa de teste mostrando a localização e orientação dos corpos de prova na placa de testes (retirado de AWS A5.18/2005) .....	21
Figura 3.2 - Esquema da pré-forma depositada mostrando a orientação de extração dos corpos de prova .....	22
Figura 3.3 - Geometria final dos corpos de prova de fadiga.....	23
Figura 3.4 - Distribuição dos corpos de prova de fadiga (as cotas realçadas em preto representam as prováveis dimensões da peça extraída da pré-forma original, a ser direcionada para o corte por eletroerosão a fio, resultando na extração de nove amostras).....	24

Figura 3.5 - Diagramação das amostras e suas respectivas dimensões (à esquerda) e definição das dimensões mínimas finais da pré-forma padrão (à direita) .....	25
Figura 3.6 - Esquema ilustrando a vista superior da placa de teste, apresentando o padrão de oscilação da tocha (setas tracejadas), o aspecto do depósito e suas respectivas larguras total ( $L_T$ ) e efetiva ( $L_E$ ) .....	27
Figura 3.7 - Exemplo de parede depositada na etapa de testes preliminares; vista superior (acima) e frontal (abaixo) .....	29
Figura 3.8 - Variáveis geométricas abordadas nos testes preliminares .....	31
Figura 3.9 - Esquema representativo do processo de deposição de uma parede aplicando gerenciamento térmico por RAQI (retirado de SILVA, 2019) .....	32
Figura 3.10 - Visão geral do equipamento utilizado para deposição das pré-formas, com destaque para o sensor de nível de água acoplado ao pescoço da tocha (canto inferior esquerdo) .....	33
Figura 3.11 - Pré-forma após operações de usinagem de pré-acabamento .....	34
Figura 3.12 – Parede após ser submetida à operação de cortes dos corpos de prova por jato d'água (amostras de fadiga à esquerda e demais amostras à direita) .....	35
Figura 4.1 - Foto ilustrativa da aplicação da técnica RAQI .....	36
Figura 4.2 - Pré-forma depositada com o arame-eletrodo 2 (ER70S-6) com o substrato preso à base da cuba .....	37
Figura 4.3 - Pré-forma depositada com o arame-eletrodo 2 (ER70S-6) após limpeza por escovamento .....	37
Figura 4.4 - Oscilograma de corrente e tensão da 46 <sup>a</sup> camada (acima) e gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) referentes à deposição da pré-forma 3 com o arame-eletrodo 2 (ER70S-6) .....	39
Figura 4.5 – Registros das extremidades das paredes 1 (à esquerda) e 2 (à direita), depositadas com os arames eletrodos ER80S-G e ER80S-B2, respectivamente, .....	41
Figura 4.6 – Gráficos de acompanhamento dos parâmetros elétricos de deposição das paredes 1 (acima) e 2 (abaixo), depositadas com os arames-eletrodos ER80S-G e ER80S-B2, respectivamente .....	42

Figura 4.7 - Esquema representando deposição cujo incremento vertical do sistema de movimentação é maior do que o crescimento real da pré-forma .....	44
Figura 4.8 - Esquema representando deposição cujo incremento vertical do sistema de movimentação é menor do que o crescimento real da pré-forma .....	45
Figura 4.9 – Gráficos comparativos entre as composições químicas medidas nos depósitos e a fornecida pelo fabricante .....	49
Figura 4.10 – Amostra submetida ao ensaio de tração .....	52
Figura 4.11 - Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 3, depositada com o arame-eletrodo 3 (ER70S-6).....	54
Figura 4.12 – Resultados comparativos de tensão de escoamento dos materiais depositados.....	55
Figura 4.13 – Resultados comparativos de limite de resistência dos materiais depositados.....	56
Figura 4.14 – Resultados comparativos de alongamento dos materiais depositados .....	57
Figura 4.15 – ANOVA da influência do material de deposição nas respostas de tensão de escoamento ( $S_y$ ), limite de resistência ( $S_u$ ) e alongamento ( $e$ ) .....	59
Figura 4.16 - ANOVA da influência da orientação dos corpos de prova (verticais-v ou horizontais-h) nas respostas de tensão de escoamento ( $S_y$ ), limite de resistência ( $S_u$ ) e alongamento ( $e$ ) .....	60
Figura 4.17 – Corpos de prova horizontal (acima) e vertical (abaixo) extraídos da parede 12 depositada com arame-eletrodo ER80S-B2 .....	61
Figura 4.18 – ANOVA da interação entre as variáveis de entrada (Material e Orientação) nas respostas de tensão de escoamento ( $S_y$ ), limite de resistência ( $S_u$ ) e alongamento ( $e$ ) .....	62
Figura 4.19 - Amostra submetida ao ensaio de dobramento.....	64
Figura 4.20 - Marcas da trajetória de deposição evidenciadas na face inferior do CP 4 da parede 7, depositada com arame-eletrodo 5 (ER80S-B2). .....	65
Figura 4.21 - Aspecto da fratura ocorrida durante ensaio de dobramento no CP4, extraído da pré-forma 4, depositada com arame-eletrodo 3 (G4Si1).....	65

Figura 4.22 – Abertura lateral a partir da borda da amostra (próxima da extremidade da parede) ocorrida durante ensaio de dobramento no CP4, extraído da pré-forma 5, depositada com arame-eletrodo 6 (ER110S-1) .....	66
Figura 4.23 - Representação gráfica da orientação de fabricação dos entalhes, onde T representa o topo das amostras (plano xy), F, a face (xz) e L, a lateral (yz).....	67
Figura 4.24 – Resultados comparativos de resistência à fratura dos materiais depositados.....	70
Figura 4.25 - Identificação das regiões de análises microestruturais .....	72
Figura 4.26 – Macrografia do topo da parede 3, depositada com arame-eletrodo ER70S-6, onde são indicadas as regiões das ZAC's (mais escuras), ZR's (mais claras) e ZF (topo da pré-forma).....	73
Figura 4.27 – Resultados comparativos de microdureza dos materiais depositados	75
Figura 4.28 - ANOVA da influência do material de deposição nas respostas dos ensaios de microdureza .....	77
Figura 4.29 – ANOVA da influência dos planos (frontal e lateral) nas respostas dos ensaios de microdureza .....	77
Figura 4.30 – ANOVA da influência da região (ZR e ZAC) nas respostas dos ensaios de microdureza .....	78
Figura 4.31 – Vista isométrica das micrografias realizadas nos planos frontal, lateral e superior da (aumento de 50x) de amostras retiradas da pré-forma 7, depositada com o arame-eletrodo ER80S-B2.....	79
Figura 4.32 - Macrografias das amostras de fadiga extraídas da pré-forma 5, depositada com o arame-eletrodo ER110S-1 .....	87
Figura 4.33 - Identificação da trinca via US Phased Array (acima) e sua medição via MO (abaixo) do CP 5.5, extraído da pré-forma 5, depositada com ER110S-1 .....	88
Figura 4.34 - Identificação da trinca via US Phased Array (acima) e sua medição via MO (abaixo) do CP 5.8, extraído da pré-forma 5, depositada com ER110S-1 .....	88
Figura 4.35 – Registros em série do instante no qual nucleia-se a trinca (noroeste) até o rompimento total (sudeste) do CP 5.3.....	89

- Figura 4.36 – Face da fratura de do CP 5.2 submetido a baixo nível de tensão de teste .....90
- Figura 4.37 – Face da fratura do CP 5.3 submetido a alto nível de tensão de teste .91
- Figura 4.38 – Diagrama SxN obtido após ensaios (pré-forma 5; ER110S-1)..... 92
- Figura A.1 – Vista frontal (acima) e vista em perspectiva (abaixo) da pré-forma 3, depositada com o arame eletrodo 2 (ER70S-6)
- Figura A.2 – Vista frontal (acima) e vista em perspectiva (abaixo) da pré-forma 4, depositada com o arame eletrodo 3 (G4Si1)
- Figura A.3 – Vista frontal (acima) e vista em perspectiva (abaixo) da pré-forma 5, depositada com o arame eletrodo 6 (ER110S-1)
- Figura A.4 – Vista frontal (acima) e vista em perspectiva (abaixo) da pré-forma 6, depositada com o arame eletrodo 4 (ER80S-G)
- Figura A.5 – Único registro feito da pré-forma 7, depositada com o arame eletrodo 5 (ER80S-B2) após a ocorrência de sucessivas intercorrências durante sua deposição
- Figura A.6 – Vista frontal (acima) e vista em perspectiva (abaixo) da pré-forma 8, depositada com o arame eletrodo 1 (ER70S-3)
- Figura A.7 – Vista frontal (acima) e vista em perspectiva (abaixo) da pré-forma 9, depositada com o arame eletrodo 5 (ER80S-B2)
- Figura A.8 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 35ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 1 com o arame-eletrodo 4 (ER80S-G)
- Figura A.9 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 39ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 2 com o arame-eletrodo 5 (ER80S-B2)
- Figura A.10 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 46ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 3 com o arame-eletrodo 2 (ER70S-6)
- Figura A.11 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 44ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 4 com o arame-eletrodo 3 (G4Si1)

- Figura A.12 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 42ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 5 com o arame-eletrodo 6 (ER110S-1)
- Figura A.13 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 42ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 6 com o arame-eletrodo 4 (ER80S-G)
- Figura A.14 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 39ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 7 com o arame-eletrodo 5 (ER80S-B2)
- Figura A.15 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 45ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 8 com o arame-eletrodo 1 (ER70S-3)
- Figura A.16 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 42ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 9 com o arame-eletrodo 5 (ER80S-B2)
- Figura A.17 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 1, depositada com o arame-eletrodo 2 (ER80S-G)
- Figura A.18 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 2, depositada com o arame-eletrodo 3 (ER80S-B2)
- Figura A.19 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 3, depositada com o arame-eletrodo 1 (ER70S-6)
- Figura A.20 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 4, depositada com o arame-eletrodo 1 (G4Si1)
- Figura A.21 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 5, depositada com o arame-eletrodo 4 (ER110S-1)
- Figura A.22 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 6, depositada com o arame-eletrodo 2 (ER80S-G)

- Figura A.23 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 9, depositada com o arame-eletrodo 3 (ER80S-B2)
- Figura A.24 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 10, depositada com o arame-eletrodo 6 (ER70S-3)
- Figura A.25 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 12, depositada com o arame-eletrodo 3 (ER80S-B2)
- Figura A.26 – Amostras Charpy da pré-forma 1, depositada com arame-eletrodo ER80S-G (horizontal à esquerda e vertical à direita)
- Figura A.27 – Amostras Charpy da pré-forma 2, depositada com arame-eletrodo ER80S-B2 (horizontal à esquerda e vertical à direita)
- Figura A.28 – Amostras Charpy da pré-forma 3, depositada com arame-eletrodo ER70S-6 (horizontal à esquerda e vertical à direita)
- Figura A.29 – Amostras Charpy da pré-forma 4, depositada com arame-eletrodo G4Si1 (horizontal à esquerda e vertical à direita)
- Figura A.30 – Amostras Charpy da pré-forma 5, depositada com arame-eletrodo ER110S-1 (horizontal à esquerda e vertical à direita)
- Figura A.31 – Amostras Charpy da pré-forma 6, depositada com arame-eletrodo ER80S-G (horizontal à esquerda e vertical à direita)
- Figura A.32 – Amostras Charpy da pré-forma 9, depositada com arame-eletrodo ER80S-B2 (horizontais à esquerda e verticais à direita)
- Figura A.33 – CP 5.1 rompido (médio ciclo:  $\Delta\sigma = 529,8$  MPa  $\rightarrow$  181.588 ciclos)
- Figura A.34 – CP 5.2 rompido (tentativa de *run out*):  $\Delta\sigma = 351,7$  MPa  $\rightarrow$  771.395 ciclos)
- Figura A.35 – CP 5.3 rompido (baixo ciclo:  $\Delta\sigma = 585,0$  MPa  $\rightarrow$  80.797 ciclos)
- Figura A.36 – CP 5.4 rompido (médio ciclo:  $\Delta\sigma = 528,8$  MPa  $\rightarrow$  207.013 ciclos)
- Figura A.37 – CP 5.6 rompido (médio ciclo:  $\Delta\sigma = 527,7$  MPa  $\rightarrow$  242.087 ciclos)
- Figura A.38 – CP 5.7 rompido (alto ciclo:  $\Delta\sigma = 419,9$  MPa  $\rightarrow$  777.377 ciclos)
- Figura A.39 – CP 5.9 rompido (alto ciclo:  $\Delta\sigma = 419,6$  MPa  $\rightarrow$  1.110.538 ciclos)
- Figura A.40 – CP 5.10 rompido (alto ciclo:  $\Delta\sigma = 420,2$  MPa  $\rightarrow$  1.100.136 ciclos)
- Figura A.41 – CP 5.11 rompido (baixo ciclo:  $\Delta\sigma = 585,5$  MPa  $\rightarrow$  78.664 ciclos)

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Materiais disponibilizados .....	18
Tabela 3.2 - Limites de composição química dos metais de adição.....	19
Tabela 3.3 - Parâmetros de processo, parâmetros calculados, planejamento de trajetória e dimensional obtido .....	30
Tabela 4.1 - Dimensional e demais características das paredes definitivas .....	38
Tabela 4.2 – Composições químicas dos depósitos medidas via analisador químico portátil XRF Vanta Olympus* .....	47
Tabela 4.3 – Composições químicas dos arames-eletrodos fornecidas via certificado de composição química pelo fabricante .....	48
Tabela 4.4 - Resultados obtidos nos ensaios de tração <sup>(a,b)</sup> .....	53
Tabela 4.5 - Resultados obtidos nos ensaios Charpy .....	69
Tabela 4.6 - Resultados das medições de microdureza.....	74
Tabela 4.7 - Micrografias (aumento de 500x) das regiões submetidas aos ensaios de microdureza da pré-forma 3, depositada com arame-eletrodo ER70S-6 .....	81
Tabela 4.8 – Micrografias (aumento de 500x) das regiões submetidas aos ensaios de microdureza da pré-forma 4, depositada com o arame-eletrodo G4Si1 .....	82
Tabela 4.9 – Micrografias (aumento de 500x) das regiões submetidas aos ensaios de microdureza da pré-forma 6, depositada com o arame-eletrodo ER80S-G.....	83
Tabela 4.10 – Micrografias (aumento de 500x) das regiões submetidas aos ensaios de microdureza da pré-forma 7, depositada com o arame-eletrodo ER80S-B2 .....	84
Tabela 4.11 – Micrografias (aumento de 500x) das regiões submetidas aos ensaios de microdureza da pré-forma 5, depositada com o arame-eletrodo ER110S-1 .....	85
Tabela 4.12 - Informações acerca dos ensaios de fadiga (pré-forma 5; ER110S-1).91	
Tabela A.1 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 1, depositada com o arame-eletrodo 4 (ER80S-G)	

Tabela A.2 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 2, depositada com o arame-eletrodo 5 (ER80S-B2)

Tabela A.3 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 3, depositada com o arame-eletrodo 2 (ER70S-6)

Tabela A.4 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 4, depositada com o arame-eletrodo 3 (G4Si1)

Tabela A.5 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 5, depositada com o arame-eletrodo 6 (ER110S-1)

Tabela A.6 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 6, depositada com o arame-eletrodo 4 (ER80S-G)

Tabela A.7 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 8, depositada com o arame-eletrodo 1 (ER70S-3)

Tabela A.8 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 9, depositada com o arame-eletrodo 5 (ER80S-B2)

Tabela A.9 – Superfícies de fratura das amostras retiradas da parede 5 (ER110S-1)

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

A	Amplitude de Oscilação da Tocha
AL.I	Ajuste de Comprimento de Arco da Fonte de Soldagem
ANOVA	Análise de Variância
Ar	Argônio
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
C	Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CP	Corpo de Prova
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DBCP	Distância Bico de Contato-Peça
e	Elongamento
EEF	Eletroerosão a Fio
Fe	Ferro
F <sub>max</sub>	Força de Tração Máxima dos Ensaios de Fadiga
F <sub>min</sub>	Força de Tração Mínima dos Ensaios de Fadiga
GMA	<i>Gas Metal Arc</i>
GMA-DED	<i>Gas Metal Arc – Directed Energy Deposition</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTA	<i>Gas Tungsten Arc</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LE	Largura Efetiva da Pré-Forma
Laprosolda	Centro para Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação em Processos de Soldagem e Manufatura Aditiva
L <sub>T</sub>	Largura Total da Pré-Forma
m	Inclinação da Curva SxN
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
Mn	Manganês

Mo	Molibdênio
N	Número de Ciclos nos Ensaios de Fadiga
Ni	Níquel
P	Fósforo
PA	<i>Plasma Arc</i>
PTA	<i>Plasma Transferred Arc</i>
RAQI	Resfriamento Ativo por Quase-Imersão
RMS	<i>Root Mean Square</i>
S	Enxofre
Si	Silício
Sn	Estanho
Su	Limite de Resistência
S x N	Curva de Tensão versus Número de Ciclos (Fadiga)
Sy	Tensão de Escoamento
T <sub>D</sub>	Taxa de Deposição
T <sub>F</sub>	Taxa de Fusão
Ti	Titânio
t <sub>p</sub>	Tempo de Parada na Oscilação da Tocha
t <sub>T/camada</sub>	Tempo Total de Deposição por Camada
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
US	Ultrassom
V	Vanádio
V	Tensão do Arco
V <sub>A</sub>	Velocidade de Alimentação do Arame
V <sub>D</sub>	Velocidade de Deposição
V <sub>De</sub>	Velocidade de Deposição Efetiva
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>
ZAC	Zona Afetada Pelo Calor
ZF	Zona Fundida
ZR	Zona Refundida
R	Razão de Carga dos Ensaios de Fadiga
$\Delta\sigma_1$	Intervalo de Alta Tensão e Baixo Número de Ciclos dos Ensaios de Fadiga
$\Delta\sigma_2$	Intervalo de Média Tensão e Médio Número de Ciclos dos Ensaios de Fadiga

$\Delta\sigma_3$	Intervalo de Baixa Tensão e Alto Número de Ciclos dos Ensaios de Fadiga
$\Delta\sigma_4$	Intervalo de Tensão <i>run-out</i> e Número Infinito de Ciclos dos Ensaios de Fadiga
$\Delta\sigma_{2e6}$	Faixa de Tensão correspondente à Vida de 2 milhões de Ciclos (vida infinita)
$\varepsilon$	Elongamento
$\lambda/2$	Passo da Oscilação da Tocha
$\eta_D$	Rendimento de Deposição
$\sigma_{max}$	Tensão de Tração Máxima dos Ensaios de Fadiga
$\sigma_{min}$	Tensão de Tração Mínima dos Ensaios de Fadiga
$\sigma_u$	Limite de Resistência
$\sigma_y$	Tensão de Escoamento

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS .....	xix
SUMÁRIO.....	xxii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. Objetivos .....	3
1.1.1. Objetivo geral .....	3
1.1.2. Objetivos específicos .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
2.1. Processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco .....	5
2.1.1. Desafios da MADA.....	7
2.1.2. Gerenciamento Térmico.....	11
2.1.3. Propriedades Mecânicas.....	13
<b>3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	16
3.1. Definição das Ligas .....	17
3.2. Definição da Geometria da Pré-Forma.....	20
3.3. Testes Preliminares - Definição dos Parâmetros e Estratégia de Deposição..	25
3.3.1. Parametrização do Processo de Deposição .....	26
3.3.2. Definição da Estratégia de Deposição .....	27
3.3.3. Determinação do Incremento Vertical (altura média das camadas).....	29
3.4. Gerenciamento Térmico .....	31
3.5. Deposição das Paredes Definitivas .....	33
3.6. Preparação das Amostras .....	34
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	36
4.1. Deposições.....	36
4.1.1. Intercorrências e Ajustes Metodológicos.....	40
4.1.2. Hipótese de Autorregulação do Incremento Vertical .....	43
4.2. Ensaios.....	46
4.2.1. Caracterização Química .....	46

4.2.2. Ensaio de Tração .....	51
4.2.2.1. Hipótese de Relação de Dependência da Resposta Mecânica em Relação aos Parâmetros de Deposição .....	62
4.2.3. Ensaio de Dobramento .....	64
4.2.4. Ensaio Charpy .....	67
4.2.5. Ensaio de Microdureza e Micrografias .....	71
4.2.6. Ensaio de Fadiga .....	86
5. CONCLUSÕES .....	95
6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....	98
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	101
A. APÊNDICES .....	105
APÊNDICE I - REGISTROS FOTOGRÁFICOS DAS PRÉ-FORMAS DEPOSITADAS .....	105
APÊNDICE II – OSCILOGRAMAS E GRÁFICOS DE ACOMPANHAMENTO DOS SINAIS ELÉTRICOS DAS DEPOSIÇÕES .....	112
APÊNDICE III – CURVAS DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS EXTRAÍDAS DAS PRÉ-FORMAS.....	121
APÊNDICE IV - REGISTROS FOTOGRÁFICOS E PARECERES DAS AMOSTRAS ENSAIADAS.....	126
APÊNDICE V - REGISTROS FOTOGRÁFICOS DAS AMOSTRAS APÓS A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE IMPACTO CHARPY .....	134
APÊNDICE VI – REGISTROS FOTOGRÁFICOS DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AOS ENSAIOS DE FADIGA (ER110S-1) .....	136

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 representa uma revolução na forma como a produção é concebida, organizada e executada na qual, de acordo com Machado et al. (2020), a manufatura aditiva (MA) se configura como um de seus pilares. Nesta medida, segundo Ribeiro et al. (2020), a fabricação via MA tem potencial de reduzir o consumo de materiais, evitar desperdícios e mitigar inconvenientes e impactos ambientais relacionados ao transporte, uma vez que abre a possibilidade de haver descentralização da produção, podendo, esta tecnologia, se tornar, de acordo com Despeisse et al. (2017), um motor para a implementação de princípios de sustentabilidade. Isso, pois, num contexto de fabricação sustentável de componentes mecânicos e estruturais, a MA possibilita a produção de peças sob demanda, evitando a necessidade de existirem estoques excessivos.

Segundo estes autores, existem seis maneiras pelas quais a MA pode proporcionar benefícios de sustentabilidade ao longo do ciclo de vida do produto (Figura 1.1).

- a. Design eficiente de produtos e processos: permite maior flexibilidade no projeto e capacidade de integrar novas funcionalidades, como componentes multi-resposta;
- b. Configuração do sistema de fabricação: possibilita produção personalizada sob demanda, maior capacidade de resposta a mudanças nas demandas do mercado e economia de material, energia, tempo e custos de produção;
- c. Modelo de negócios: permite maior interação entre consumidores e fabricantes por ter a possibilidade de customização e personalização de baixo custo;

- d. Eficiência na utilização: permite a obtenção de geometrias otimizadas e montagens simplificadas, além do uso de novos materiais com níveis de maior desempenho;
- e. Aumento da vida útil do produto: MA tem capacidade de produzir componentes mais robustos e duráveis, além de se ter a possibilidade de reparar, reformar e remanufaturar componentes; e
- f. Fechamento do ciclo: os materiais de adição podem ser reciclados (especialmente em forma de pós), contribuindo para utilização circular de recursos naturais.

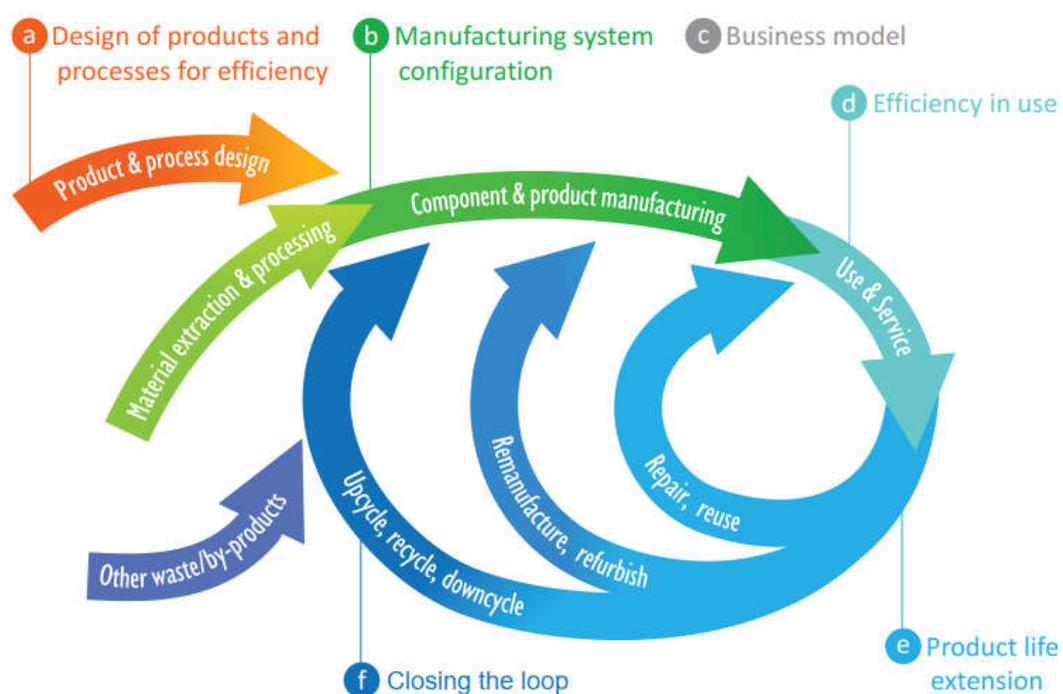


Figura 1.1 – Seis áreas possíveis para ganhos em sustentabilidade na utilização de MA (retirado de Despeisse et al., 2017)

No limite, poder-se-ia sugerir inclusive, que, mesmo a deposição de componentes de geometria simples como tubos, cilindros e blanks, tem potencial de aumento de ganhos em termos de produção sustentável, além da redução de custos de fabricação e estoque, mitigando aspectos relacionados à logística, uma vez que permitiria a estocagem, em pequenos lotes, de grande diversidade de materiais em formatos e dimensões variadas para atender demandas específicas, sendo

direcionados, em caso de necessidade, para operações de pós processamento e acabamento, direcionando-as para seus respectivos usos, reduzindo *lead-time* e contribuindo com o aumento da eficiência da cadeia de suprimentos.

Buscando, portanto, métodos mais sustentáveis e eficientes para a fabricação de componentes mecânicos e estruturais, a Manufatura Aditiva por Deposição à Arco (MADA) tem se destacado como uma técnica disruptiva, com potencial para produzir peças e partes sob-demanda a baixo custo, por se utilizar de equipamentos e consumíveis de soldagem já amplamente difundidos e consolidados no mercado, como se verá à frente.

Diante desse cenário, este trabalho busca contribuir para o avanço da MADA, oferecendo insights sobre suas potencialidades e limitações, bem como propondo soluções para os desafios inerentes do desenvolvimento e aplicação de novos processos, tendo como objetivos principais o que se segue.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico de ligas de aço-carbono depositadas com arames-eletrodos amplamente utilizados em soldagem, sob condições de MADA.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

São eles:

- Avaliar a printabilidade dessas ligas no que se refere à estabilidade do processo e susceptibilidade à geração de discontinuidades e defeitos;
- Verificar a viabilidade da aplicação de técnica de gerenciamento térmico específica (detalhada à frente) em paredes robustas;

- Avaliar aspectos e limitações operacionais inerentes do processo de deposição por MADA; e
- Realizar o levantamento de possíveis pontos frágeis do processo e propor suas respectivas soluções.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

Dentre as abordagens disponíveis para a MA de peças e componentes, a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) tem se destacado como a opção de maior capacidade de produção e menor custo. Entre as vantagens da MADA, é possível destacar a capacidade de fabricar peças sob demanda em um curto prazo de entrega por se tratar de um processo capaz de alcançar altas taxas de deposição que permitem, segundo Cunningham et al. (2018), a construção de componentes de grandes dimensões e de média complexidade a um custo praticável.

Em termos de construção de peças de grande volume de deposição, a Figura 2.1 mostra uma roldana de 400 mm de diâmetro e 80 kg (massa final da pré-forma) sendo depositada no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Processos de Soldagem e Manufatura Aditiva da Universidade Federal de Uberlândia (Laprosolda-UFU).

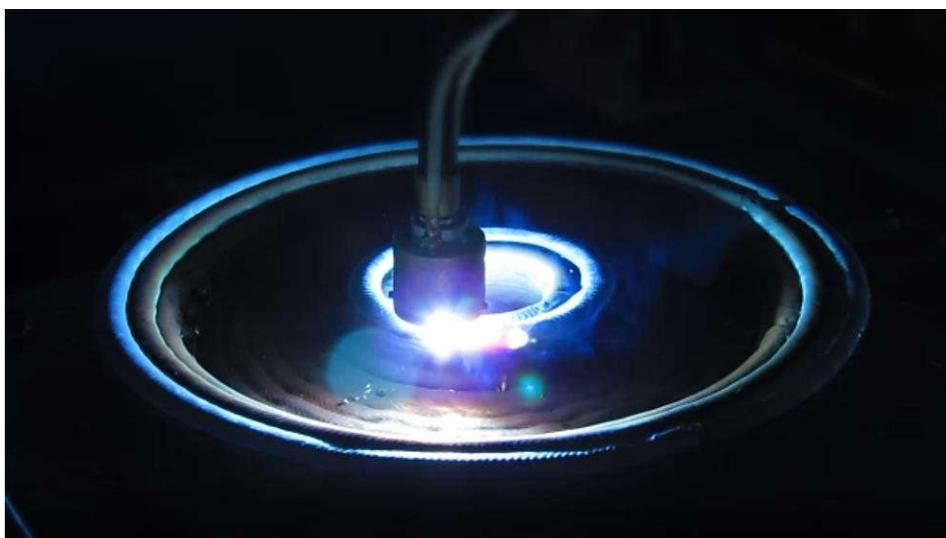


Figura 2.1 – Deposição de peça robusta por MADA (Laprosolda-UFU, 2022)

Em se tratando de MADA, pode-se operar com processos distintos, cuja fonte de calor é o arco elétrico. Destacam-se entre eles aos processos PA (*Plasma Arc*), PTA (*Plasma Transferred Arc*), GTA (*Gas Tungsten Arc*) e GMA (*Gas Metal Arc*). Em contraponto à designação comumente utilizada em soldagem, Scotti (2021) menciona corretamente que, nessas designações, se omite o W, referente à palavra *welding* (soldagem, em inglês), ao final das siglas. Isso porque não se tratam de processos de soldagem e sim de MA.

Estes, então, compõem a família de processos baseados em Deposição por Energia Direcionada (*DED – Directed Energy Deposition*), grupo que abarca, além de processos a arco, também o laser e o feixe de elétrons como fontes de energia, aliados a deposição de material(is) metálico(s) na forma de pós ou arames. Especificamente no contexto do presente trabalho, o processo utilizado foi a MADA baseada em GMA, classificado pela norma ASTM F3187 (2016) como GMA-DED (*Gas Metal Arc – Directed Energy Deposition*).

Segundo a ISO 52900 (2015) e a ASTM F3187 (2016), deposição por energia direcionada (DED), “é um processo [de manufatura aditiva] no qual uma fonte energia térmica focalizada é utilizada para fundir materiais à medida em que são depositados”. Em outra definição, DED refere-se a um conjunto de métodos de processamento em que uma fonte de energia direcionada “cria uma poça de fusão” na qual o material é adicionado (ABS, 2017) e, ainda, que, diferentemente dos processos por fusão em leito de pó (PBF – Powder Bed Fusion), os processos por DED, e por consequência a MADA, produzem peças exclusivamente em forma quase-final (*near-net-shape*), requerendo pós-processamento para que se atinja as tolerâncias dimensionais de projeto, como mostra a Figura 2.2.

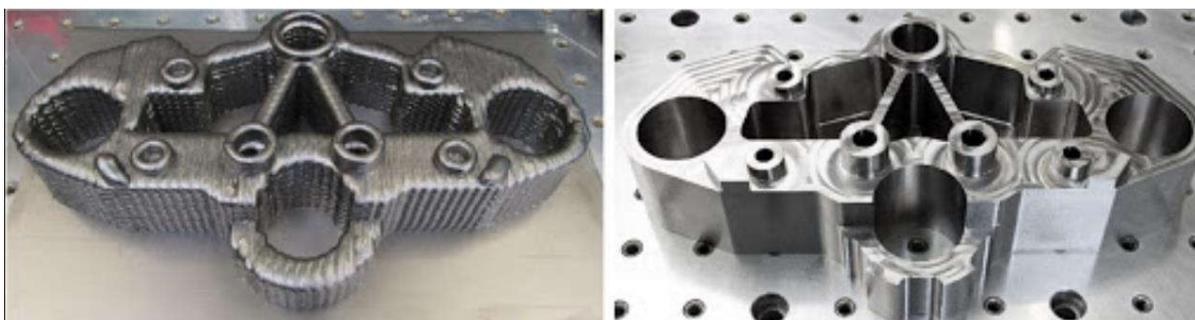


Figura 2.2 – Peça como depositada (*as printed*) por MADA (à esquerda) e após as operações de acabamento (à direita) (modificado de Avianik, 2019)

Scotti (2021) comenta adicionalmente que a designação MADA seria uma adaptação do termo estrangeiro WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*), todavia, pode-se discordar desta afirmação, posto que tal designação se restringe a processos que utilizam metais de adição na forma de arames, sendo que nos processos à arco há a possibilidade de se utilizar pó como metal de adição, como mencionado anteriormente, fazendo a designação MADA mais apropriada no que se refere à classificação dos processos de MA.

Como se trata de um processo consolidado a níveis industriais em termos da aplicação da tecnologia em soldagem, há certa disposição para que haja acelerada consolidação deste processo no mercado de MA, uma vez que se utiliza dos mesmos equipamentos, que, comparados aos demais processos de MA, possuem custo acessível e de operação relativamente simples. Isso, associado ao fato de existirem conhecimentos prévios em processos de soldagem, possibilita, além de outras vantagens, uma evolução acelerada da MADA em comparação com outras técnicas de deposição, conforme apontam Alberti et al. (2014).

Existem, entretanto, alguns desafios operacionais acerca dos materiais e, principalmente, do processo em si, que necessitam ser superados para que a maturidade tecnológica deste processo seja efetivamente alcançada. Isso porque o próprio processo de deposição pode resultar em descontinuidades e defeitos que podem, eventualmente, prejudicar a integridade estrutural dos componentes produzidos por MADA.

### **2.1.1. Desafios da MADA**

Dentre os desafios a serem enfrentados para que haja evolução e consolidação da MADA como método de fabricação e reparo de peças e partes a nível industrial, um problema comumente encontrado em deposições a arco é a ocorrência de porosidade. Dentre outros fatores, a eficácia da proteção gasosa (como na soldagem, evidentemente), desempenha um papel crucial na mitigação deste problema. Para contorná-lo, em algumas situações, pode-se apelar para utilização de sistemas auxiliares de proteção, como aquele apresentado na Figura 2.1, proposto por Silva (2019). O emprego deste tipo de dispositivo se faz especialmente importante quando

na deposição de peças robustas, uma vez que nessas situações são empregadas maiores taxas de deposição, fazendo com que o volume da poça aumente, podendo tornar a proteção gasosa deficitária, principalmente quando a tocha se aproxima das bordas da pré-forma (Figura 2.3).



Figura 2.3 – Incidência de porosidade no passe mais externo da peça (Laprosolda-UFU, 2022)

Tem-se ainda, como limitação dessa tecnologia, sua baixa resolução, que pode se traduzir na obtenção de peças com excessiva ondulação superficial, podendo prejudicar a geometria final da pré-forma, favorecendo o surgimento de defeitos associados às operações de acabamento e pós-processamento, como apresenta a Figura 2.4.



Figura 2.4 – Aparecimento de defeitos na peça após as operações de usinagem de acabamento (Laprosolda, 2022)

Nesse contexto, Ding et al. (2015) apontam que a acurácia dos processos de manufatura aditiva alimentados com arame, caso típico da MADA, chega a ser 10 vezes mais baixa que dos processos alimentados com pó, uma vez que a espessura mínima de camada é geralmente superior, corroborando com a constatação feita por Singh e Dutta (2003), de que quanto maior a espessura da camada depositada, maior o erro geométrico associado. Geng et al. (2018), afirmam que a uniformidade da superfície depositada é relacionada à consistência das condições de contorno térmicas da poça de fusão. Os autores discutem a formação de ondulações na superfície devido à convexidade de cordões sobrepostos verticalmente, fenômeno especialmente relevante em deposições por MADA. Aqui, revela-se a proposição de um importante conceito, feita por Martina et al. (2012), pelo qual estes autores destacam a diferença entre a largura efetiva e a largura total de uma parede composta por camadas de um único cordão (Figura 2.5).

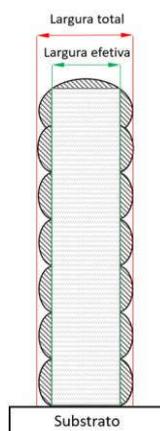


Figura 2.5 – Representação das dimensões das larguras efetiva e largura total associadas à ondulação das superfícies laterais em MADA

Dahat et al. (2020) indicam que através da seleção adequada dos parâmetros de deposição é possível minimizar a quantidade de material residual a ser removida no pós-processamento. Além disso, observam a necessidade de se utilizar processos com baixa pressão do arco elétrico, a fim de evitar escorrimientos laterais da poça de fusão. Eles ainda indicam que tais características podem ser obtidas através da seleção de arcos curtos, baixa relação entre corrente e velocidade de translação, temperaturas de interpasse baixas e constantes, além da utilização de gases de proteção que favoreçam a emissão catódica no centro do arco.

Como forma de mitigar tais problemas, dentre outros, autores como Xiong et al. (2013) ressaltam a importância da seleção adequada dos parâmetros de sobreposição lateral de cordões. Dessa forma, além de ajustar os parâmetros de deposição de cada cordão, é crucial definir níveis de sobreposição lateral adequados para garantir a regularidade superficial dos depósitos. Nesse contexto, Li et al. (2018) mencionam o uso de oscilação transversal da tocha em relação à direção de deposição (conhecido como tecimento em soldagens manuais), como uma estratégia para assegurar maior estabilidade e qualidade superficial na deposição de estruturas robustas.

Mais um desafio a ser encarado na aplicação dessa tecnologia, diz respeito a elevada taxa de deposição dos processos MADA, a qual é comumente acompanhada de um elevado aporte térmico. Isso porque os sucessivos ciclos de deposição de camadas podem resultar no superaquecimento do componente em construção, resultando em variações na geometria (Wu et al., 2017), em heterogeneidade microestrutural e em tensões residuais (Hönnige et al., 2017). Por isso, Yehorev et al. (2019) mencionam a importância em se minimizar o calor imposto e, conseqüentemente, o acúmulo de calor sob a camada depositada para que se garanta melhor qualidade superficial.

Em contrapartida, a redução demasiada da energia de deposição, também podendo ser entendida, conforme os autores Dahat et al. (2020), como sendo a relação entre corrente e velocidade de translação, pode acarretar adversidades como faltas de fusão lateral e falhas de preenchimento (falta de material) devidos à redução da molhabilidade do metal fundido, especialmente em deposições que requerem mais de um cordão por camada, conforme mostra a Figura 2.6.

Luz et al. (2008), citam a temperatura e o tempo como fatores preponderantes quanto à molhabilidade do metal fundido. Neste caso, o aumento da temperatura contribuiria para maior espalhamento do metal fundido no substrato (aqui, entendido por camada e/ou passe anterior). Aliado à temperatura, o metal em fase líquida necessita de tempo para que ocorra seu espalhamento. Assim, pondera-se que as dimensões da peça se configuram como variáveis importantes neste quesito, sendo que, peças volumosas (expressivo potencial da aplicação da MADA), impõe maior capacidade de extração de calor da poça de fusão, acelerando o processo de resfriamento/solidificação e reduzindo, portanto, o tempo necessário para que haja o

desejado espalhamento do material, susceptibilizando o processo à ocorrência deste tipo de defeito.

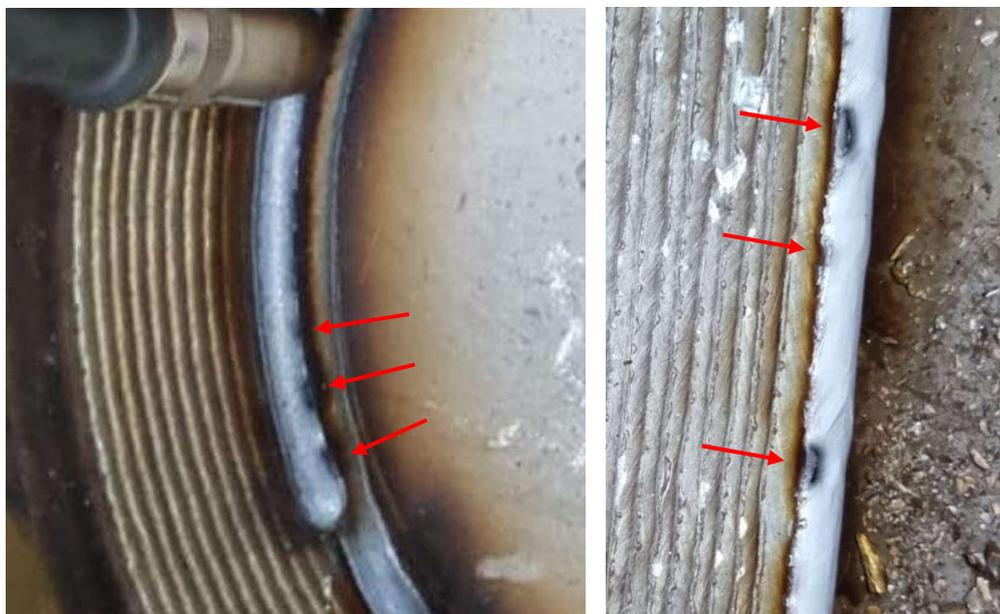


Figura 2.6 – Exemplo de falta de molhabilidade durante deposição de peças (Laprosolda-UFU, 2023)

Desta feita, para que haja possibilidade de conciliação entre tais cenários, no que se refere a manutenção das capacidades produtivas da MADA sem que sejam comprometidos os aspectos relativos à estabilidade do processo, qualidade estrutural e regularidade geométrica dos componentes produzidos, se colocam as técnicas de gerenciamento térmico, cuja aplicação nesse contexto ganha importância, quando não, torna-se imprescindível.

### 2.1.2. Gerenciamento Térmico

O gerenciamento térmico consiste no planejamento e execução de ações que buscam administrar a história térmica das camadas por meio do controle da temperatura de interpasse que, segundo a ASTM F3187 (2016), é fator chave para a obtenção de componentes íntegros por meio dos processos DED, como a MADA.

Dentre inúmeros métodos de gerenciamento térmico possíveis de serem aplicados na fabricação de componentes por meio desse processo, destaca-se o resfriamento ativo por quase-imersão (RAQI), técnica desenvolvida por Silva et al. (2020) no Laprosolda-UFU, tendo sua patente concedida em 2023.

O RAQI, consiste em realizar a deposição dentro de um tanque, onde o nível de fluido é continuamente controlado de modo a garantir a dissipação de calor da pré-forma, mas sem a submergir completamente.

A Figura 2.7 ilustra esquematicamente o regime térmico com a aplicação deste conceito em comparação com outras duas abordagens: resfriamento natural, ou seja, sem a utilização de uma técnica de resfriamento adicional, e nível de fluido fixo (resfriamento do substrato), classificada de resfriamento passivo.

Na primeira situação, há maior propensão de ocorrer acúmulo de calor, acarretando elevados tempos de espera entre as camadas, podendo levar à perda de produtividade e eventual deterioração dos parâmetros geométricos da pré-forma.

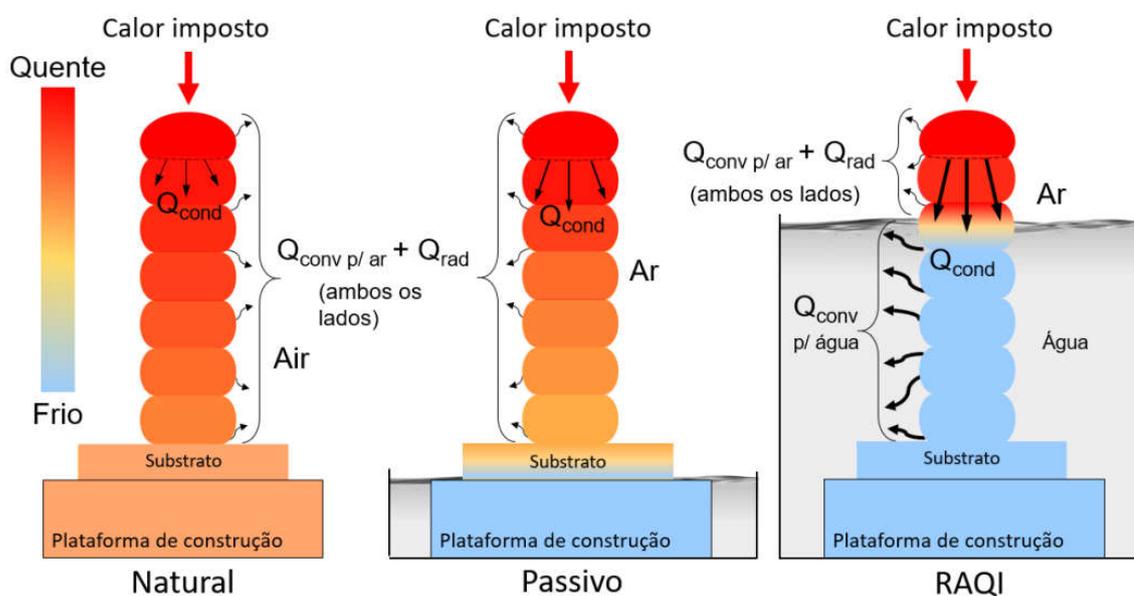


Figura 2.7 – Ilustração esquemática do conceito de RAQI em comparação com as abordagens de gerenciamento térmico natural e passivo (a dimensão das setas é proporcional à intensidade da dissipação de calor), onde  $Q_{\text{cond}}$  = dissipador de calor por condução,  $Q_{\text{conv}}$  = dissipador de calor por convecção e  $Q_{\text{rad}}$  = dissipador de calor por radiação (modificado de Silva et al., 2020)

A segunda abordagem, embora não imponha tantas limitações quanto a anterior, perderia efetividade à medida que a pré-forma ganhasse altura, fazendo com que a extração de calor ficasse atrelada essencialmente à condutividade térmica da pré-forma e do substrato propriamente ditos.

Com a aplicação da técnica RAQI (terceira condição), o nível do fluido de resfriamento se eleva à medida em que a peça é construída, onde é mantida fixa a distância entre a camada que está sendo depositada e a lâmina d'água (ou qualquer outro fluido que venha a ser empregado), permitindo, durante todo o tempo de deposição, que quase a totalidade da superfície da pré-forma esteja em contato direto com o fluido de resfriamento, elevando consideravelmente a capacidade de extração de calor por convecção, o que, segundo Silva (2019), acarretaria na redução do tempo de deposição em até sete vezes.

É evidente que o emprego dessa técnica traz também algumas limitações, como, em se utilizando água como fluido refrigerante, a possibilidade de que haja contaminação da poça de fusão pelo hidrogênio evaporado, como apontam Silva et al. (2020). Além disso, esses autores observam que essa técnica não poderia ser aplicada em deposições fora da posição plana, não havendo a possibilidade, por exemplo, da utilização de mesas posicionadoras que operem em conjunto com o sistema de movimentação da tocha.

### **2.1.3. Propriedades Mecânicas**

A MADA, devido ao seu potencial e evolução acelerada, tem cada vez mais exigido do mercado a aplicação e implementação de peças e partes por ela produzidas como prova de conceito nas mais variadas áreas da indústria a nível global, avançando rapidamente em direção a sua consolidação como processo de fabricação técnica e comercialmente viável.

Ainda existem, no entanto, segundo Kyvelou et al. (2020), incertezas relacionadas com o desempenho estrutural do material resultante da fabricação por MADA, incluindo as propriedades mecânicas básicas, o grau de anisotropia, a influência da geometria construída e a variabilidade na resposta. Segundo estes autores, as propriedades mecânicas não devem ser negligenciadas em MADA e que,

para além, alguma atenção poderia ser dedicada à eventual possibilidade de otimização das propriedades mecânicas e, especialmente, à prevenção de defeitos já conhecidos em se tratando de soldagem.

Sobre otimização de propriedades mecânicas, há de fato, na literatura, indícios de que os parâmetros de deposição e, obviamente, o histórico térmico ao qual o componente é submetido quando em construção, exerça significativa influência sobre o comportamento mecânico de materiais produzidos por MADA. Eriksson et al. (2018) mostraram que o aumento do aporte térmico durante a deposição resulta em aumento da ductilidade e redução da tensão de escoamento e limite de resistência.

Na mesma direção, Ermakova et al. (2020) destaca que um desafio importante na integridade estrutural de componentes produzidos por MADA é avaliar a influência dos parâmetros de deposição associados às técnicas de deposição nas propriedades mecânicas e na resistência à fratura.

Aspectos quanto à isotropia dos materiais de componentes obtidos por MADA também são pontos marcadamente importantes, uma vez que se traduzem como indicadores de confiabilidade e previsibilidade do desempenho destes materiais quando em serviço. Ji et al. (2017), tendo isso em vista, constataram que as amostras carregadas paralelamente à direção de deposição exibiram maior resistência e menor ductilidade do que as amostras ensaiadas na direção de construção. No entanto, existem outros autores, como Haden et al. (2017), Feng et al. (2018) e Geng et al. (2018) cujos respectivos trabalhos tiveram resultados nos quais não foi observado tal comportamento anisotrópico.

É importante destacar que o sucesso na obtenção de propriedades mecânicas desejadas em componentes fabricados por MADA depende da compreensão profunda do processo e da aplicação de práticas de controle de qualidade ao longo de todo o ciclo de fabricação.

Nesse contexto, e diante da necessidade de que sejam elaborados critérios normativos que possibilitem a MADA ser alçada como tecnologia viável para a fabricação de peças e partes a serem empregadas em serviço, é publicada a norma AWS D20.1 (2019), a qual traz exigências em termos de qualificação de maquinário, procedimento de deposição, qualificação de operador e registros de fabricação e inspeção, nas quais requer a avaliação prévia e o registro das propriedades mecânicas, especificando os procedimentos necessários para tal, inclusive, questões

relacionadas à caracterização mecânica dos materiais como um dos requisitos necessários para que se possa conceder os registros das qualificações citadas.

Na sequência, publica-se, ainda nessa esteira, a norma e API 20S (2021), que trata especificamente da qualificação de peças e partes produzidas especificamente por manufatura aditiva, tendo incluído no seu escopo os processos de deposição a arco. Importante mencionar que essa explicita a necessidade de que haja, para cada “nova” peça ser fabricada, a deposição de uma pré-forma de testemunha, na qual deverão ser extraídas amostras a serem direcionadas para ensaios de tração, impacto, dureza e análises microestruturais, além de requerer registros quanto à composição química do depósito, com objetivo de se ter o registro de todas essas informações para que tenha confiabilidade e, principalmente, rastreabilidade dos componentes fabricados por MA em caso de falha em serviço.

Assim, enxergando na MADA o potencial de se tornar um processo de fabricação viável, e prevendo tais demandas, ainda não tão explícitas à época, propôs-se a execução do presente trabalho, onde elaborou-se uma metodologia específica na qual são detalhados aspectos quanto à deposição, avaliação e análise das propriedades mecânicas, como forma de contribuição ao estado da arte dessa promissora tecnologia.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Aqui será apresentada a metodologia desenvolvida e aplicada no presente trabalho, a qual possibilitou a obtenção dos resultados utilizados nas posteriores análises comparativas entre os materiais envolvidos. Em linhas gerais, o fluxograma apresentado na Figura 3.1 traz as etapas de maior importância do referido planejamento metodológico.

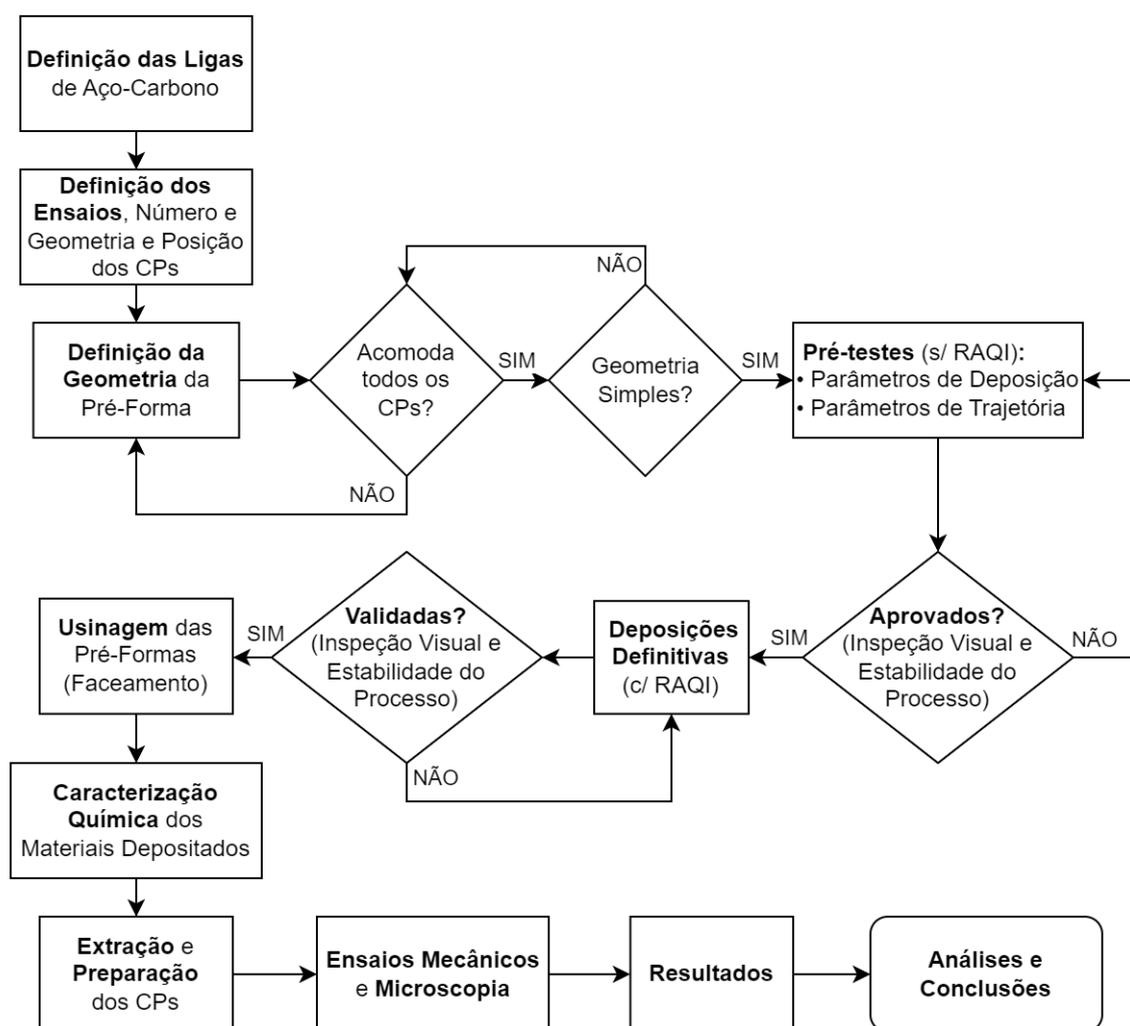


Figura 3.1 – Fluxograma do planejamento metodológico proposto

### 3.1. Definição das Ligas

O primeiro passo dado neste trabalho, no que tange a construção metodológica, foi a tomada de decisão sobre quais e quantas ligas, dentro de um vasto universo de metais de adição possíveis, seriam abordadas pelo estudo ainda em fase de proposição. Para tal decisão, levou-se em conta quatro premissas:

1. Os metais de adição teriam de ser comercializados em forma de arames maciços;
2. Serem ligas comercialmente disponíveis e já consolidadas no mercado de soldagem;
3. Possuírem propriedades e desempenho mecânico (em soldagem) já conhecidos; e
4. Serem corriqueiramente aplicadas, a nível industrial, em produção e reparo de estruturas e equipamentos.

Para isso, houve inicialmente contato com fabricantes de arames, no qual foram discutidos aspectos quanto à utilização comercial dessas ligas, bem como a possibilidade de obtenção, por compra e/ou doação.

Nesse contexto, identificou-se interesse de um dos fabricantes em fornecer estes materiais, sendo 36 kg (dois carretéis) de arames-eletrodos cobreados, de diâmetro nominal de 1,20 mm, de cinco ligas distintas de aço carbono amplamente utilizadas em soldagem a nível industrial, a fim de testar a viabilidade destes metais de adição em aplicações voltadas para MA.

Posteriormente, foi discutido com o fabricante a possibilidade de incluir uma sexta liga ao conjunto de materiais a serem testados, o arame-eletrodo AWS ER70S-3 (AWS-A5.18) (a justificativa para a inclusão deste material é detalhada à frente), o qual foi igualmente cedido para a realização desta pesquisa.

A Tabela 3.1, apresenta a classificação dos arames-eletrodos e as respectivas normas de fabricação. Os limites de composição química destes metais de adição, segundo as respectivas normas de fabricação, são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Materiais disponibilizados

Índice	(ASME IX) F-No. / Especificação ASME	Norma Referência	Classificação Normativa	Diâmetro Nominal [mm]	Revestimento
1	6 / SFA-5.18	AWS-A5.18	ER70S-3	1,20	Cobreado
2			ER70S-6	1,20	Cobreado
3		ISO 14341 / EN440	G4Si1	1,20	Cobreado
4			ER80S-G	1,20	Cobreado
5	6 / SFA-5.28	AWS-A5.28	ER80S-B2	1,20	Cobreado
6			ER110S-1	1,20	Cobreado

Segundo o catálogo do fabricante, os arames-eletrodos 1, 2 e 3 são recomendados para soldagem de aços ao carbono em geral (ASTM A36, A285-C, A515-60, A516-55/60; SAE1010, 1020, etc). Quanto ao arame 4, este é recomendado para soldagem de estruturas metálicas expostas às intempéries ambientais, fabricadas em aços do tipo SAC350 (SAC50); SAC300 (SAC41); CORTEN; ASTM A588, A572, A242, entre outros aços patináveis. Já o metal de adição 5, é recomendado para soldagem de aços baixa liga, especialmente os ligados com 1% Cr e 0,5% Mo, submetidos a elevadas temperaturas (550 °C), tais como ASTM A182-F11/F12, A217-WC6, A387-gr 2, 11 e 12. O arame 6 recebe a recomendação para soldagem de aços de alta resistência, tipo SAR-80, T1, USI-SAR-80, ASTM A514, A517 e A533-A, destacando que os depósitos desse último possuem alta tenacidade e elevada resistência à tração (mínimo de 760MPa).

Ainda nas recomendações do fabricante, é observado que os elevados teores de Mn e Si dos arames 2 e 3, melhoram a desoxidação do metal de solda, quando aplicados sobre materiais com moderada oxidação superficial. É sabido que esse efeito pode ser indesejável em MA, uma vez que acarreta a formação (excessiva, por vezes) de ilhas não-metálicas na superfície dos cordões, o que pode se tornar um inconveniente, uma vez que o processo de deposição de peças por MA é contínuo, nem sempre permitindo que haja limpeza dos cordões entre a deposição das camadas, podendo implicar em problemas como inclusões, prejudicando a integridade estrutural dos depósitos, além do fato de que podem provocar instabilidades no arco elétrico ao sobrepassar as regiões onde se encontram (são isolantes elétricos), podendo interferir de forma deletéria no processo de deposição.

Tabela 3.2 - Limites de composição química dos metais de adição

Índice	1	2	3	4	5	6
Classificação Normativa	ER70S-3	ER70S-6	G4Si1	ER80S-G <sup>a</sup>	ER80S-B2	ER110S-1
<b>C<sub>min</sub></b>	0.060	0.070	0.060	-	0.070	-
<b>C<sub>max</sub></b>	0.150	0.150	0.140	-	0.120	0.090
<b>Mn<sub>min</sub></b>	0.900	1.500	1.600	-	0.400	1.400
<b>Mn<sub>max</sub></b>	1.400	2.000	1.900	-	0.700	1.800
<b>Si<sub>min</sub></b>	0.450	0.500	0.800	-	0.400	0.200
<b>Si<sub>max</sub></b>	0.750	0.800	1.200	-	0.700	0.550
<b>P<sub>max</sub></b>	0.025	0.025	0.025	-	0.025	0.010
<b>S<sub>max</sub></b>	0.035	0.035	0.025	-	0.025	0.010
<b>Ni<sub>min</sub></b>	b	b	-	-	-	1.900
<b>Ni<sub>max</sub></b>	b	b	0.150	-	0.200	2.600
<b>Cr<sub>min</sub></b>	b	b	-	-	1.200	-
<b>Cr<sub>max</sub></b>	b	b	0.150	-	1.500	0.500
<b>Mo<sub>min</sub></b>	b	b	-	-	0.400	0.250
<b>Mo<sub>max</sub></b>	b	b	0.150	-	0.650	0.550
<b>V<sub>min</sub></b>	b	b	-	-	-	-
<b>V<sub>max</sub></b>	b	b	0.030	-	-	0.040
<b>Ti<sub>max</sub></b>	-	-	+ Zr ≤ 0.15	-	-	0.100
<b>Zr<sub>max</sub></b>	-	-	+ Ti ≤ 0.15	-	-	0.100
<b>Al<sub>max</sub></b>	-	-	0.020	-	-	0.100
<b>Cu<sub>max</sub></b>	0.500	0.500	0.350	-	0.350	0.250
<b>O/E Total*</b>	-	-	-	-	0.500	0.500

a - Para atender ao requisito da classificação "G", o eletrodo deve ter no mínimo um ou mais dos seguintes elementos/teores:

0,50% de níquel, 0,30% de cromo ou 0,20% de molibdênio. A composição deve ser reportada e os requisitos são aqueles acordados entre o comprador e o fornecedor (AWS-A5.28, 2005)

b - Esses elementos residuais não devem exceder 0,50% no total (AWS-A5.18, 2005)

Esta foi uma das motivações para a posterior inclusão do arame-eletrodo 1, com o fim de ampliar o escopo da pesquisa, possibilitando a avaliação da "printabilidade" desta liga em comparação com os arames 2 e 3, uma vez que, embora sejam semelhantes em termos de recomendação técnica e composição química, arames de classificação ER70S-3 possuem menor teor de Si e Mn, o que, em tese, não acarretaria os inconvenientes apresentados acima.

### 3.2. Definição da Geometria da Pré-Forma

A pré-forma padrão dos depósitos foi definida com base nos requisitos a seguir, quais sejam: ter geometria simples, a fim de minimizar o esforço experimental e custos de oportunidade decorrentes do tempo gasto para a deposição das peças, e possuir dimensões as quais permitissem a extração dos corpos de prova a serem submetidos aos ensaios mecânicos.

Assim, para a caracterização mecânica, as normas de fabricação dos metais de adição apresentadas na Tabela 3.1 recomendam que os depósitos sejam submetidos a ensaios de tração, para avaliação da tensão de escoamento ( $S_y$ ), limite de resistência ( $S_u$ ) e alongamento ( $e$ ), e impacto (Charpy), para avaliação da resistência à fratura.

Além dos ensaios já citados, propôs-se realizar ensaios de dobramento, previstos na norma AWS D1.1 (2010), visando avaliar a integridade estrutural (presença de descontinuidades internas e sua influência na resposta mecânica) das peças depositadas.

Em complemento, embora não previsto nas normas supracitadas, previu-se a necessidade de que fossem extraídas amostras para medição de microdureza e avaliação da microestrutura resultante das deposições, dada a importância desses dados para posteriores análises quanto ao comportamento mecânico dos depósitos.

Por último, este trabalho tem como uma de suas principais propostas a avaliação da resistência à fadiga dos materiais depositados a fim de se avaliar a tenacidade dos materiais aqui investigados. A avaliação dessa propriedade mecânica não é prevista nas normas citadas, embora se encontre requisitos de fadiga para componentes soldados (juntas), para materiais específicos, empregados em situações específicas.

Definidos os ensaios a serem realizados, tomou-se a norma ASTM A370 como direcionamento para condução dos ensaios convencionais (tração e Charpy), por meio da qual foram determinadas as dimensões dos corpos de prova, as quais tiveram de ser levadas em conta no dimensionamento e definição da pré-forma.

Diferentemente do que se tem previsto nas normas de fabricação dos metais de adição envolvidos (AWS A5.18, A5.28 e ISO 14341 / EN440), as quais determinam que os ensaios sejam realizados apenas na direção de soldagem (longitudinalmente aos cordões de solda), no que se refere aos ensaios de tração, e transversalmente à

solda, no caso de ensaios de impacto (Figura 3.2), as propriedades mecânicas das peças construídas por MA deveriam ser avaliadas em, pelo menos, duas direções distintas: direção de deposição (longitudinalmente às camadas depositadas; também referida neste trabalho como direção horizontal) e direção de construção das peças (transversalmente às camadas; também referidas como direção vertical), conforme mostra a Figura 3.3, permitindo avaliar também o grau de isotropia dos materiais depositados.

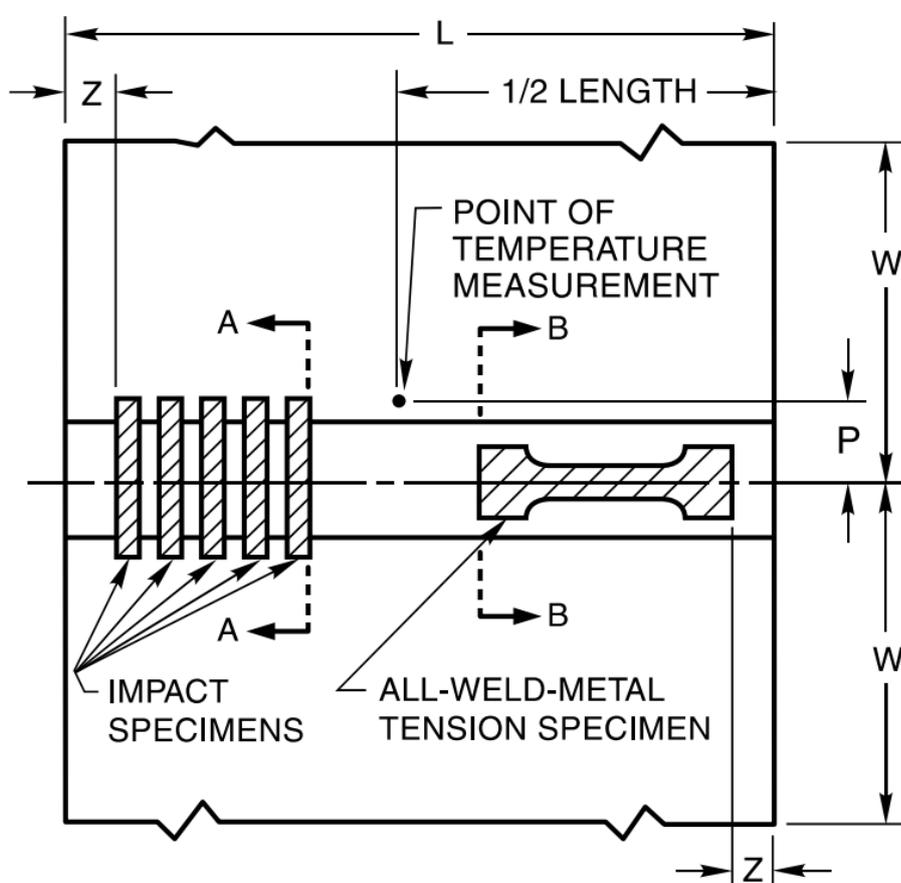


Figura 3.2 - Representação esquemática da placa de teste mostrando a localização e orientação dos corpos de prova na placa de testes (retirado de AWS A5.18/2005)

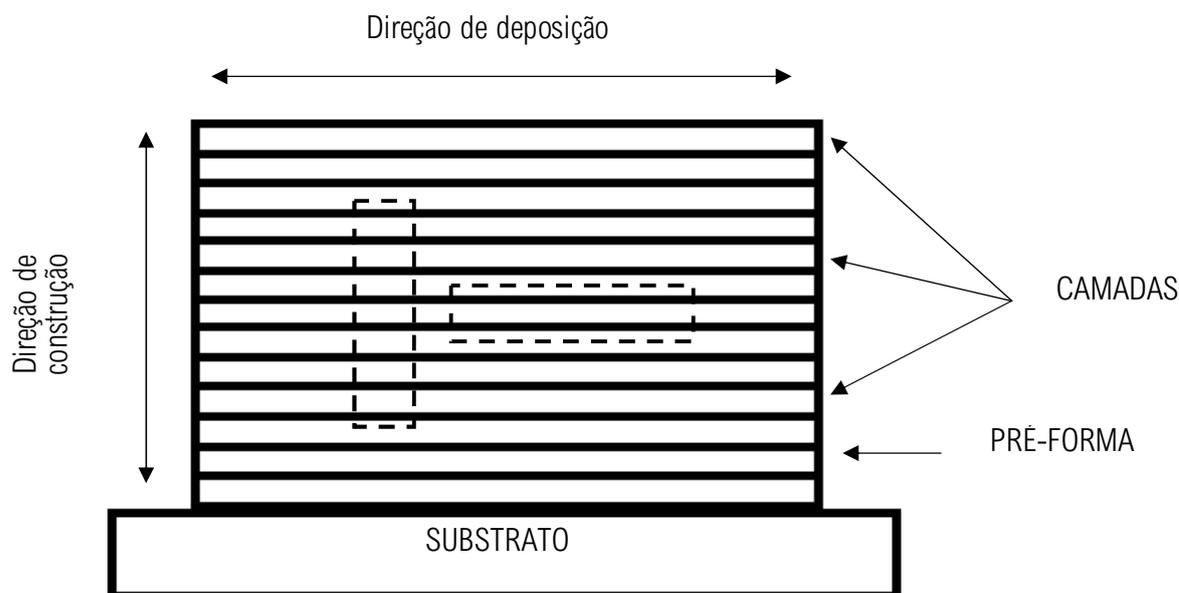


Figura 3.3 - Esquema da pré-forma depositada mostrando a orientação de extração dos corpos de prova

Para contribuir com a confiabilidade das análises de comportamento mecânico, deveriam ser extraídas pelo menos duas amostras em cada direção, para cada ensaio proposto. Ressalta-se que, para os ensaios de fadiga, devido ao número elevado de corpos de prova e suas dimensões, optou-se por avaliar a resistência à fadiga apenas na direção de construção da peça, considerada, a priori, mais crítica. Finalmente, a pré-forma foi dimensionada de forma a permitir a extração das seguintes amostras:

- Seis corpos de prova (CP's) para ensaios de tração (três em cada direção), nas dimensões requeridas pela norma ASTM A370/2020 (pg. 6, FIG. 3: CP tipo chapa (sheet type));
- Seis CP's para ensaios de impacto Charpy (três em cada direção), nas dimensões requeridas pela mesma norma (pg. 21, FIG. 11: CP tamanho real (*full sized*));
- Quatro CP's para ensaios de dobramento (dois em cada direção), nas dimensões requeridas pela mesma norma (pg.35, FIG. A2.13);
- Seis CP's cúbicos, com aproximadamente 10 mm de lado, com localização distribuída na peça, para análises macro e microestruturais e ensaios de microdureza e

- No mínimo nove CP's esbeltos destinados aos ensaios de fadiga, para permitir, com confiabilidade razoável, a posterior construção das curvas S x N.

Por se tratar de um tema relativamente novo, tendo em vista a escassez de material técnico-científico, a geometria e as dimensões das amostras de fadiga foram discutidas de forma que atendessem, ao mesmo tempo, as limitações geométricas impostas pela dimensão final das pré-formas, e os requisitos para ensaios de fadiga: dimensões sensíveis, especialmente no tocante ao raio de convergência entre as “orelhas” e a região de redução de secção, por se comportarem com concentradores de tensões.

A definição da espessura do corpo de prova de fadiga foi igualmente discutida, visando obter o maior número possível de amostras de cada peça construída, sem que fossem comprometidos os resultados posteriores dos ensaios, no sentido de que, por experiência da equipe responsável pelos ensaios de fadiga, realizados fora das dependências do Laprosolda-UFU, amostras muito finas possuem maior tendência de apresentarem comportamento dúctil do que amostras mais espessas. Assim, concluiu-se que tais amostras não deveriam ter a espessura menor que 3 mm, o que determinou a geometria final, apresentada na Figura 3.4, estando de acordo com a norma ISO/TR 14345:2012.

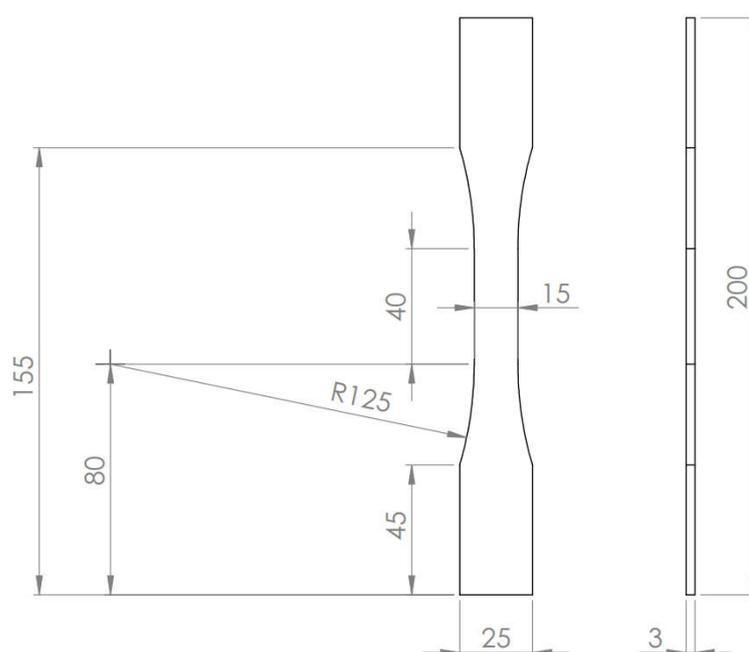


Figura 3.4 - Geometria final dos corpos de prova de fadiga

Postos estes requisitos, definiu-se que as pré-formas deveriam ter largura efetiva de, no mínimo 13 mm, permitindo a extração de, no mínimo, 3 amostras de fadiga na direção da largura da pré-forma (Figura 3.5), a serem usinadas via eletroerosão a fio, com espessura de corte prevista de 0,20 mm, visando o mínimo de perda e o máximo aproveitamento de material.

Tendo definido as dimensões e o número de amostras a serem ensaiadas, fez-se a diagramação da distribuição dessas peças de forma a tornar o conjunto o mais compacto possível (Figura 3.6 - à esquerda), com o objetivo de reduzir ao máximo as dimensões da pré-forma a ser construída, visando a economia de material, insumos e tempo relativos às posteriores deposições. Assim, decidiu-se viável adotar a geometria de “parede”, a qual deveria possuir dimensões mínimas de 270 mm de comprimento, 200 mm de altura e 13 mm de largura efetiva (estimando uma distância média entre os CP's de 4 mm, tendo em vista que os cortes das amostras seriam realizados por corte a água, fato que exigiu tal espaçamento).

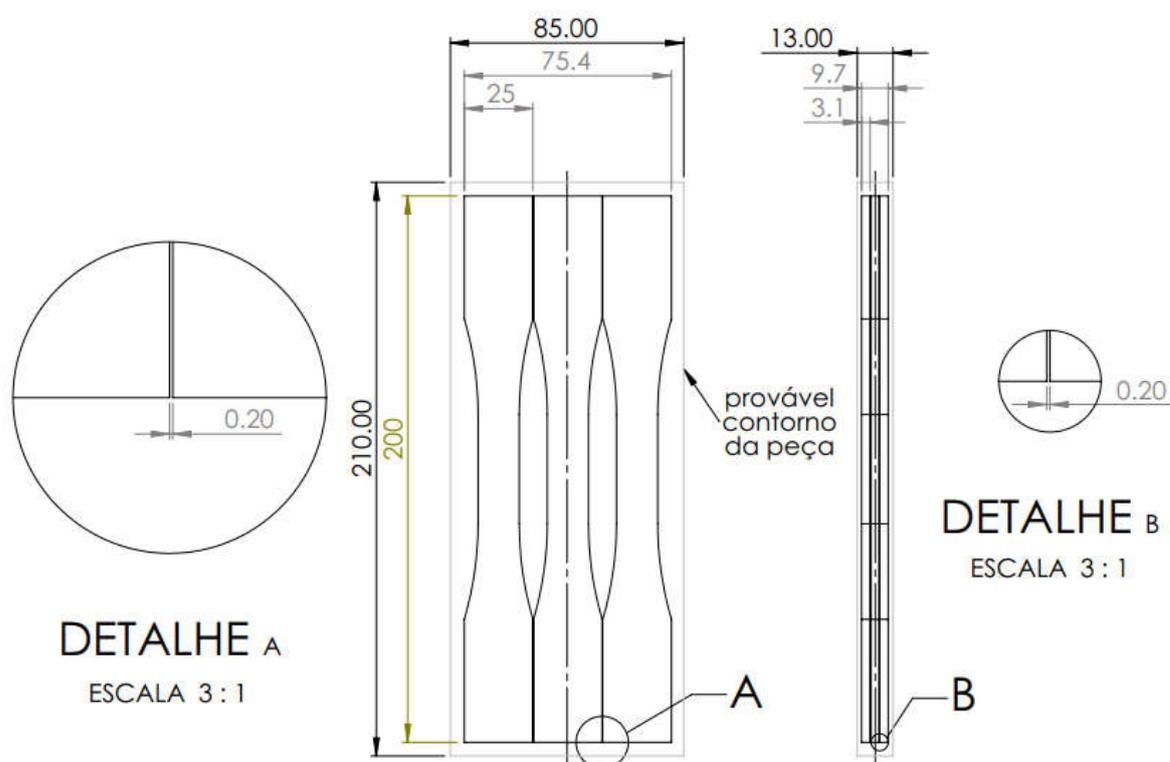


Figura 3.5 - Distribuição dos corpos de prova de fadiga (as cotas realçadas em preto representam as prováveis dimensões da peça extraída da pré-forma original, a ser direcionada para o corte por eletroerosão a fio, resultando na extração de nove amostras)

Contudo, antevendo a necessidade de que se houvesse sobre-metal como forma de assegurar as dimensões finais, após a operações de pré-usinagem (cortes e remoção das ondulações superficiais intrínsecas do procedo de fabricação por GMA-DED), definiu-se as dimensões efetivas da pré-forma padrão como sendo de, no mínimo, 300 mm de comprimento, 230 mm de altura e 15 mm de largura (Figura 3.6 - à direita).

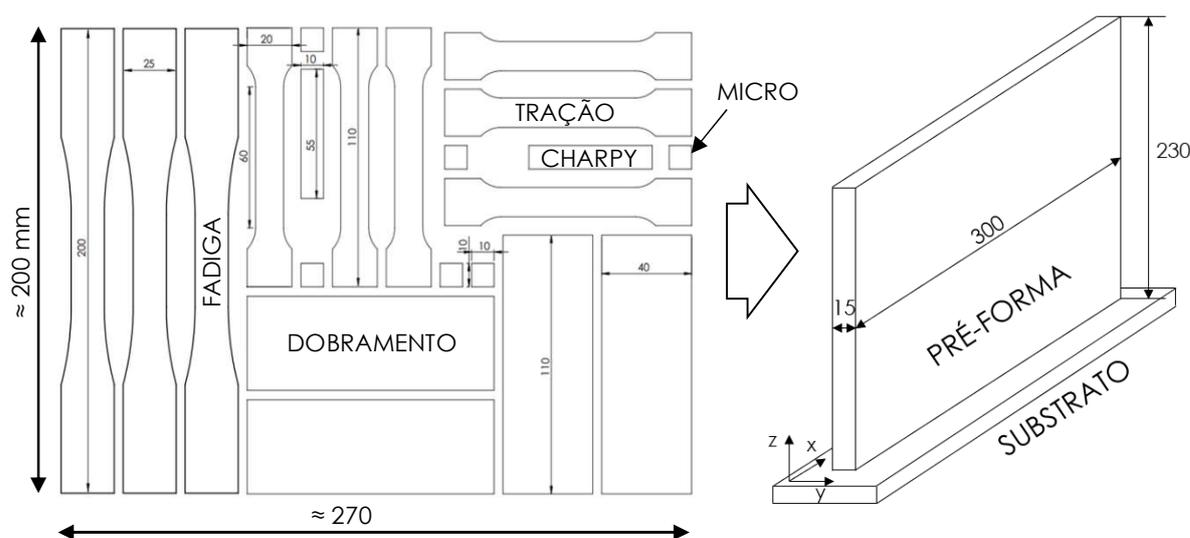


Figura 3.6 - Diagramação das amostras e suas respectivas dimensões (à esquerda) e definição das dimensões mínimas finais da pré-forma padrão (à direita)

É importante registrar que o equipamento disponível para a fabricação das peças, apresentado à frente, possuía limitações geométricas de altura e comprimento para a construção de peças com essa geometria e que, embora fosse conveniente produzir peças ainda maiores, prevendo a necessidade de que algum ensaio pudesse ter de ser repetido, por exemplo, tal ampliação no dimensional final não seria possível naquele momento.

### 3.3. Testes Preliminares - Definição dos Parâmetros e Estratégia de Deposição

Nesta etapa, procedeu-se a parametrização do processo de deposição, bem como a definição da estratégia de deposição por meio da realização de testes

preliminares, para que, quando nas deposições definitivas das pré-formas padrão, fossem atendidos os requisitos geométricos definidos.

Para efeito de definição, neste trabalho entende-se por “parâmetros de deposição” as variáveis reguláveis do processo GMAW (Gas Metal Arc Welding), como tensão (ou comprimento de arco), velocidade de alimentação ( $V_A$ ), velocidade de deposição ( $V_D$  - velocidade de translação da tocha), distância bico de contato-peça (DBCP), bem como outras regulagens específicas, enquanto por “estratégias de deposição”, entende-se as variáveis relacionadas com o planejamento de trajetória da tocha, padrão de oscilação, tempos de parada, incremento vertical (em z) por camada, relação de sobreposição entre cordões e gerenciamento térmico.

### **3.3.1. Parametrização do Processo de Deposição**

Para os testes preliminares, foram realizadas a priori deposições de cordões lineares sobre chapa para determinar seus parâmetros geométricos, especialmente largura e altura do reforço.

Optou-se por operar em modo pulsado sinérgico, uma vez que este processo proporciona transferência metálica estável, com baixa geração de respingos, ao passo que opera em níveis relativamente baixos de corrente RMS (baixa energia, conseqüentemente) quando em comparação com outros modos de transferência por voo livre, produzindo cordões de bom aspecto superficial e regularidade geométrica.

Realizados os testes de cordão sobre-chapa, adotou-se  $V_A = 5,5$  m/min e  $V_D = 500$  mm/min, as quais, para arames de densidade média de  $7,9$  g/cm<sup>3</sup> e diâmetro real médio de  $1,17$  mm, resultaram em uma taxa de fusão ( $T_F$ ) e uma taxa de deposição ( $T_D$ ) teórica linear de aproximadamente  $2,6$  kg/h e  $0,87$  g/cm, respectivamente, proporcionando cordões de largura média de  $6,5$  mm e altura média de aproximadamente  $2,5$  mm.

O ajuste de comprimento de arco, permitido pela fonte de soldagem operando em modo pulsado sinérgico, foi feito buscando-se um arco o mais curto possível, porém sem que houvesse a ocorrência de curtos-circuitos, garantindo a transferência por voo livre. Salienta-se que essa regulagem, dadas as diferentes composições químicas, variou em função do metal de adição testado. Tal combinação de

parâmetros, aliada à adoção de DBCP's de  $19 \pm 1$  mm, resultou na obtenção de correntes médias na ordem de  $150 \pm 10$  A e tensões médias de  $22,5 \pm 1$  V.

Nesta etapa, assim como nas etapas que seguem, inclusive nas deposições das paredes definitivas, foi utilizada proteção gasosa de Ar + 2% CO<sub>2</sub>.

### 3.3.2. Definição da Estratégia de Deposição

Com estes primeiros resultados, passou-se para a próxima fase, na qual, por meio da deposição de camadas únicas sobre chapa, objetivou-se a determinação de um padrão de oscilação da tocha que resultasse na obtenção de depósitos cuja largura efetiva fosse de no mínimo 13 mm (Figura 3.7).

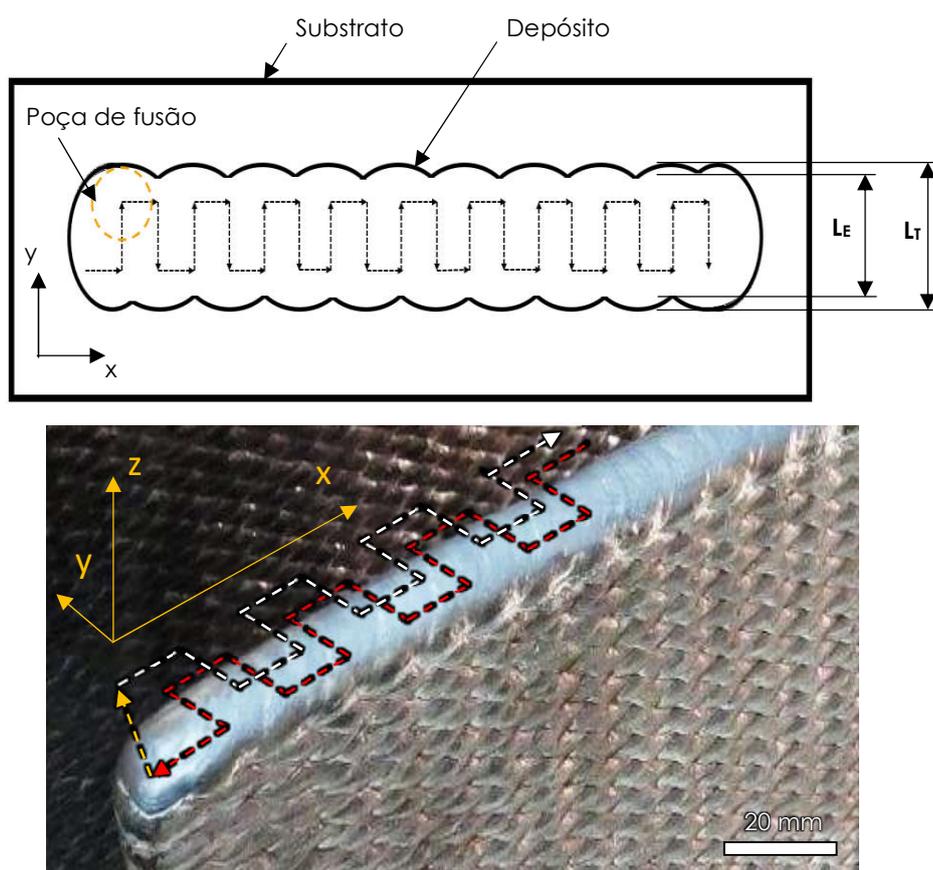


Figura 3.7 - Esquema ilustrando a vista superior da placa de teste, apresentando o padrão de oscilação da tocha (setas tracejadas), o aspecto do depósito e suas respectivas larguras total ( $L_T$ ) e efetiva ( $L_E$ )

Ainda nessa figura, nota-se que o objetivo seria, posteriormente, adotar um padrão de deposição bi-lateral, de forma que fosse alternado o sentido de deposição entre as camadas, representado pelas linhas tracejadas em vermelho e branco, buscando-se reduzir os efeitos de acúmulo e de falta de material decorrentes das sucessivas aberturas e fechamentos do arco, respectivamente, a fim de possibilitar a obtenção de peças geometricamente regulares ao fim das deposições.

Além de preencher os requisitos de largura estabelecidos previamente, buscou-se conseguir um padrão de oscilação no qual houvesse uma mínima sobreposição possível entre dois cordões transversais (setas na direção y) subsequentes, permitindo a obtenção de um acabamento superficial homogêneo, além de evitar a ocorrência de “vazios” entre eles, o que susceptibilizaria a deposição ao aparecimento de faltas de fusão entre as camadas, devido à “dificuldade de acesso” do arco elétrico aos vales gerados pelo distanciamento excessivo entre os cordões na direção x.

Abordou-se ainda aspectos relacionados ao acabamento lateral dos depósitos, buscando reduzir os efeitos de onda, intrínsecos de deposições a arco com oscilação transversal, visando maior homogeneidade lateral da pré-forma, de forma a reduzir a relação  $L_T/L_E$ . Tal abordagem não se limita a aspectos puramente estéticos, uma vez que, quanto maior for essa relação, maior a perda de material resultante das operações de pós-processamento, necessárias para que se atinja as dimensões previstas.

Para isso, além de se trabalhar apenas com a variação do comprimento de onda do padrão de oscilação, propôs-se a adoção de tempos de parada lateral, os quais implicavam na interrupção do movimento da tocha por curtos períodos, em determinados locais, mantendo-se o arco aberto, proporcionando o aumento de volume da poça e, por consequência, de seu diâmetro, o que teve como consequência a suavização das ondulações laterais.

Pondera-se aqui que, embora desejáveis, para efeito de demonstração dos avanços metodológicos obtidos por esta abordagem, não foram feitos registros fotográficos das placas de teste e dos depósitos quando na realização destes testes.

### 3.3.3. Determinação do Incremento Vertical (altura média das camadas)

A partir daqui, procedeu-se à execução dos testes preliminares propriamente ditos, onde foram realizadas deposições de pequenas paredes (Figura 3.8) com resfriamento ao ar.



Figura 3.8 - Exemplo de parede depositada na etapa de testes preliminares; vista superior (à esquerda) e frontal (à direita)

Nessa etapa, foram depositadas pré-formas de 10 camadas, em padrão bidirecional, ou seja, invertendo-se o sentido de deposição camada a camada, fixando-se a temperatura máxima de interpasse em 100 °C, visando estimar o incremento vertical médio decorrente da utilização do envelope operacional levantado nas fases anteriores, para cada metal de adição envolvido. Também foi possível explorar o efeito das alterações dos parâmetros de trajetória da tocha nos demais aspectos geométricos das pré-formas.

Nesse momento, verificou-se que, embora tenha sido adotada a mesma parametrização de deposição, houve diferença sensível na geometria final dos depósitos de cada metal de adição em termos de largura das paredes e crescimento vertical, ocasionadas principalmente por aspectos relacionados à molhabilidade dos cordões produzidos.

A Figura 3.9 ilustra algumas das variáveis trabalhadas na fase de testes preliminares e esclarece aspectos relacionados com Tabela 3.1, a qual apresenta os valores de regulação de parâmetros de deposição e trajetória adotadas nos testes preliminares, valores calculados e os valores das dimensões obtidas em cada pré-forma depositada.

Tabela 3.3 - Parâmetros de processo, parâmetros calculados, planejamento de trajetória e dimensional obtido

Metal de Adição	Teste	Parâmetros Regulados				Parâmetros Calculados			Planejamento de Trajetória			Incremento Vertical		Altura média Final [mm]	Incremento Vertical Calculado [mm]		
		V <sub>A</sub> [m/min]	AL.I [mm]	DBCP [mm]	V <sub>D</sub> [mm/min]	V <sub>De</sub> [cm/min]	t <sub>tr/camada</sub> [s]	V <sub>A</sub> /V <sub>De</sub>	t <sub>p</sub> [s]	A [mm]	λ/2 [mm]	Nº de Camadas	Incremento Vertical Regulado [mm]			L <sub>T-média</sub> [mm]	Comprimento Final [mm]
ER70S-6	PRE1	5,5	-12	17	500	10,5	55,8	52,5	0,5	10	4,875	10	5	21,0	102,8	15,7	3,13
ER70S-6	PRE2	5,5	-12	17	500	10,5	55,8	52,5	0,5	10	4,875	10	5	20,5	102,4	15,6	3,13
ER80SG	PRE1	5,5	-7	17	500	10,5	55,8	52,5	0,5	10	4,875	10	5	19,4	102,7	16,9	3,39
ER80S-B2	PRE1	5,5	-6	17	500	14,7	39,8	37,5	0,1	10	4,875	10	5	17,3	101,1	15,6	3,11
G4Si1	PRE1	5,5	-8	17	500	15,0	39,0	36,7	0,2	8	4,875	10	5	16,8	102,5	14,7	2,95
ER110S-1	PRE1	5,5	-7	17	500	15,0	39,0	36,7	0,2	8	4,875	10	5	16,7	102,0	15,0	3,00
ER80SG	PRE2	5,5	-7	17	500	15,0	39,0	36,7	0,2	8	4,875	10	5	16,8	102,0	14,7	2,93
ER80S-B2	PRE2	5,5	-6	17	500	15,0	39,0	36,7	0,2	8	4,875	10	8	17,2	104,4	22,1	2,76
ER70S-6	PRE3	5,5	-12	17	500	15,0	39,0	36,7	0,2	8	4,875	10	8	17,5	104,5	20,9	2,62
G4Si1	PRE2	5,5	-11	17	500	15,0	39,0	36,7	0,2	8	4,875	10	8	17,0	104,3	21,4	2,68
ER110S-1	PRE2	5,5	-11	17	500	15,0	39,0	36,7	0,2	8	4,875	10	8	16,9	104,4	21,6	2,70
ER80SG	PRE3	5,5	-7	17	500	15,0	39,0	36,7	0,2	8	4,875	10	8	17,6	104,0	23,1	2,89

AL.I – Parâmetro de regulagem de comprimento de arco da fonte de soldagem; escala de ajuste de -30 a 30 (fator adimensional)

V<sub>De</sub> – Velocidade de deposição efetivat<sub>p</sub> – Tempo de parada lateralt<sub>tr/camada</sub> – Tempo total de deposição de uma camada

Incremento Vertical Regulado – Distância entre as camadas em Z, regulada no sistema de movimentação (robô)

Incremento Vertical Calculado – Altura média das camadas, calculada após a deposição das pré-formas

Na referida tabela, o cálculo para determinação do incremento vertical foi feito com base na  $\text{Incremento Vertical [mm]} = \frac{\text{Altura média final [mm]}}{\text{N}^\circ \text{ de Camadas}}$

$$\text{Equação 3.1. Já a } V_{De} \text{ [mm/min]} = \frac{\lambda/2 * V_D}{(\lambda/2 + A + 2V_D * t_p/60)}$$

Equação 3.2 traz a forma pela qual foi calculada  $V_{De}$  (Velocidade de Deposição Efetiva). Como mostrado na Figura 3.9, essa grandeza se define como a velocidade resultante de deslocamento na direção x e é importante para que seja possível o cálculo da energia de deposição do processo, bem como da taxa de deposição linear.

$$\text{Incremento Vertical [mm]} = \frac{\text{Altura média final [mm]}}{\text{N}^\circ \text{ de Camadas}} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$V_{De} \text{ [mm/min]} = \frac{\lambda/2 * V_D}{(\lambda/2 + A + 2V_D * t_p/60)} \quad \text{Equação 3.2}$$

com  $V_D$  em [mm/min],  $\lambda/2$  e  $A$  em [mm] e  $t_p$  em [s].

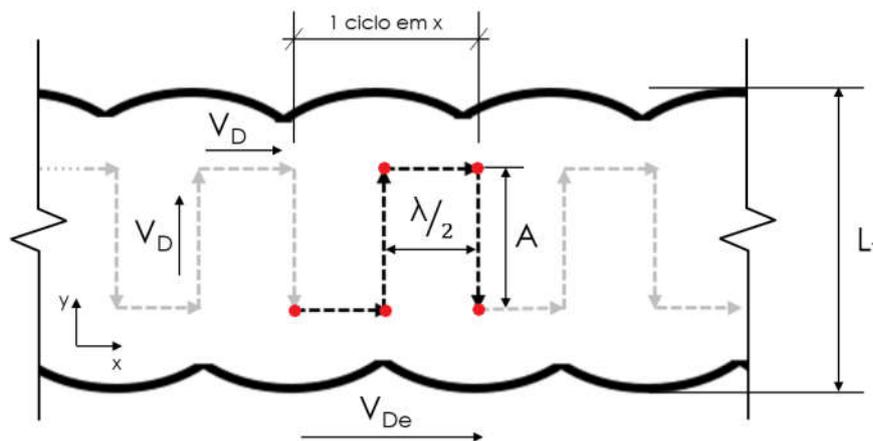


Figura 3.9 - Variáveis geométricas abordadas nos testes preliminares

### 3.4. Gerenciamento Térmico

Superada a fase dos testes preliminares, para se conceber as pré-formas definitivas, fez-se necessário estabelecer adequado gerenciamento térmico do processo, permitindo-se manter o mais estáveis possíveis as condições de

resfriamento à medida que fossem sendo depositadas as camadas. Pondera-se que as ligas trabalhadas aqui são transformáveis, susceptíveis a alterações microestruturais e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas, em função de eventuais mudanças nos ciclos térmicos às quais são submetidas. Para isso, determinou-se realizar as deposições com o auxílio da técnica de gerenciamento térmico por RAQI (Resfriamento Ativo por Quase-Imersão; SILVA, 2019).

Conforme exposto no Capítulo II, essa técnica consiste em um resfriamento ativo da pré-forma por meio de sua quase imersão, contínua e controlada, em um líquido de resfriamento dentro de um tanque de trabalho durante todo o tempo de construção da peça (Figura 3.10). Neste trabalho, optou-se por água como fluido de resfriamento.

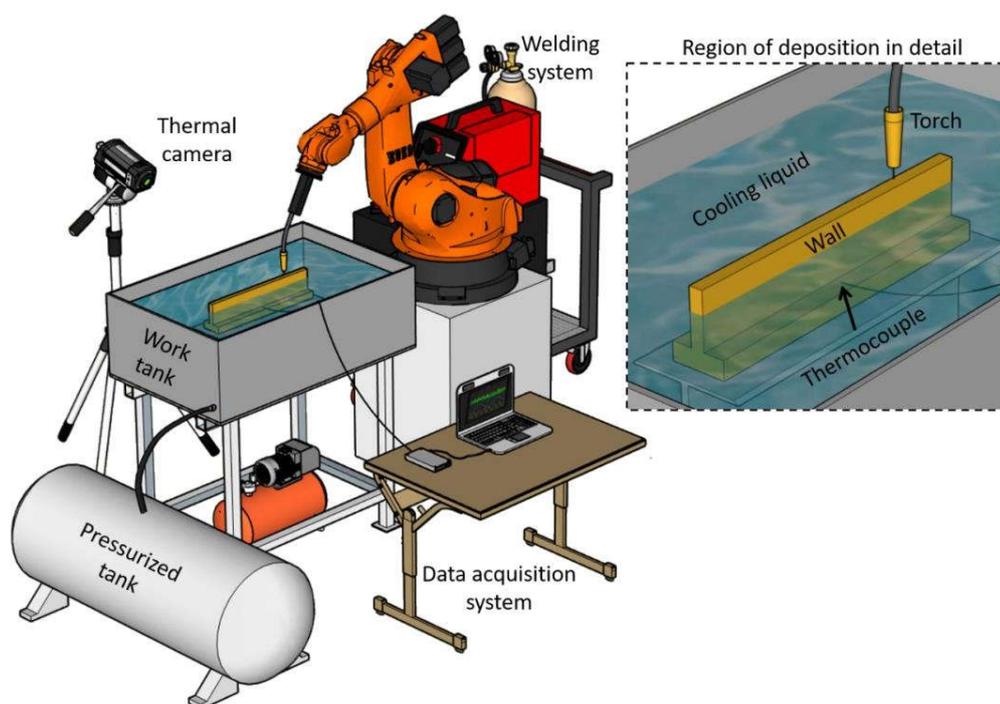


Figura 3.10 - Esquema representativo do processo de deposição de uma parede aplicando gerenciamento térmico por RAQI (retirado de SILVA, 2019)

Conforme Silva (2019), com o emprego do RAQI, a taxa de resfriamento da parte não imersa da pré-forma e a temperatura de interpasse são controladas pelo nível do líquido de resfriamento, em relação ao topo da peça, e pela troca de calor com sua parte apenas imersa (dependente da temperatura inicial e capacidade térmica e

condutividade do líquido de resfriamento para um dado material em deposição), em contato direto e já em equilíbrio de temperatura com o líquido.

Além destes aspectos, quando comparado com o resfriamento ao ar, a utilização do RAQI propiciou razoável redução no tempo para deposição das pré-formas, por apresentar elevada capacidade de remoção de calor em comparação com deposições resfriadas ao ar, reduzindo o tempo de espera entre camadas.

### 3.5. Deposição das Paredes Definitivas

A Figura 3.11 apresenta o equipamento utilizado para a deposição das paredes definitivas, o qual consiste basicamente em um braço robótico de seis graus de liberdade, responsável por conduzir a tocha pela trajetória pré-definida, e a cuba (tanque) do sistema de RAQI, no interior da qual foram depositadas as pré-formas.

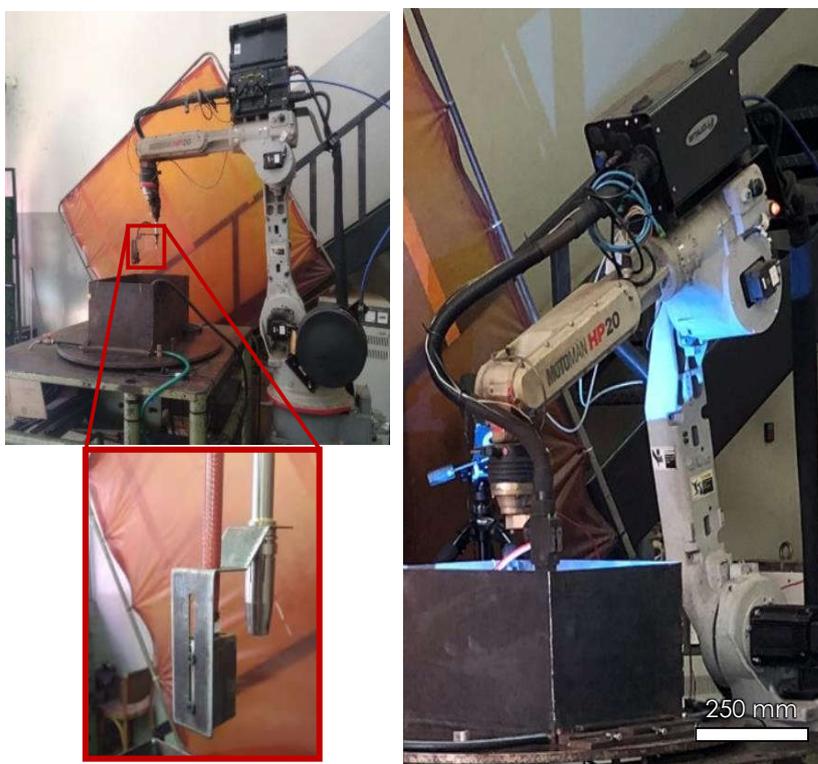


Figura 3.11 – Visão geral do equipamento utilizado para deposição das pré-formas, com destaque para o sensor de nível de água acoplado ao pescoço da tocha (sudoeste)

O sensor de nível possui configuração que permite seu ajuste de altura, possibilitando alterar a distância entre a superfície do líquido de resfriamento e o topo da peça que está sendo depositada. Ajustada essa altura, o nível da água passa a ser controlado pelo deslocamento da tocha em z. Neste trabalho, a altura do sensor foi ajustada para que fosse mantido o nível de água a 20 mm do topo da pré-forma.

### 3.6. Preparação das Amostras

Após as deposições, as paredes tiveram seus substratos removidos e foram submetidas a usinagem de pré-acabamento, que consiste operação de faceamento em ambos os lados da pré-forma, para remoção da superfície ondulada característica de peças depositadas por GMA-DED (Figura 3.12).

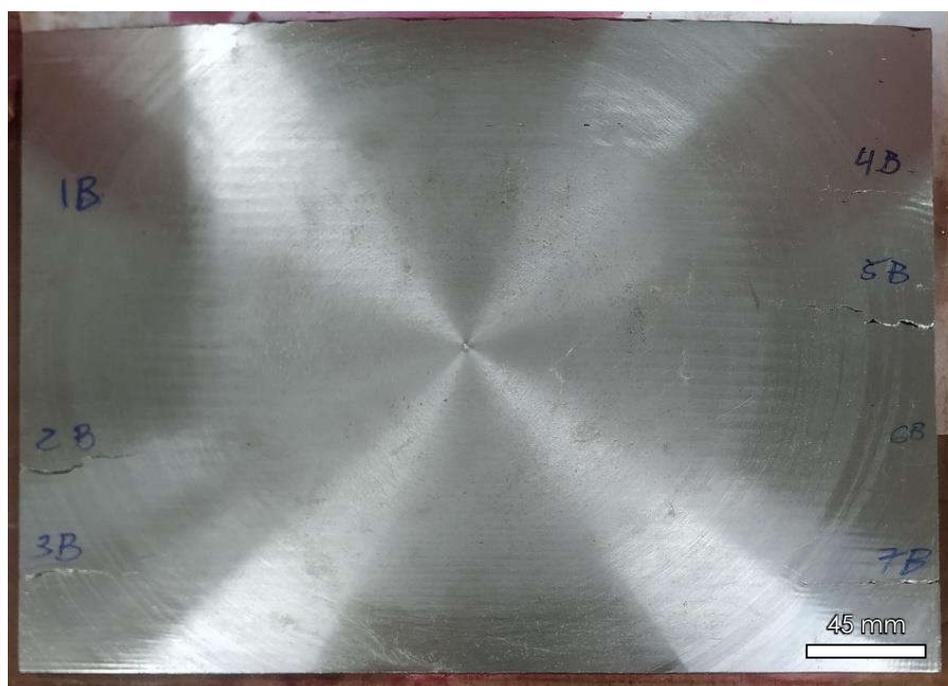


Figura 3.12 – Pré-forma após operações de usinagem de pré-acabamento

Para extração das amostras a serem direcionadas para os respectivos ensaios foi proposto o corte a água, por ser um processo não-térmico, possibilitando preservar as características microestruturais do material, além de permitir o bom aproveitamento do espaço disponível, a fim de evitar desperdício de material. Para isso, as pré-formas,

foram divididas em proporção de 1 para 2, aproximadamente, onde a maior parte era separada para o corte a água (corte dos CP's direcionados para o levantamento das propriedades mecânicas básicas), e a menor, para a eletroerosão a fio, para extração dos CP's de fadiga, como ilustra a Figura 3.13.

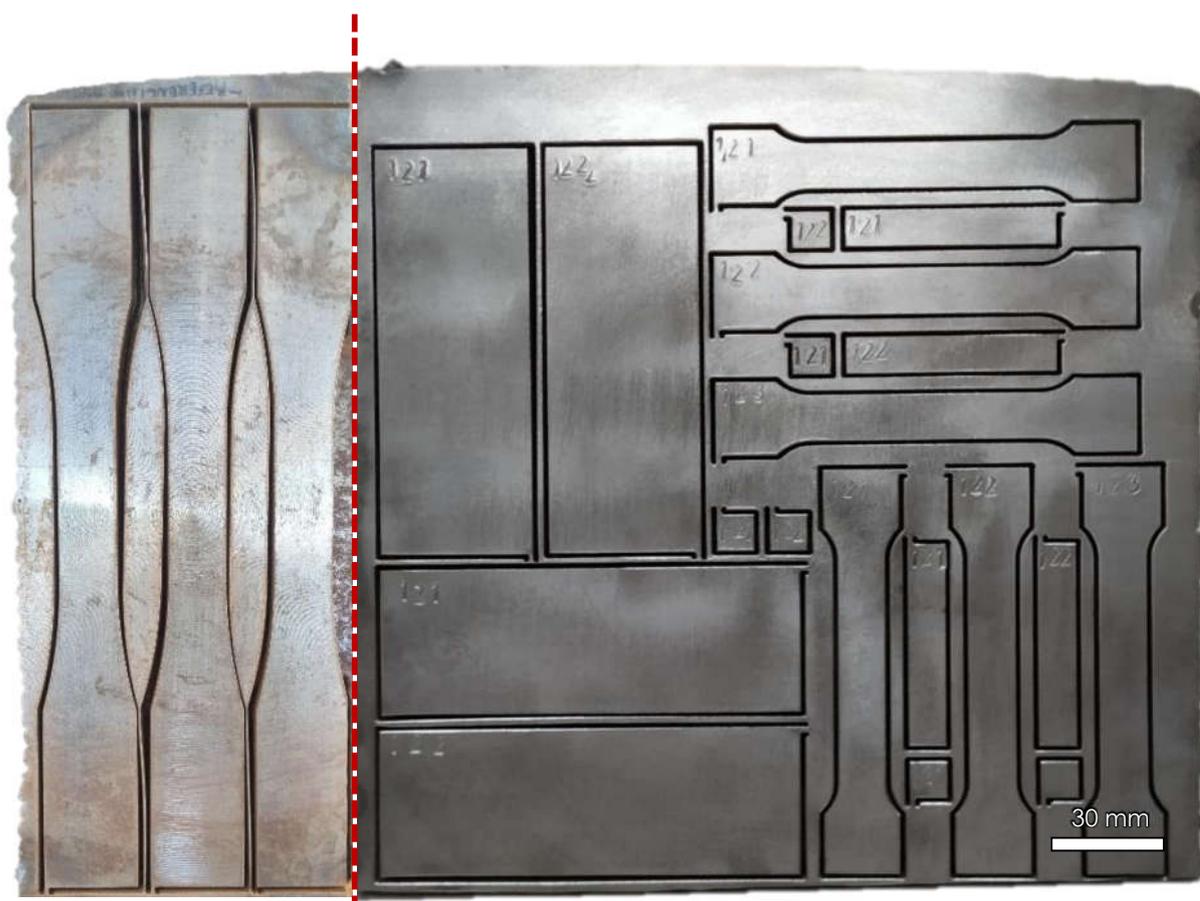


Figura 3.13 – Parede após ser submetida à operação de cortes dos corpos de prova por jato d'água (amostras de fadiga à esquerda e demais amostras à direita)

As amostras dos ensaios de tração, dobramento, Charpy e micros tem espessura de 10 mm, conforme definição da norma ASTM A370 (2020). Portanto, antes de ser encaminhada ao corte a água, a região separada para extração destes CP's era novamente submetida à operação de faceamento.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1. Deposições

A Figura 4.1 mostra uma pré-forma no interior da cuba de deposição, exemplificando a utilização da técnica de RAQI, enquanto a Figura 4.2, apresenta a pré-forma depositada sobre seu substrato fixado à base de impressão no interior da cuba, logo após sua deposição, ao passo que a Figura 4.3 traz a mesma pré-forma após limpeza por escovamento.

O registro fotográfico dessa e das demais pré-formas depositadas encontram-se no Apêndice I, nas Figuras de A.1 a A.7. Destaca-se que, nesse conjunto de registros, não estão presentes imagens das primeiras duas paredes, depositadas com os arames-eletrodos 4 e 5 (ER80S-G e ER80S-B2, respectivamente).



Figura 4.1 - Foto ilustrativa da aplicação da técnica RAQI



Figura 4.2 - Pré-forma depositada com o arame-eletrodo 2 (ER70S-6) com o substrato preso à base da cuba

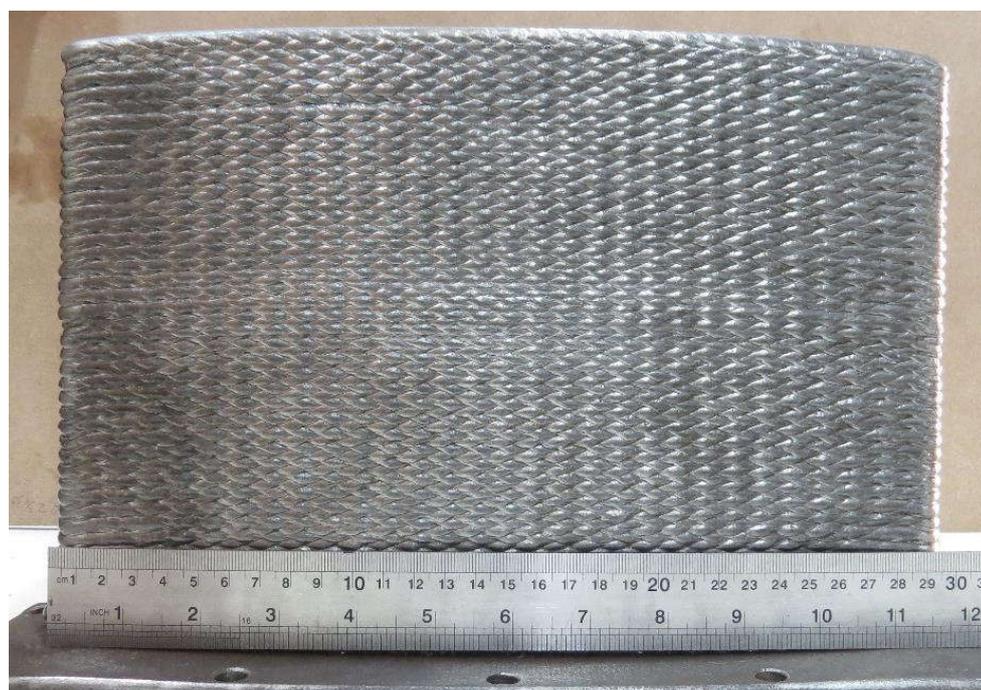


Figura 4.3 - Pré-forma depositada com o arame-eletrodo 2 (ER70S-6) após limpeza por escovamento

A Tabela 4.1 apresenta os dados dimensionais, de massa, número de camadas depositadas, taxa e tempo de deposição e corrente média monitorada para cada pré-forma depositada.

Tabela 4.1 - Dimensional e demais características das paredes definitivas

Parede	Material Id. (Classe)	Dimensões [mm]			Nº de camadas	Massa [kg]	T <sub>D</sub> [kg/h] ( $\eta_d$ [%])	Tempo de deposição [hh:mm]	Corrente média [A]
		Largura	Comprimento	Altura ( $h_{camada}$ )					
1	4 (ER80S-G)	16,3	300	195 (2.8)	70	6,75	2,76 (98,4)	02:27	120
2	5 (ER80S-B2)	16,3	297	207 (2.7)	78	7,31	2,69 (97,1)	02:43	125
3	2 (ER70S-6)	18,0	298	209 (2.4)	86	7,33	2,21 (94,7)	03:19	147
4	3 (G4Si1)	17,3	298	227 (2.6)	88	8,39	2,47 (99,5)	03:24	148
5	6 (ER110S-1)	17,5	298	219 (2.6)	84	8,31	2,62 (99,4)	03:10	163
6	4 (ER80S-G)	16,3	297	226 (2.7)	84	8,04	2,57 (99,1)	03:08	158
7	5 (ER80S-B2)	16,7	297	215 (2.8)	77	7,40	2,48 (98,9)	02:59	154
8	1 (ER70S-3)	16,8	299	225 (2.5)	90	10,05	2,55 (99,3)	3:56	145
9	5 (ER80S-B2)	19,1	307	231 (2.6)	88	10,01	2,54 (99,4)	3:57	148

Em processos de MADA, é de suma importância que haja o registro formal das condições de deposição por meio de monitoramento de sinais elétricos durante o processo. Esse conjunto de registros fornecerá parte do histórico de fabricação de peças e partes, permitindo, por exemplo, futuras investigações de eventuais falhas que as peças possam sofrer em serviço, contribuindo com o processo de qualificação e rastreabilidade da peça depositada.

Assim, no presente trabalho, determinou-se que, durante as deposições, a cada camada, fosse feita aquisição dos sinais elétricos (corrente e tensão) de duração de seis segundos, iniciada, preferencialmente, na metade do comprimento da pré-forma, a uma taxa de aquisição de 6 kHz. Feitas as aquisições de cada camada, eram calculadas e registradas a corrente e a tensão médias, essas utilizadas para efeito de acompanhamento do comportamento desses sinais durante a deposição (Figura 4.4), especialmente a corrente média, a qual varia em função da DBCP, permitindo-se

identificar possíveis defasagens entre o “crescimento” real da peça e o incremento em z regulado, possibilitando intervenções para corrigi-lo em caso de necessidade.

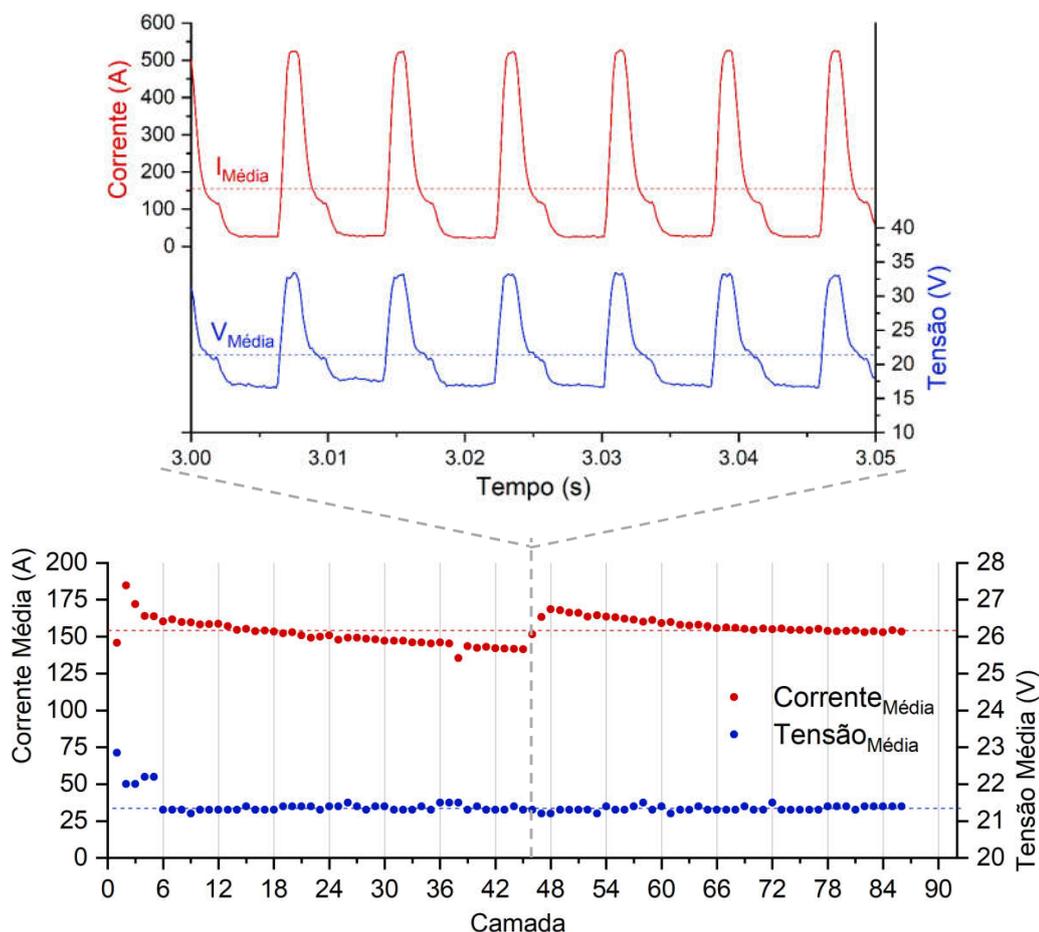


Figura 4.4 - Oscilograma de corrente e tensão da 46<sup>a</sup> camada (acima) e gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) referentes à deposição da pré-forma 3 com o arame-eletrodo 2 (ER70S-6)

É evidente que a aquisição completa e contínua, que compreendesse todo o tempo de deposição das pré-formas, seria o cenário ideal em termos de registro e rastreabilidade. Contudo, dada a elevada frequência de aquisição adotada (6 kHz), para que fosse possível a descrição adequada do formato de onda da transferência em modo pulsado, possibilitando maior confiabilidade nos cálculos de corrente e tensão médias e demais análises a serem feitas, tanto o armazenamento, quanto o posterior tratamento dos dados seriam demasiadamente desafiadores ou, até mesmo,

inviáveis. O histórico de aquisições de sinais elétricos, camada a camada, das demais peças depositadas é apresentado no Apêndice II, nas Figuras de A.8 a A.16.

Nessa etapa, foram encontrados desafios de ordem técnica e metodológica, visto que se tratou da aplicação de uma tecnologia em desenvolvimento. Mesmo contando com a realização de inúmeros pré-testes para levantamento de parâmetros de deposição, um dos maiores desafios foi acertar a programação da trajetória do sistema de movimentação da tocha em relação ao crescimento real da peça: a determinação do incremento vertical entre camadas.

Devido a isso, no item que segue, são descritas as intercorrências enfrentadas no início das deposições, especialmente nas pré-formas 1 e 2, para as quais não há registros fotográficos, e os ajustes metodológicos realizados para que fosse possível contornar os problemas ali apresentados.

#### **4.1.1. Intercorrências e Ajustes Metodológicos**

Em primeiro lugar, expõe-se que, enquanto nos pré-testes o resfriamento era feito ao ar e, conseqüentemente, exigia certo tempo de espera entre as camadas (arco apagado) para que se atingisse a temperatura de interpasse, permitindo o início da próxima camada, nas duas primeiras deposições definitivas, não foi adotado o tempo de espera entre camadas, uma vez que, em se utilizando o RAQI, a temperatura de interpasse era garantida sem que fosse necessário o apagamento do de arco e o tempo de espera entre as camadas.

Tal ação foi procedida com o objetivo de tornar a deposição das paredes mais ágil. Porém, como foi adotado o padrão de deposição bi-lateral, como exposto no Item 3.3.2, houve excessivo acúmulo de calor nas extremidades da peça quando na inversão do sentido de deslocamento da tocha posto que a mesma retornava sobre uma porção já superaquecida de material, ocasionando o aumento demasiado do volume de material fundido, acarretando o colapso da poça e, conseqüentemente, a ocorrência de escorrimentos, como mostra a Figura 4.5.



Figura 4.5 – Registros das extremidades das paredes 1 (à esquerda) e 2 (à direita), depositadas com os arames eletrodos ER80S-G e ER80S-B2, respectivamente

Além deste efeito, ocorreu que, no início das deposições definitivas, foi feita programação do sistema de movimentação (braço robótico) fixando-se o incremento vertical entre camadas no valor definido após a execução dos pré-testes, como apresentado anteriormente na Tabela 3.3.

Assim, durante as primeiras deposições (paredes 1 e 2), notou-se discrepância entre o valor de incremento pré-fixado e o crescimento real das pré-formas, de maneira que, a cada camada, havia o distanciamento gradual da tocha em relação à parede, o que implicou no aumento gradual da DBCP ao longo da deposição.

Essa discrepância pode ser explicada devido ao fato de que, na fase de testes preliminares, as paredes eram menores que aquelas que seriam depositadas nos testes definitivos. Outra hipótese é que, nos testes preliminares, não foi utilizada a técnica de gerenciamento térmico por RAQI. Em adição, tem-se que, como as paredes depositadas na etapa dos pré-testes não passavam de 10 camadas, há a

possibilidade de não se ter alcançado o regime térmico quase-estacionário, dificultando a obtenção de um valor de incremento vertical que fosse condizente com o valor obtido na deposição das paredes definitivas.

Explica-se que, em se tratando de deposições utilizando processo pulsado sinérgico, é sabido que a fonte de soldagem “busca” a manutenção do comprimento de arco tal qual ajustado (variável AL.I), sendo que, o aumento da DBCP acarreta, invariavelmente, o aumento do comprimento livre do eletrodo (*stick-out*), tendo como consequência a diminuição da corrente média, para uma  $V_A$  constante.

Esse comportamento é facilmente observado nos gráficos expostos na Figura 4.6, onde foram fixados incrementos verticais de 2,85 e 2,76 mm para as paredes 1 e 2, respectivamente, enquanto o incremento real calculado após as deposições, com

$$\text{base na } \textit{Incremento Vertical [mm]} = \frac{\textit{Altura média final [mm]}}{\textit{N}^\circ \textit{ de Camadas}}$$

Equação 3.1, foi de 2,79 e 2,65 mm, respectivamente.

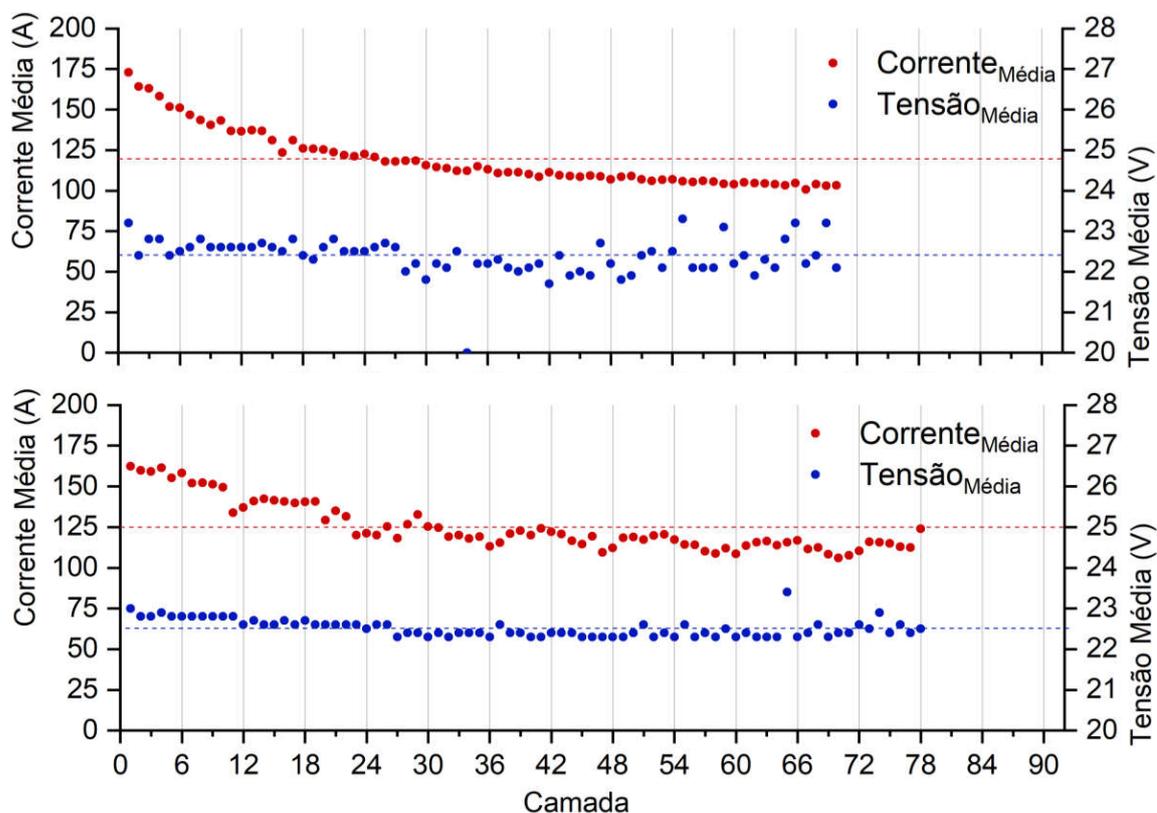


Figura 4.6 – Gráficos de acompanhamento dos parâmetros elétricos de deposição das paredes 1 (acima) e 2 (abaixo), depositadas com os arames-eletrodos ER80S-G e ER80S-B2, respectivamente

Para que fossem contornados os efeitos adversos aqui descritos, houve a necessidade de que a programação do sistema de movimentação fosse modificada.

Relativo ao colapso da poça nas extremidades das paredes, foi incluído na programação um tempo de espera (10 segundos) entre as camadas, permitindo que a porção final da camada recém depositada solidificasse e se resfriasse, permitindo a abertura de arco para que se iniciasse a deposição da camada seguinte.

Já referente à questão da discrepância do incremento vertical, alterou-se a programação de forma que o incremento não mais fosse editado numericamente no corpo do programa, mas atribuindo este valor a uma variável passível de alteração durante a deposição, caso fosse identificada alguma divergência no crescimento real da pré-forma.

Tais modificações foram implementadas e testadas quando na deposição da parede 3, depositada com arame-eletrodo ER70S-6 e, como se nota pela Figura 4.3, o tempo de espera adotado entre as camadas surtiu o efeito desejado, evitando a ocorrência de defeitos e escorrimentos nas extremidades da parede.

Ainda nessa deposição, foi testada a segunda modificação no programa, quando identificada e corrigida divergência no incremento vertical por meio da alteração do valor da variável de incremento durante o tempo de espera entre a 45<sup>a</sup> e a 46<sup>a</sup> camada, como facilmente se percebe na Figura 4.4, regularizando a resposta da corrente nas camadas seguintes.

Salienta-se que, nas deposições seguintes (parede 4 em diante), foram feitas, quando necessárias, alterações mais discretas no valor dessa variável, evitando alterações bruscas nos parâmetros de deposição, como se observa nos oscilogramas e gráficos de acompanhamento das deposições das demais paredes.

#### **4.1.2. Hipótese de Autorregulação do Incremento Vertical**

Aqui, faz-se o registro adicional de que, antes de implementada a modificação no programa do sistema de movimentação relativa ao incremento vertical, nota-se um comportamento quase assintótico da corrente média à medida que eram depositadas as camadas das primeiras paredes (Figura 4.6).

Este efeito sugere a existência de algum grau de “autorregulação” do crescimento real da peça, camada a camada, em função da resposta do processo sinérgico ao incremento pré-fixado no sistema de movimentação.

Em outras palavras, há a chance de que, para um determinado intervalo, a discrepância entre o incremento vertical do sistema de movimentação e o crescimento real da peça seja compensada naturalmente, sem que haja necessidade de intervenção externa (mudança na programação, por exemplo).

Por certo que há razoabilidade nessa hipótese, dado que a corrente é fator preponderante na temperatura da poça de fusão que, por sua vez, influencia diretamente na fluidez do metal fundido. Assim, a diminuição gradativa da corrente média ao longo da deposição acarretaria a diminuição da temperatura da poça, reduzindo a sua fluidez, tornando a camada mais estreita e, por consequência, mais alta, para uma velocidade de deposição efetiva constante (Figura 4.7).

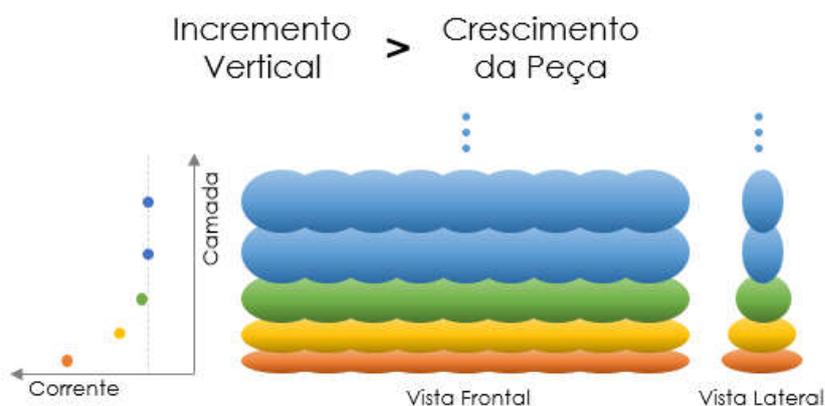


Figura 4.7 - Esquema representando deposição cujo incremento vertical do sistema de movimentação é maior do que o crescimento real da pré-forma

Nesse caso, a recíproca seria verdadeira, ao passo que, caso a pré-forma esteja crescendo mais do que o incremento vertical ajustado, haveria diminuição gradativa da DBCP, elevando a corrente, o que tornaria a poça mais quente e, portanto, mais fluida, aumentando a largura e diminuindo a altura das camadas seguintes (Figura 4.8).

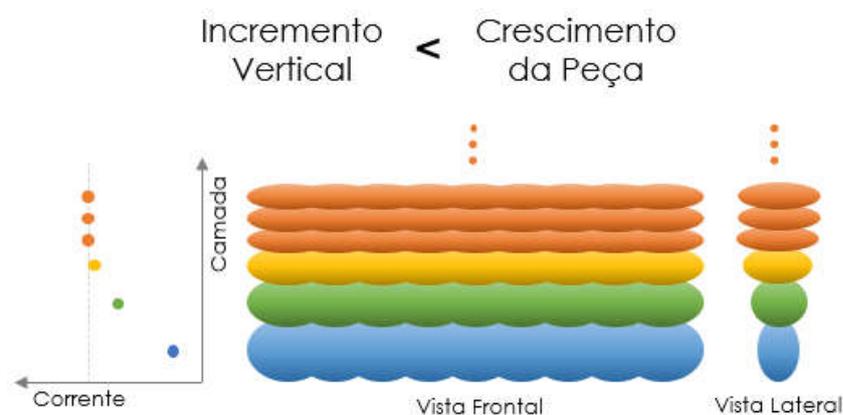


Figura 4.8 - Esquema representando deposição cujo incremento vertical do sistema de movimentação é menor do que o crescimento real da pré-forma

Sendo assim, o resultado, em caso de confirmação dessa hipótese, seria que, em dado momento da deposição, em ambos os casos, as variáveis corrente média e fluidez da poça de fusão tenderiam a convergir a um ponto (assíntota) no qual o processo entraria em equilíbrio, sendo capaz de produzir camadas cujas alturas não mais sofreriam variações significativas dali em diante.

É evidente que as condições de deposição, especialmente aquelas relativas ao gerenciamento térmico, teriam de ser mantidas razoavelmente constantes, caso contrário, ocorreria desarranjo na correlação entre as influências das variáveis citadas na geometria das camadas, alterando as condições de equilíbrio do processo.

Outro aspecto importante a ser considerado quanto à hipótese apresentada, seria o arame-eletrodo utilizado para as deposições, levando em conta que o efeito de variação de corrente e, conseqüentemente, da energia de deposição, em função da variação do comprimento livre do eletrodo seja consequência direta de suas características resistivas, seja a bitola (quanto menor, maior a resistência elétrica por unidade de comprimento do condutor), seja a própria resistividade elétrica, sendo que, em materiais como ligas de alumínio ou cobre (baixa resistividade), tal fenômeno talvez não demonstrasse importância significativa ou, sequer, existiria.

Por fim, faz-se a ressalva de que, embora houvesse razoáveis evidências, a investigação deste fenômeno não estava inclusa no escopo do presente trabalho e, portanto, não foram realizados experimentos com este objetivo, inviabilizando qualquer afirmação ou conclusão sobre a existência e as condições necessárias para a ocorrência da suposta autorregulação.

## **4.2. Ensaaios**

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios realizados nas pré-formas depositadas. Ressalta-se que, embora sejam apresentados os resultados das deposições e ensaios das paredes 1, 2 e 12, depositados com os arames-eletrodos ER80S-G e ER80S-B2, estes não serão considerados para efeito das análises, considerações e conclusões que seguem, uma vez que, devidos às intercorrências citadas, tais resultados, ainda que sendo importantes, não permitiriam a adequada descrição e análise dos processos e fenômenos inerentes ao escopo deste trabalho.

### **4.2.1. Caracterização Química**

A caracterização química das pré-formas depositadas foi realizada por meio de analisador de ligas metálicas portátil XRF Vanta Olympus (Tabela 4.2), com o propósito de estabelecer um comparativo entre a composição química dos arames-eletrodos, que consta nos certificados de composição química emitidos pelo fabricante, para os quais os valores são apresentados na Tabela 4.3.

Esse comparativo é importante pois, por meio dele, podem ser identificadas eventuais divergências entre a composição química do metal de adição e do metal depositado, o que pode contribuir com as análises posteriores em termos da metalurgia e propriedades mecânicas resultantes do processo de deposição.

Com este objetivo, foi realizado o comparativo entre a composição química das paredes e dos seus respectivos metais de adição, apresentado na Figura 4.9, onde são representadas pelas colunas pareadas, as composições químicas medida (à esquerda, com a barra de desvio) e apresentada pelo fabricante (à direita), para cada material testado.

Tabela 4.2 – Composições químicas dos depósitos medidas via analisador químico portátil XRF Vanta Olympus\*

Parede	Id. (Classe)	Fe [%]		Cr [%]		Ni [%]		Si [%]		Mn [%]		Mo [%]		Cu [%]		Sn [%]		P [%]		S [%]		
		Conc.	Erro	Conc.	Erro	Conc.	Erro															
3	2 (ER70S-6)	97.572	0.043	0.000	0.024	0.004	0.000	0.033	1.310	0.026	0.000	0.005	0.125	0.010	0.000	0.045	0.025	0.008	0.000	0.014		
4	3 (G4Si1)	97.133	0.045	0.032	0.006	0.028	0.007	1.105	1.539	0.028	0.004	0.001	0.141	0.011	0.000	0.044	0.017	0.007	0.000	0.014		
5	6 (ER110S-1)	95.392	0.057	0.128	0.008	1.855	0.039	0.535	1.439	0.027	0.330	0.005	0.310	0.016	0.000	0.047	0.010	0.007	0.000	0.026		
6	4 (ER80S-G)	97.351	0.045	0.337	0.011	0.434	0.020	0.582	0.831	0.022	0.000	0.005	0.466	0.018	0.000	0.043	0.000	0.011	0.000	0.014		
7	5 (ER80S-B2)	96.638	0.046	1.260	0.019	0.091	0.010	0.685	0.464	0.021	0.517	0.006	0.307	0.015	0.022	0.007	0.016	0.008	0.000	0.030		
8	1 (ER70S-3)	98.094	0.040	0.024	0.006	<LOD	0.005	0.733	1.005	0.023	<LOD	0.005	0.105	0.010	<LOD	0.044	0.015	0.007	0.024	0.008		

\* Este método de caracterização química não possibilita a quantificação de elementos químicos de baixo número atômico, como carbono (C)

Tabela 4.3 – Composições químicas dos arames-eletrodos fornecidas via certificado de composição química pelo fabricante

Id. (Classe)	C [%]	Cr [%]	Ni [%]	Si [%]	Mn [%]	Mo [%]	Cu [%]	Al [%]	P [%]	S [%]	V [%]	Ti [%]
1 (ER70S-3)	0,077	0,022	0,023	0,591	1,077	0,005	0,027	0,002	0,010	0,009	0,003	N/A
2 (ER70S-6)	0,088	0,022	0,021	0,891	1,457	0,004	0,034	0,026	0,012	0,012	0,003	N/A
3 (G4Si1)	0,086	0,031	0,017	0,906	1,620	0,005	0,023	0,003	0,016	0,010	N/A	N/A
6 (ER110S-1)	0,05	0,170	2,170	0,380	1,48	0,320	0,170	N/A	0,009	0,002	N/A	N/A
4 (ER80S-G)	0,095	0,334	0,458	0,475	0,977	0,003	0,446	0,002	0,011	0,007	0,003	0,001
5 (ER80S-B2)	0,090	1,380	0,100	0,490	0,600	0,480	0,160	N/A	0,006	0,002	N/A	N/A

N/A – Elementos não detectados nas análises químicas do fabricante

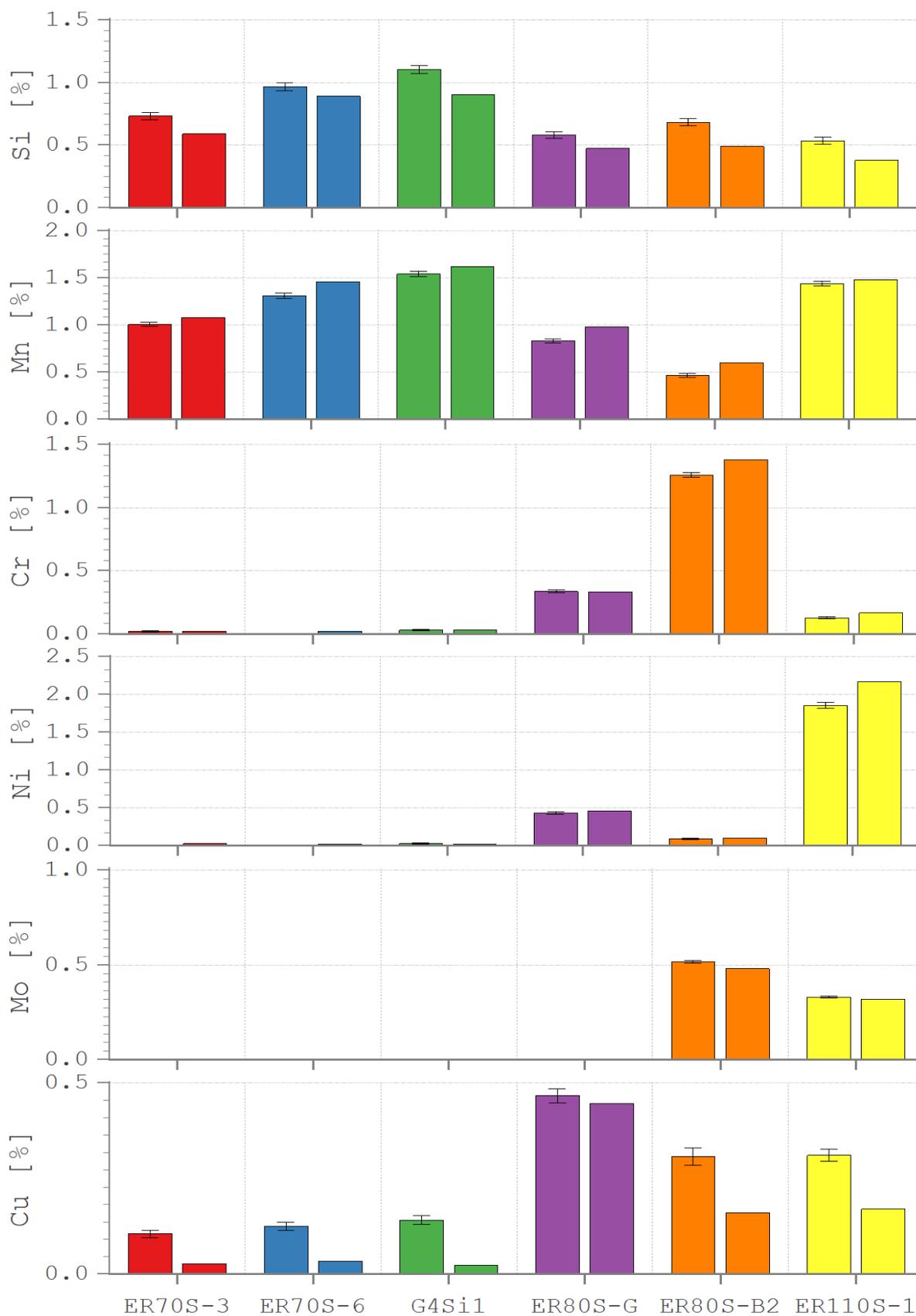


Figura 4.9 – Gráficos comparativos entre as composições químicas medidas nos depósitos e a fornecida pelo fabricante

Faz-se a ressalva de que o presente comparativo foi realizado com relação aos seis elementos químicos de maior relevância nas ligas analisadas, tendo sido excluídos da análise àqueles cujo impacto pode ser desprezado, por serem componentes residuais com teores aquém dos limites máximos permitidos pelas AWS A5.18 e A5.28, como S, P e Al.

Antes que se discuta os resultados apresentados na Figura 4.9, é importante mencionar que era esperado que os teores dos elementos de maior volatilidade, como Si, Mn e Cr, fossem menores nos depósitos, quando comparados com os metais de adição, enquanto que, para os elementos menos voláteis (Ni e Mo), fossem apresentados teores semelhantes.

De fato, os valores encontrados nas medições de composição química dos depósitos, quando se trata dos elementos Mn e Cr (segundo e terceiro gráficos), são inferiores aos valores encontrados nos certificados de composição química, o que vai ao encontro do que se esperava, dado que, quando expostos às altas temperaturas do arco elétrico, por serem mais voláteis, uma parte se vaporiza, se transformando em fumos de solda quando em contato com a atmosfera. Tem-se ainda que, parte da perda de Mn ainda se dê, para além da geração de fumos, pela formação das ilhas não-metálicas solidificadas na superfície do material depositado na forma de óxido.

Em contrapartida, quando se observa a figura citada, os teores de Si (primeiro gráfico) se mostraram significativamente superiores aos encontrados nos certificados de composição química de todos os materiais testados. Este efeito poderia ser explicado caso se atribuísse o “ganho” de silício ao efeito de diluição do substrato. Contudo, tem-se que o substrato foi confeccionado com aço ASTM A36, cujo teor médio de Si varia entre 0,15 e 0,40 % (ASTM A6, 2001), não justificando que tenha havido alguma contribuição, especialmente pelo fato de que as medições de composição química foram realizadas na região central da pré-forma, distante das primeiras camadas, as quais estariam susceptíveis aos efeitos de diluição.

Portanto, para efeito do presente trabalho, atribui-se este efeito a um eventual desvio de calibração do equipamento utilizado para a realização das medições no que tange a medição de Si, uma vez que não foram percebidas medições atípicas em se tratando dos demais elementos.

Quanto aos teores de Ni e Mo, conforme esperado, não houve variação importante entre os depósitos e os arames, com exceção do ER110S-1, o qual apresentou queda na concentração de Ni quando depositado.

Por último, chama atenção que os valores encontrados de Cu pelas medições feitas com o analisador portátil se apresentaram razoavelmente superiores aos valores dos certificados de composição química, o que poderia ser explicado pelo fato de os arames possuírem revestimento cobreado, que, adicionado à poça, contribuiria para o aumento da concentração deste elemento nos depósitos. Faz-se o destaque de que, ainda que se tenha tido um aumento no teor de Cu quando nos depósitos, estes valores se mostraram abaixo de 0,5%, limite máximo admitido pelas normas de fabricação (AWS A5.18 e A5.28, 2005), as quais consideram inclusive o Cu contido no revestimento dos arames.

Faz-se a ressalva de que, o presente comparativo foi realizado com o objetivo de simples direcionamento teórico em caso de haver a necessidade de se recorrer a estes aspectos como forma de justificar potenciais comportamentos adversos no decorrer das análises dos ensaios mecânicos que seguem, posto que, para que fosse estabelecida a comparação adequada entre a composição química das paredes e dos arames-eletrodos, seria desejável que fossem feitas as medições de ambas pelo mesmo método/equipamento, o que não foi possível neste trabalho, dados os recursos disponíveis.

#### **4.2.2. Ensaio de Tração**

Conforme apresentado anteriormente, foram extraídos corpos de prova em duas orientações distintas da pré-forma: direção de deposição (horizontal) e direção de construção (vertical), a fim de verificar a possível existência de anisotropia nos materiais resultantes de deposição por MADA. A Figura 4.10 traz imagens de um corpo de prova sendo submetido ao ensaio no Laprosolda, desde o início, passando pela estrição, até a ruptura.

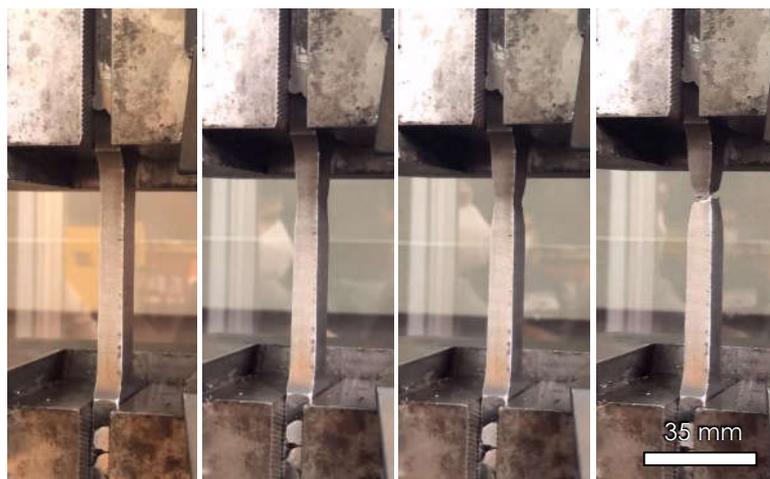


Figura 4.10 – Amostra submetida ao ensaio de tração

Os ensaios foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios nas dependências do Laprosolda, em regime de deslocamento constante, qual seja, de 1 mm/min. A Figura 4.11 traz as curvas de tensão versus deformação das amostras extraídas da parede 3 (ER70S-6). Nesse gráfico, assim como nos demais, as curvas em azul representam o comportamento das amostras extraídas na direção de construção (V), enquanto as curvas em vermelho, o comportamento das amostras retiradas na direção de deposição (H).

Em adição, ainda sobre essa figura, salienta-se que o ponto cinza ( $\epsilon$ ) localizado junto ao eixo das abscissas representa o alongamento mínimo, assim como as linhas tracejadas em cinza ( $\sigma_y$  e  $\sigma_u$ ) representam os mínimos requeridos para tensão de escoamento e limite de resistência, respectivamente, estabelecidos pela norma de fabricação do referido metal de adição (AWS A5.18, no caso do arame-eletrodo de classe ER70S-6). As curvas dos ensaios de tração referentes às demais pré-formas depositadas são apresentadas no Apêndice III nas Figuras de A.17 a A.25.

Isto posto, apresenta-se os resultados dos ensaios de tração na Tabela 4.4, na qual se observa que, considerando-se as observações de rodapé,

em se tratando de tensão de escoamento, apenas os ensaios das amostras retiradas das paredes 2, 7 e 9, todas elas depositadas com arame-eletrodo da classe ER80S-B2, obtiveram resultados superiores ao requisito fixado por sua respectiva norma de fabricação.

Tabela 4.4 - Resultados obtidos nos ensaios de tração<sup>(a,b)</sup>

Parede (Material de Adição)	Orientação dos CP's	Limite de Escoamento <sup>c</sup>			Limite de Resistência			Elongamento [%]		
		Unit.	Média	Desvio Padrão	Unit.	Média	Desvio Padrão	Unit.	Média	Desvio Padrão
1 (ER80S-G)	Verticais	428	432	5	559	566	16	43,3	42,3	0,9
		431			555			42,0		
		437			584			41,6		
	Horizontais	409	414	7	549	552	4	45,4	45,3	0,0
		418			554			45,3		
		d			d			d		
2 (ER80S-B2)	Verticais	d	-	-	d	-	-	d	-	-
		d			d			d		
		d			d			d		
	Horizontais	699	601	85	730	743	30	20,4	24,6	3,8
		549			722			25,5		
		554			778			27,8		
3 (ER70S-6)	Verticais	369	378	8	502	518	14	36,5	33,1	3,7
		383			526			29,2		
		383			525			33,8		
	Horizontais	384	376	9	516	508	8	34,2	34,4	1,2
		366			500			33,4		
		377			508			35,7		
4 (G4Si1)	Verticais	424	422	2	591	590	2	31,6	30,9	0,8
		421			592			30,9		
		420			587			30,1		
	Horizontais	442	431	10	597	587	8	27,2	27,3	0,2
		426			582			27,5		
		424			582			27,2		
5 (ER110S-1)	Verticais	503	497	17	624	619	13	27,0	26,5	0,9
		478			605			26,8		
		511			630			25,3		
	Horizontais	537	524	18	643	632	12	24,7	25,2	0,9
		504			620			24,7		
		531			634			26,2		
6 (ER80S-G)	Verticais	374	367	6	501	495	5	29,8	28,7	1,1
		363			492			27,7		
		364			493			28,5		
	Horizontais	376	378	2	507	508	1	27,4	28,9	2,6
		378			509			31,9		
		379			507			27,5		
7 (ER80S-B2)	Verticais	536	538	19	689	698	16	20,8	21,2	1,0
		520			688			22,4		
		557			717			20,5		
	Horizontais	556	544	10	741	687	38	19,0	20,4	1,8
		538			668			22,4		
		537			684			19,7		
8 (ER70S-3)	Verticais	331	328	7	450	444	8	30,9	32,0	1,7
		320			435			31,2		
		333			447			33,9		
	Horizontais	338	338	4	445	445	5	30,2	31,0	4,8
		335			440			26,6		
		343			449			36,1		
9 (ER80S-B2)	Verticais	544	547	4	734	745	16	24,9	19,6	7,5
		545			e			e		
		551			757			14,3		
	Horizontais	556	550	8	633	676	61	e	25,5	-
		e			e			e		
		545			719			25,5		

a – Não se tem referência direta nas normas para os valores marcados em cinza, tendo estes de ser definidos entre o cliente e o fornecedor (fabricante)

b – Valores em **negrito** estão acima dos mínimos requeridos pelas respectivas normas

c – Para os casos (ensaios) em que a região de escoamento não se mostra bem definida no gráfico Tensão x Deformação, os limites de escoamento foram determinados utilizando-se o Método do Offset (ASTM E8M:2015).

d - CP's perdidos na operação de corte a água

e – Resultados inconsistentes devido a intercorrências na execução dos ensaios

Em contrapartida, as amostras retiradas das paredes 1 (ER80S-G), 2 (ER80S-B2) e 3 (ER70S-6) obtiveram valores superiores aos requeridos pelas normas de fabricação (AWS A5.28, para os dois primeiros e A5.18 para o último).

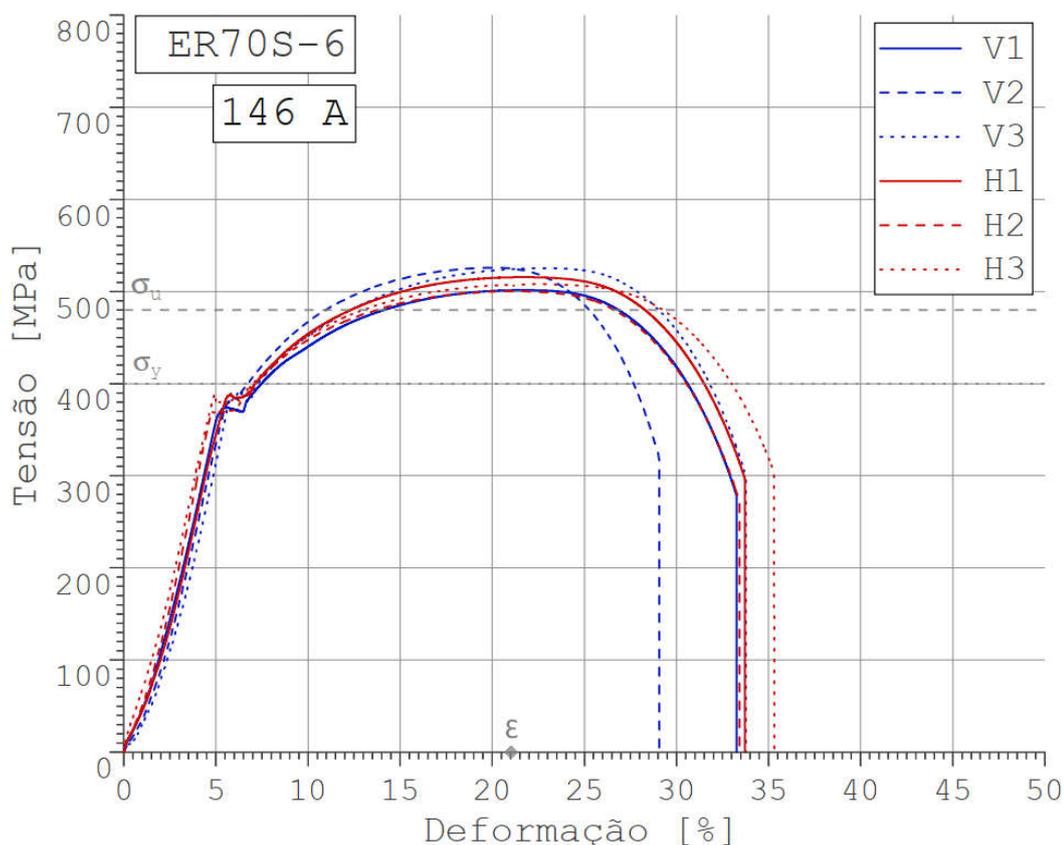


Figura 4.11 - Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 3, depositada com o arame-eletrodo 3 (ER70S-6)

Quando se trata de alongamento, todos os ensaios apresentaram valores substancialmente superiores aos requeridos pelas normas de fabricação, com exceção daqueles os quais não possuem requisitos normativos explícitos (classes G4Si1 e ER80S-G), tendo estes de ser acordados entre cliente e fabricante. Isso demonstra a significativa capacidade dos materiais resultantes deste tipo de deposição de se deformarem plasticamente.

Como forma de se estabelecer o comparativo entre a resposta mecânica destes materiais, as Figuras Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14, trazem os gráficos de tensão de escoamento ( $S_y$ ), limite de resistência ( $S_u$ ) e alongamento ( $e$ ), respectivamente, em função dos materiais envolvidos. Pondera-se que, tanto nos

comparativos a seguir, quanto nas análises estatísticas posteriores, foram considerados apenas os resultados das amostras retiradas das paredes cujas deposições tenham sido realizadas segundo a metodologia proposta, tendo sido excluídos os resultados obtidos pelos ensaios das paredes 1, 2 e 9, devido às, já mencionadas, intercorrências enfrentadas.

O primeiro aspecto que chama a atenção ao se observar estes gráficos, é o fato de que todos os materiais testados apresentaram reduzido grau de anisotropia quando submetidos aos ensaios de tração, tanto para a tensão de escoamento, quanto para o limite de resistência e alongamento.

Outro fato importante de se pontuar, é o desempenho mecânico do material de classe ER80S-B2, que, além de ter sido a única liga a obter valores superiores aos requeridos pela sua respectiva norma de fabricação ( $S_y = 470$  e  $S_u = 550$  MPa), tenha superado o desempenho do depósito feito com material de classe de resistência superior, o ER110S-1. Isso pode ser explicado pelos elevados teores de Cr (1,5 %) e Mo (0,5 %) contidos nessa liga, elementos que favorecem a formação de meta-fases de elevada resistência, com a bainita (Vieira, 2007).

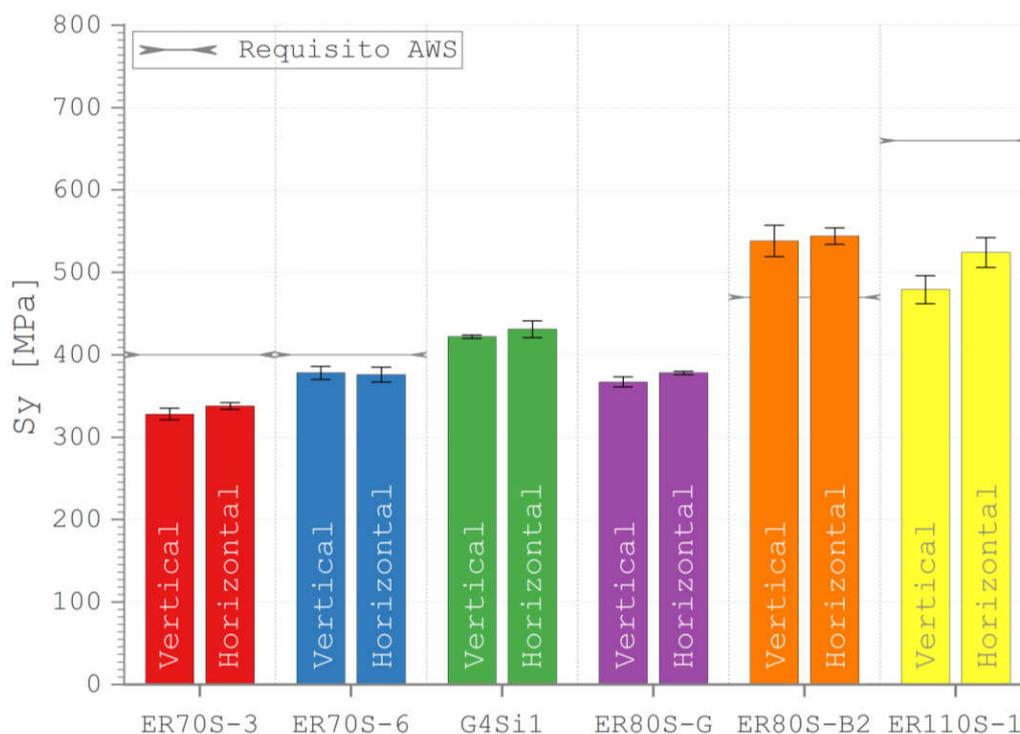


Figura 4.12 – Resultados comparativos de tensão de escoamento dos materiais depositados

Sobre os resultados apresentados pelos ensaios do ER110S-1, comenta-se que, comparado aos requisitos normativos ( $S_y = 660$  e  $S_u = 760$ ), houve significativa perda de resistência quando depositado. Este efeito pode encontrar explicação também por sua composição química. Sendo um material com elevado teor de Ni (2 %), quando comparado com os demais, a imposição de sucessivos ciclos térmicos, devido à deposição de camada sobre camada, pode ter favorecido a formação de ferrita acicular em detrimento de outras fases, acarretando a perda de resistência e ganho de ductilidade do metal depositado.

Comportamento semelhante foi notado no depósito realizado com o arame-eletrodo da classe ER80S-G, cuja tensão de escoamento e limite de resistência se mostraram aquém do que se esperava, além de ter apresentado valores de alongamento que demonstram ganho de ductilidade.

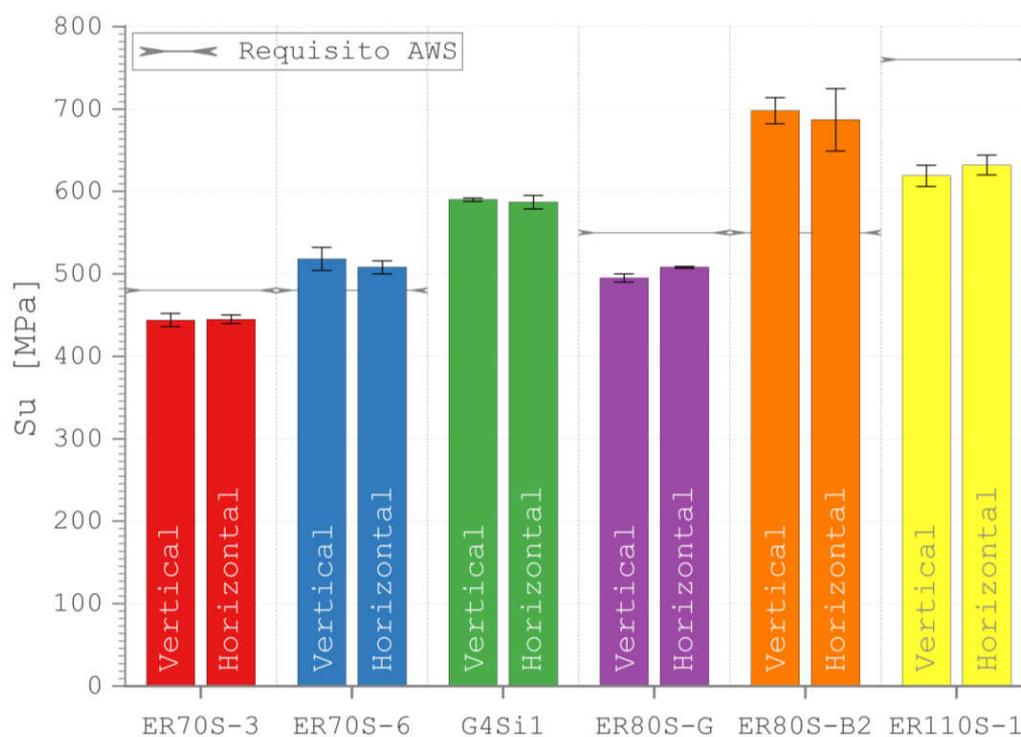


Figura 4.13 – Resultados comparativos de limite de resistência dos materiais depositados

Quanto às ligas das classes ER70S-3, ER70S-6 e G4Si1, houve respostas mecânicas relativamente previsíveis nos ensaios de tração. Isso pois se trata de materiais semelhantes, possuindo como principais elementos de liga o Si e o Mn. Este

primeiro elemento confere ao metal de adição maior molhabilidade e maior capacidade de desoxidação durante o processo de deposição, enquanto o segundo é responsável por conferir maior resistência mecânica sem que seja comprometida a soldabilidade.

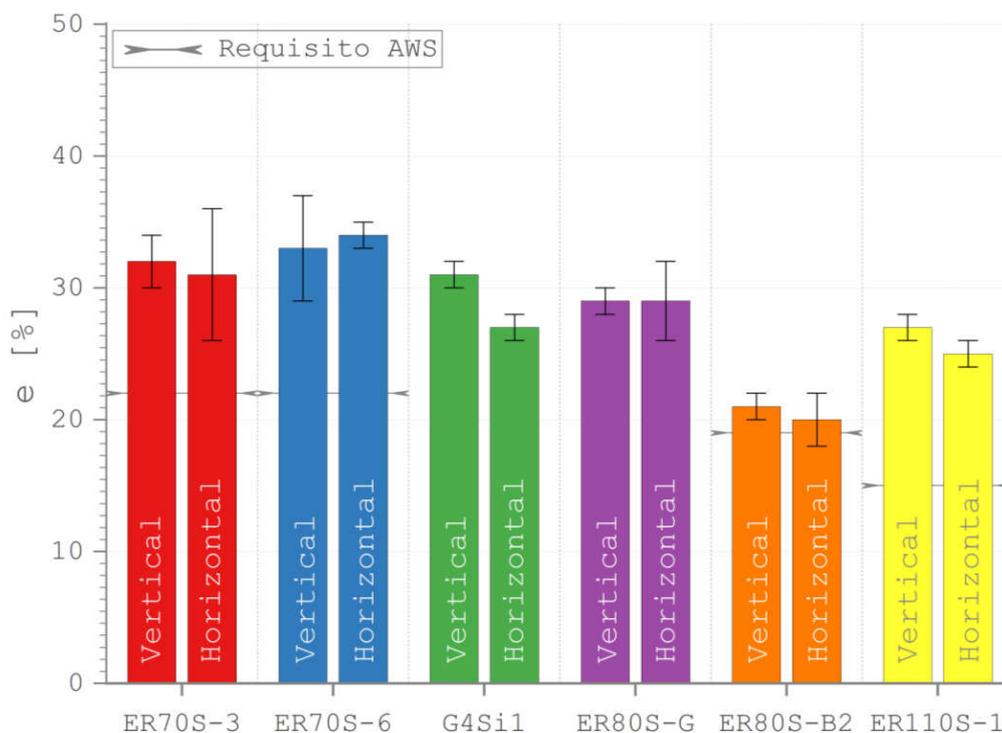


Figura 4.14 – Resultados comparativos de alongamento dos materiais depositados

Uma vez que os teores de Mn são maiores no G4Si1, intermediários no ER70S-6 e menores no ER70S-3, há coerência nos resultados encontrados, dado que, dentre estes três materiais, quanto maior o teor deste elemento, maiores foram as tensões de escoamento e limites de resistência. Comenta-se em adição que houve relativa perda de resistência dos arames ER70S-3 e ER70S-6, quando comparados com seus respectivos requisitos normativos, que pode ser igualmente explicada pela imposição de sucessivos ciclos térmicos característicos de deposições à arco, acarretando o refino da microestrutura e o alívio das tensões internas.

Em complemento, como forma de se aprofundar as análises do presente trabalho, além de permitir a identificação da influência e interação das variáveis envolvidas nos resultados obtidos nos ensaios de tração, foi conduzida análise de variância (ANOVA) fatorial, adotando-se intervalo de confiança de 95%, cujos resultados são expostos a seguir pelas Figuras Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.18.

O primeiro resultado da análise, apresentado na Figura 4.15, se mostra redundante em face do que já se discutiu até aqui, de que as respostas mecânicas observadas para cada material testado se mostraram estatisticamente diferentes, tendo como resultado um nível de significância estatística ( $p$ ) próximo de zero (menos que 0,05, portanto), conforme esperado.

Já o segundo resultado, exposto na Figura 4.16, é de suma importância para que se possa atestar a influência exercida pela orientação de extração dos corpos de prova nos resultados de tensão de escoamento, limite de resistência e alongamento obtidos nos ensaios. Nesse caso, em se tratando das respostas de limite de resistência ( $S_u$ ) e alongamento ( $e$ ), as análises retornaram níveis de significância de 0,6639 e 0,2449, respectivamente, demonstrando o fato, anteriormente discutido, de que a orientação das amostras não exerce influência estatisticamente significativa nessas variáveis de saída, atestando que há bom nível de isotropia nos materiais resultantes das deposições. Em contrapartida, o que se observa no gráfico da tensão de escoamento é diferente.

Chama atenção, na Figura 4.16, o índice  $p$  quando se toma o limite de escoamento, calculado em 0,0105, ou seja, abaixo de 0,05, mostrando que existe influência da orientação dos corpos de prova nessa variável de resposta. Este resultado é interessante pois revela um aspecto importante quando se trata de peças fabricadas por MADA.

Como se verá mais à frente, é possível identificar macroscopicamente nas pré-formas duas regiões distintas metalurgicamente, quais sejam: as Zonas Afetadas pelo Calor (ZAC's) e as Zonas Refundidas (ZR's). Essas duas regiões, por possuírem características distintas em termos de refino de grãos e fases predominantes em cada uma, apresentam como consequência comportamentos mecânicos igualmente distintos.

Sendo a tensão de escoamento a indicação de que, a partir dali, se inicia o processo de deformação plástica, devido à movimentação de discordâncias na rede cristalina do material, é natural que haja uma dessas regiões que esteja mais susceptível a esse tipo de movimentação, onde se iniciará a fase de deformação plástica antes que a segunda região tenha saído da fase elástica.

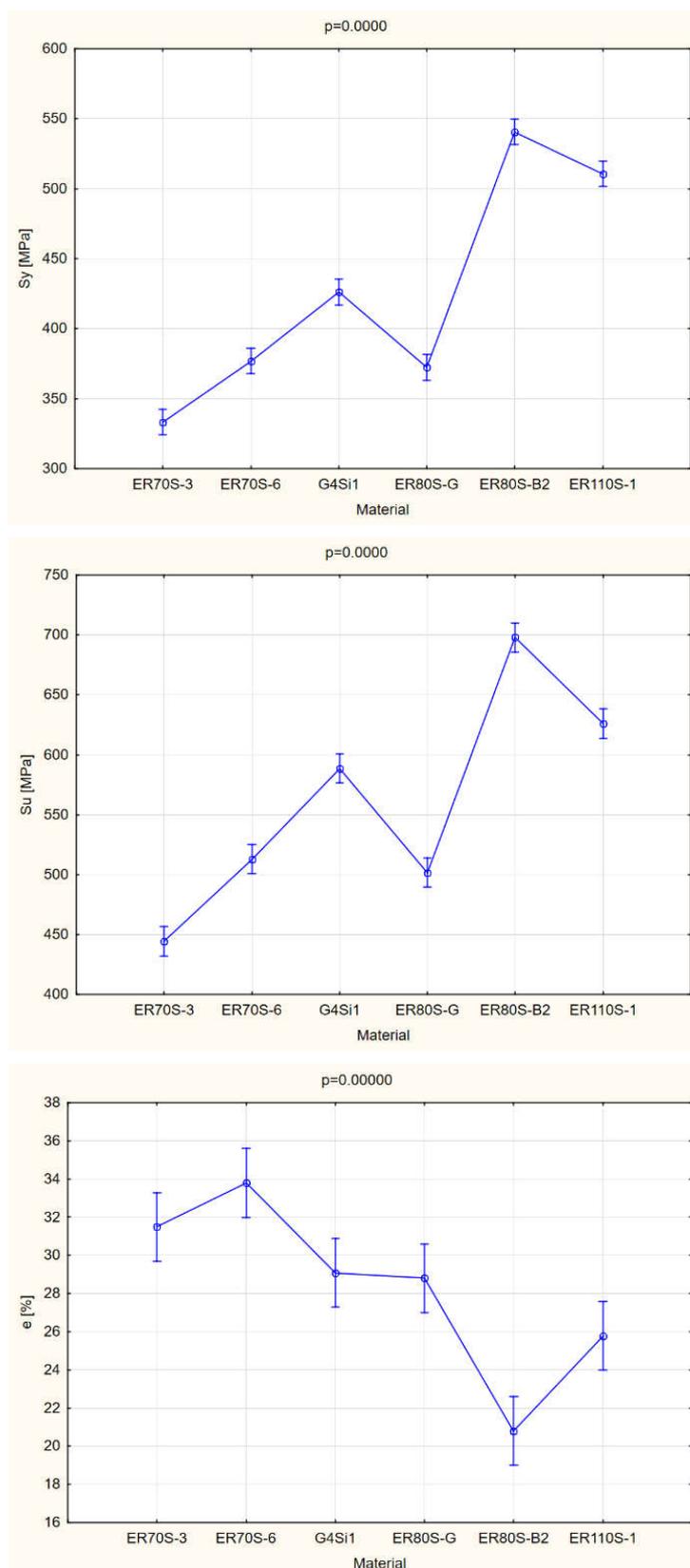


Figura 4.15 – ANOVA da influência do material de deposição nas respostas de tensão de escoamento ( $S_y$ ), limite de resistência ( $S_u$ ) e alongamento ( $e$ )

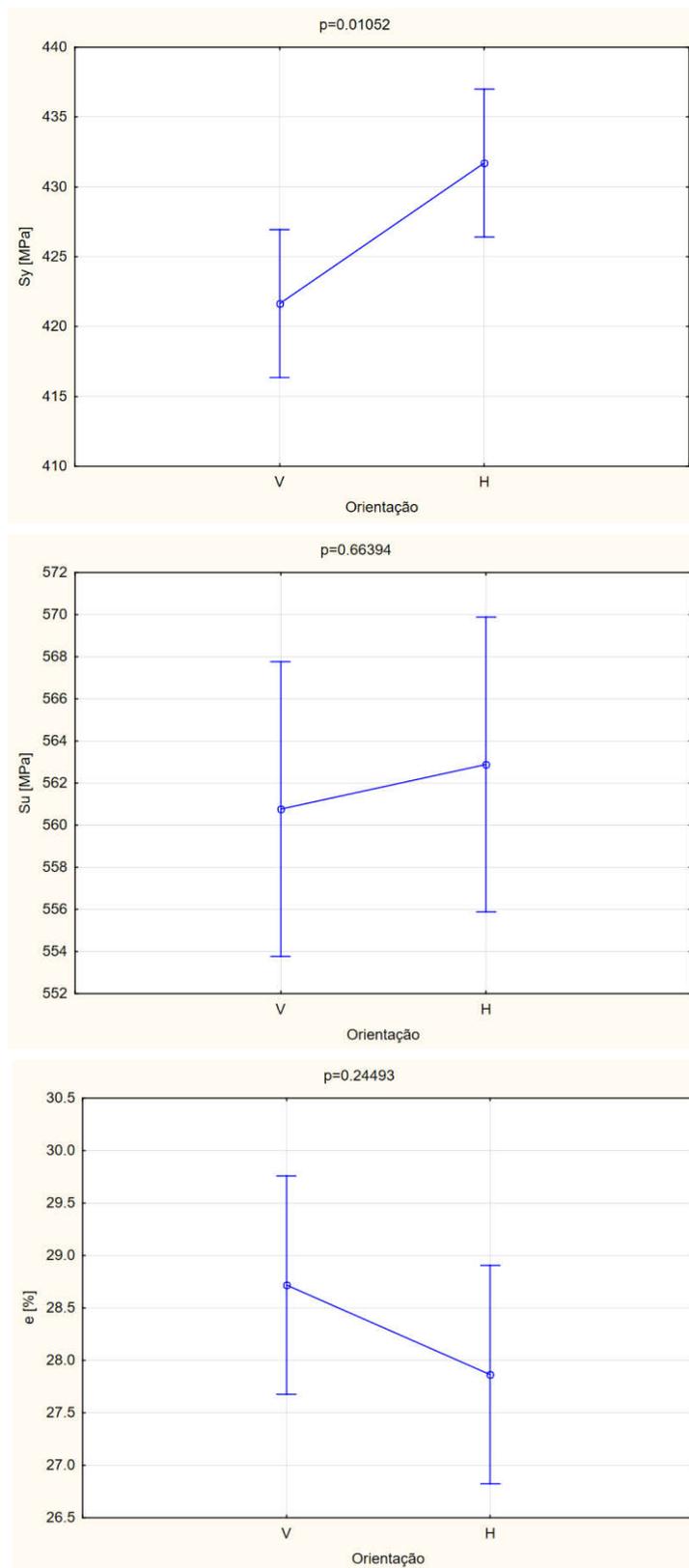


Figura 4.16 - ANOVA da influência da orientação dos corpos de prova (verticais-V ou horizontais-H) nas respostas de tensão de escoamento ( $S_y$ ), limite de resistência ( $S_u$ ) e alongamento ( $e$ )

Em contrapartida, dado que as amostras horizontais possuem sua secção transversal composta de ambas as regiões, considerando que a direção do esforço estaria alinhada às camadas, ocorreria o início da movimentação de discordâncias igualmente distribuído na direção do comprimento do CP, independentemente da região na qual se iniciasse.

Este efeito pode ser percebido na Figura 4.17, na qual é possível observar discretas ondulações na aresta do CP vertical, indicando a heterogeneidade da deformação ao longo da secção reduzida, enquanto que no horizontal, a deformação apresentada se mostra de forma homogênea.

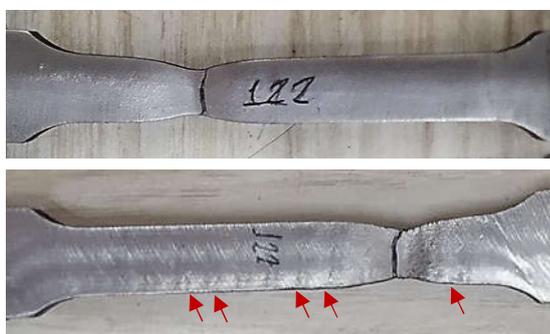


Figura 4.17 – Corpos de prova horizontal (acima) e vertical (abaixo) extraídos da parede 9 depositada com arame-eletrodo ER80S-B2

Todavia, faz-se a ressalva de que, mesmo se havendo influência estatisticamente significativa da orientação dos CP's na tensão de escoamento, há, neste caso, de se ponderar o que é correlação entre as variáveis e o que é efeito prático, posto que as variações encontradas entre os resultados dos CP's horizontais e verticais de todos os materiais testados, embora existam, não chegam a 5% de diferença (caso de variação mais relevante: parede 6, ER110S-1,  $S_y$ ), valor que, na prática, em termos de dimensionamento, por exemplo, não se mostra relevante para a maioria das aplicações.

Sendo assim, é importante considerar que não há como afirmar, por exemplo, com base no resultado obtido nessa ANOVA, que há grau relevante de anisotropia nos materiais testados quanto à tensão de escoamento.

Por último, a Figura 4.18 traz os resultados da ANOVA feita com objetivo de se identificar se há “interferência” da variável Material na influência exercida pela variável Orientação (e vice-versa) nas respostas ( $S_u$ ,  $S_y$  e  $e$ ). Como se nota pelos índices p

calculados (todos significativamente superiores a 0,05), não houve interação entre as variáveis de entrada nas respostas obtidas.

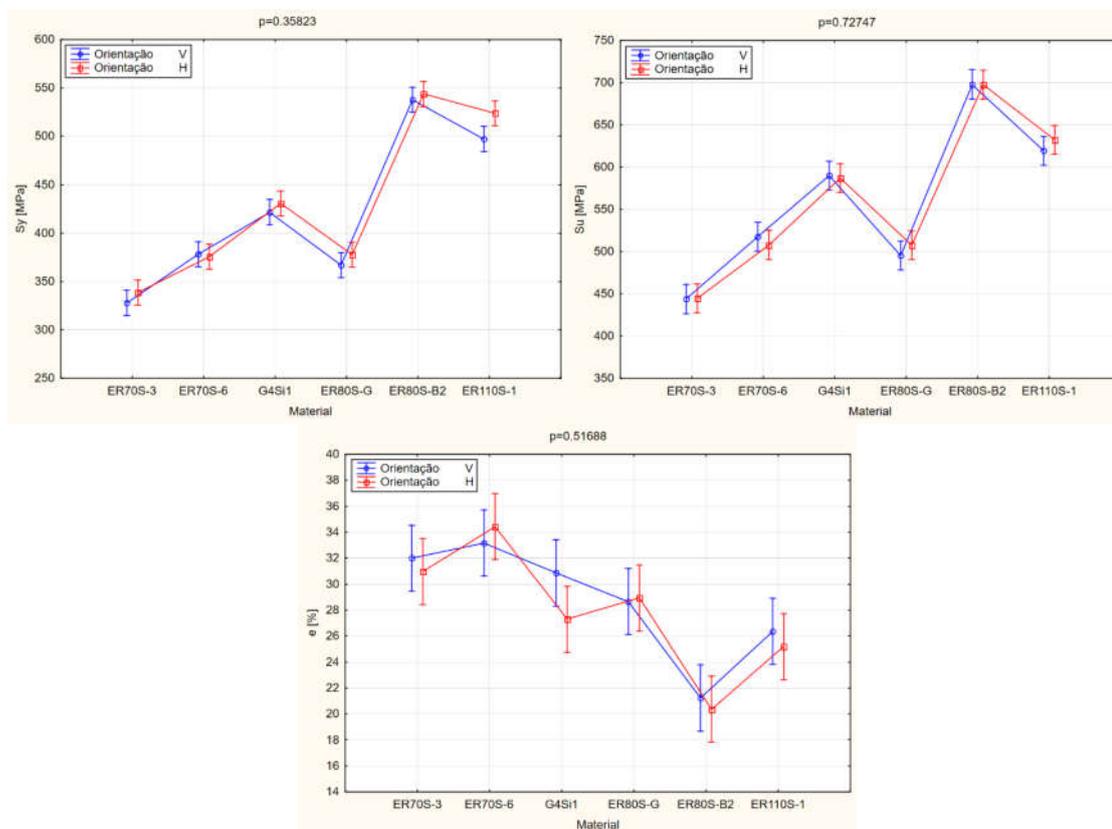


Figura 4.18 – ANOVA da interação entre as variáveis de entrada (Material e Orientação) nas respostas de tensão de escoamento (Sy), limite de resistência (Su) e alongamento (e)

#### 4.2.2.1. Hipótese de Relação de Dependência da Resposta Mecânica em Relação aos Parâmetros de Deposição

Em complemento às análises acerca dos resultados obtidos nos ensaios de tração, é interessante observar na Tabela 4.4 que as amostras retiradas das paredes 1 e 2, depositadas com os arames-eletrodos ER80S-G e 80S-B2, apresentaram resultados de tensão de escoamento e limite de resistência significativamente superiores àqueles encontrados nos ensaios realizados com as paredes 6 e 7, depositadas com os mesmos metais de adição.

Comenta-se que, embora indesejado, este efeito permitiu que fosse levantada a hipótese de que haja relação entre a corrente média de deposição (energia de deposição) e as propriedades mecânicas de determinados materiais, quando depositados, dado que, conforme explanado no Item 4.1.1, houve intercorrências nas deposições das paredes 1 e 2, as quais tiveram como consequência a redução da corrente média durante o processo, corroborando com as constatações de Eriksson et al. (2018) e Ermakova et al. (2020).

Dessa forma, conforme apresentado na Tabela 4.1, as correntes médias dessas primeiras deposições foram de 120 e 125 A, enquanto que, nas repetições subsequentes (paredes 6 e 7), as correntes médias permaneceram estáveis durante o processo, sendo de 158 e 154 A, respectivamente, dentro dos limites estabelecidos pela metodologia proposta.

É sabido que, para níveis de tensão ( $V$ ) e velocidade efetiva de deposição ( $V_{De}$ ) constantes, a redução da corrente média acarreta queda na energia de deposição, o que interfere diretamente nas velocidades de aquecimento e resfriamento (ciclos térmicos) do material.

Em se tratando de ligas transformáveis, como no presente trabalho, a mudança nos ciclos térmicos aos quais o material é submetido, interfere nas características metalúrgicas dos materiais depositados e, conseqüentemente, nas suas propriedades mecânicas. Por exemplo, maiores energias de deposição implicariam em maior susceptibilidade à recristalização e crescimento de grãos, podendo contribuir no alívio de tensões previamente acumuladas nas camadas anteriores, acarretando a perda de resistência e ganho de ductibilidade.

Contudo, explicita-se que, para que fosse realizada análise adequada deste fenômeno, necessitar-se-ia da elaboração de um planejamento experimental no qual houvesse o controle das variáveis envolvidas, o que não foi o caso, visto que a presente discussão se origina de um “acidente metodológico”.

Em adição, para melhor explicação do fenômeno, teria de haver maior aprofundamento nas análises destes resultados, especialmente acerca dos aspectos metalúrgicos dos materiais envolvidos, o que não ocorreu neste trabalho, dada a escassez de tempo, visto que tal discussão não estava incluída em sua proposta.

### 4.2.3. Ensaios de Dobramento

Os ensaios de dobramento foram realizados com o fim de avaliar a integridade estrutural do metal depositado. A Figura 4.19 traz imagens de um corpo de prova sendo submetido a um ensaio de dobramento nas dependências do Laprosolda, desde o início, até o momento final, no qual as abas são dobradas até 180° uma em relação a outra.

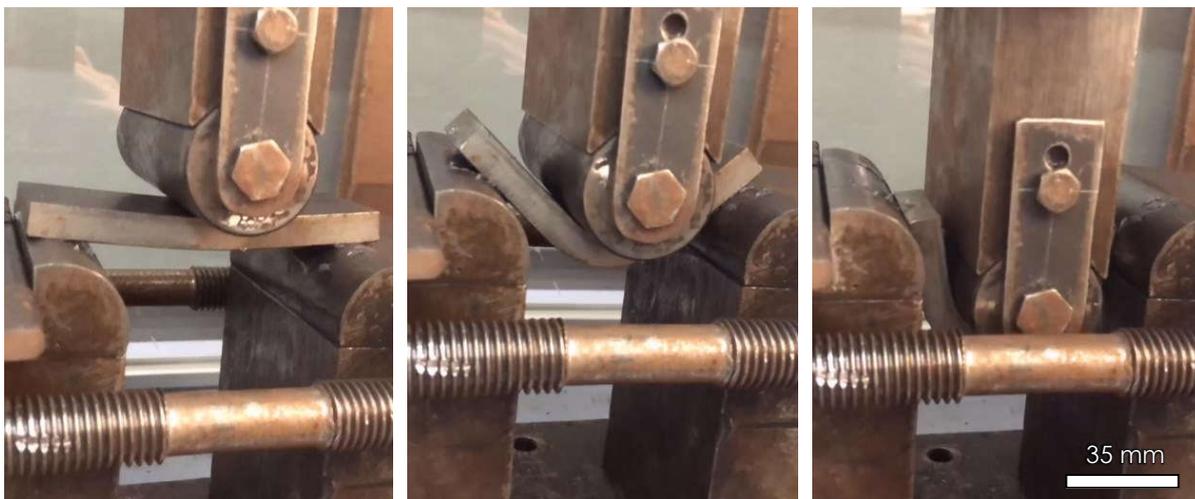


Figura 4.19 - Amostra submetida ao ensaio de dobramento

Registra-se que os materiais ensaiados, de maneira geral, obtiveram resultados satisfatórios neste ensaio, tendo sido aprovadas a maioria das amostras. Os registros fotográficos de todas as amostras ensaiadas se encontram no Apêndice IV, nas Tabelas de A.1 a A.8, onde podem também ser observadas as situações que seguem.

A Figura 4.20 apresenta o resultado do CP4 (vertical), aprovado no ensaio de dobramento, extraído da parede 2, onde é possível observar que as altas tensões as quais o CP foi submetido fizeram com que fossem reveladas as marcas de deposição inerentes da trajetória de deposição adotada (oscilações transversais da tocha em relação à direção de deposição), o que demonstra heterogeneidade em termos de resistência mecânica entre as zonas afetadas pelo calor e as zonas refundidas.



Figura 4.20 - Marcas da trajetória de deposição evidenciadas na face inferior do CP 4 da parede 7, depositada com arame-eletrodo 5 (ER80S-B2).

Conforme se observa na Figura 4.21, o CP4 da pré-forma 4 foi reprovado devido à existência de trinca pré-existente, surgida ainda durante a deposição. Confirma-se a pré-existência da trinca pelo aspecto da superfície da fratura, a qual apresenta coloração típica de oxidação ocorrida anteriormente à execução do ensaio.



Figura 4.21 - Aspecto da fratura ocorrida durante ensaio de dobramento no CP4, extraído da pré-forma 4, depositada com arame-eletrodo 3 (G4Si1)

Da mesma forma, houve reprovação do CP4 da pré-forma 5, no qual também há indício de que a descontinuidade, embora menor que no ensaio anterior, tenha ocorrido devido à pré-existência de trinca surgida durante a deposição, devido ao aspecto oxidado da superfície da fratura, como apresentado na Figura 4.22. É pertinente pontuar a elevada ductilidade apresentada pelo referido material, posto que, mesmo na presença de relevante descontinuidade de canto, houve considerável resistência à propagação da trinca ao longo da largura da amostra.



Figura 4.22 – Abertura lateral a partir da borda da amostra (próxima da extremidade da parede) ocorrida durante ensaio de dobramento no CP4, extraído da pré-forma 5, depositada com arame-eletrodo 6 (ER110S-1)

Expõe-se que estas ocorrências se deram em outras paredes escopo do presente trabalho e acredita-se que estejam relacionadas principalmente com a existência de descontinuidades (faltas de fusão) decorrentes de aberturas de arco, formando-se invariavelmente a partir das extremidades da peça, propagando-se à medida que se acumulavam tensões residuais intrínsecas do processo de solidificação e resfriamento da peça.

Em tempo, registra-se que o CP4 da pré-forma 2 (ER80S-B2) foi perdido na operação de corte a água, tendo sido ensaiados apenas três amostras, sendo duas extraídas na direção de deposição e apenas uma na direção de construção, bem como o CP4 (vertical) da pré-forma 9 (ER80S-B2), tendo sido ensaiadas duas amostras na direção de deposição e uma na direção de construção. Destaca-se em complemento que não foram feitos ensaios de dobramento da pré-forma 7.

O critério de aceitabilidade utilizado para os pareceres é disposto no item 6.10.3.3 da norma AWS D1.1 (2020). Tem-se ainda que o dispositivo e, conseqüentemente, os diâmetros dos cutelos utilizados na condução dos testes de dobramento, igualmente, foram determinados com base nos critérios expostos na Figura 6.11 da referida norma.

#### 4.2.4. Ensaios Charpy

Os ensaios Charpy foram conduzidos com base na ASTM A370 (2020), enquanto o requisito de temperatura foi definido com base na AWS A5.28 (2005) para materiais da classe ER110S-1, o mais severo entre os requisitos de temperatura dos materiais testados, o qual requiere a temperatura de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a fim de possibilitar a comparação entre os resultados de resistência ao impacto dos materiais testados.

Aqui, faz-se importante o destaque de que, em relação aos corpos de prova dos ensaios Charpy, optou-se por fabricar os entalhes em direção paralela ao eixo  $y$  de deposição, visando atingir uma região homogênea com menor probabilidade de ocorrência de descontinuidades possivelmente geradas a partir das ondulações superficiais (*waviness*) intrínsecas de peças fabricadas por MADA, como mostrado na Figura 4.23.

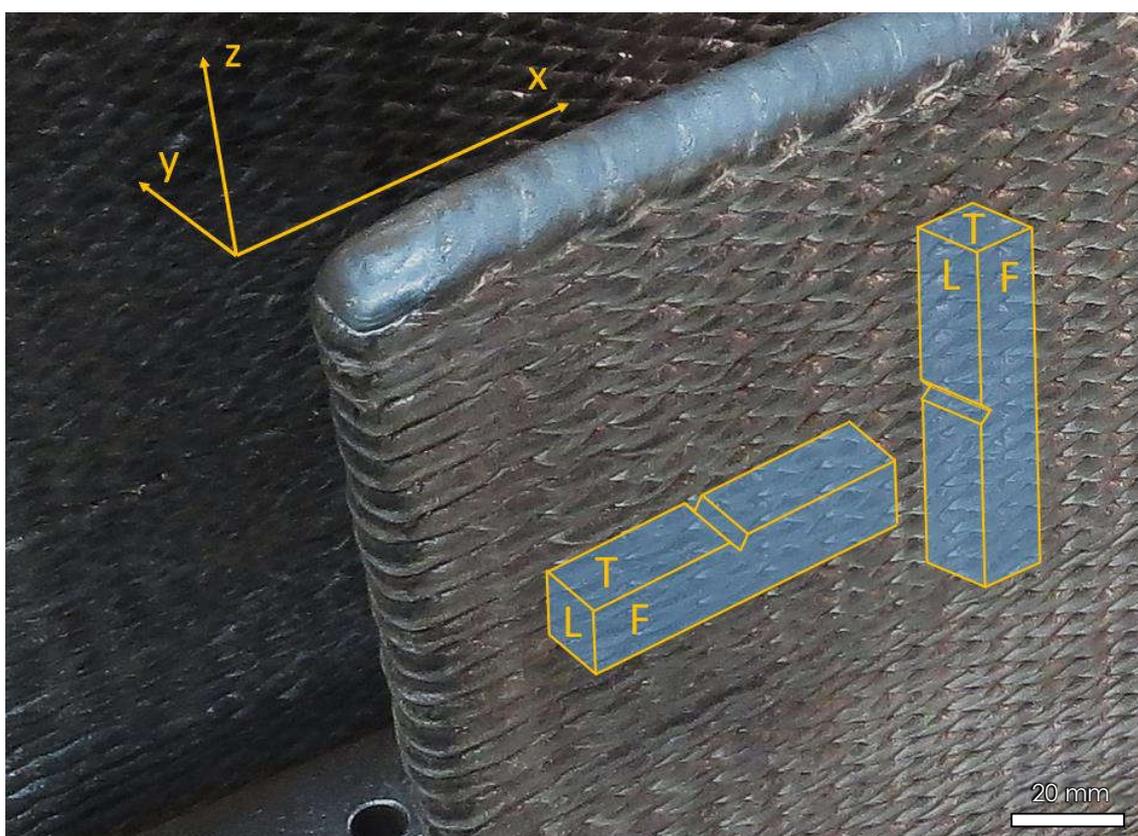


Figura 4.23 - Representação gráfica da orientação de fabricação dos entalhes, onde T representa o topo das amostras (plano  $xy$ ), F, a face ( $xz$ ) e L, a lateral ( $yz$ )

É pertinente observar que, nas primeiras seis pré-formas depositadas, o número de amostras extraídas para os ensaios Charpy foi reduzido, devido ao fato de que a diagramação possível não permitia a obtenção de um maior número de CP's, dado que a geometria das amostras de tração nessas paredes era de maior dimensão inicialmente. Essa questão foi contornada nas duas últimas paredes, com a adoção de nova geometria dos CP's de tração (*Subsize Specimen*, conforme discutido no Item 4.1), permitindo a extração de duas amostras Charpy em cada direção.

Os resultados dos ensaios de impacto Charpy estão expostos na Tabela 4.5 e, como é possível notar, Tabela 4.5 - Resultados obtidos nos ensaios Charpy de maneira geral, dado o severo critério de temperatura adotado, os materiais apresentaram elevada resistência ao impacto, em particular os excepcionais resultados dos depósitos feitos com os arames-eletrodos das classes ER70S-3, ER80S-G e ER110S-1, os quais obtiveram resultados superiores a 300 J, capacidade máxima do pêndulo utilizado na condução dos ensaios.

O bom desempenho dessas ligas nos ensaios de impacto, corroboram com os resultados dos ensaios de tração, nos quais estes materiais revelaram elevada ductilidade, fator positivo em se tratando de resistência à fratura.

Para facilitar a observação desses resultados, a Figura 4.24 apresenta o gráfico comparativo dos resultados obtidos nos ensaios dos materiais envolvidos. Aqui, reitera-se o que foi dito no item 4.2, de que, para efeito das análises comparativas, não se considerou os resultados dos ensaios das paredes 1 e 2, pelas razões já explanadas.

É possível perceber ainda, com base na Tabela 4.5 e na Figura 4.24, que, à exceção dos materiais cujos resultados excedem a capacidade do pêndulo, não permitindo a avaliação que segue, houve a tendência de os CP's verticais de quase a totalidade dos ensaios, apresentam valores de resistência à fratura superiores àqueles retirados na direção horizontal.

No caso dos CP's extraídos na direção de construção das pré-formas (verticais), posta a heterogeneidade da composição macroestrutural dos materiais fabricados por MADA, nos quais se intercalam ZAC's e ZR's na direção de construção, naturalmente que, tais regiões, tendo composições microestruturais diversas, em termos de tamanho de grão e proporção de fases, acarretam respostas mecânicas igualmente diferentes.

Tabela 4.5 - Resultados obtidos nos ensaios Charpy

Parede	Eletrodo	Requisito da norma	Orientação do CP	T [°C]	Energia [J]
1	ER80S-G	(b)	Horizontal	-50	<b>32</b>
			Vertical	-50	<b>+300<sup>(a)</sup></b>
2	ER80S-B2	(b)	Horizontal	-50	<b>27</b>
			Vertical	-50	<b>109</b>
3	ER70S-6	27 J @ -30 °C	Horizontal	-50	<b>16</b>
			Vertical	-50	<b>36</b>
4	G4Si1	(c)	Horizontal	-50	<b>59</b>
			Vertical	-50	<b>75</b>
5	ER110S-1	68 J @ -50 °C	Horizontal	-50	<b>+300<sup>(a)</sup></b>
			Vertical	-50	<b>+300<sup>(a)</sup></b>
6	ER80S-G	(b)	Horizontal	-50	<b>+300<sup>(a)</sup></b>
			Vertical	-50	<b>+300<sup>(a)</sup></b>
8	ER70S-3	27 J @ -20 °C	Horizontal	-50	<b>+300<sup>(a)</sup></b>
			Vertical	-50	<b>+300<sup>(a)</sup></b>
			Vertical	-50	<b>+300<sup>(a)</sup></b>
9	ER80S-B2	(b)	Horizontal	-50	<b>19</b>
			Horizontal	-50	<b>24</b>
			Vertical	-50	<b>41</b>
			Vertical	-50	<b>20</b>

(a) Resultados superiores à máxima capacidade equipamento utilizado (300 J)

(b) Não requerido pela AWS A5.28 (2005)

(c) A classe, logo o requisito de tenacidade, devem ser definidos pelo fabricante, segundo a ISO 14341/EN440

Sendo assim, este fenômeno poderia ser explicado, caso os entalhes tenham sido fabricados, preferencialmente, em alguma das regiões macroscópicas (ZACs ou ZRs), a qual teria, eventualmente, maior capacidade de absorção de energia de impacto, o que seria de demasiada coincidência, posto que, nessas amostras, não foram feitos ataques metalográficos antes de que fossem fabricados os entalhes, o que, se fosse o caso, permitiria tal abordagem intencional, possibilitando a confirmação desta hipótese.

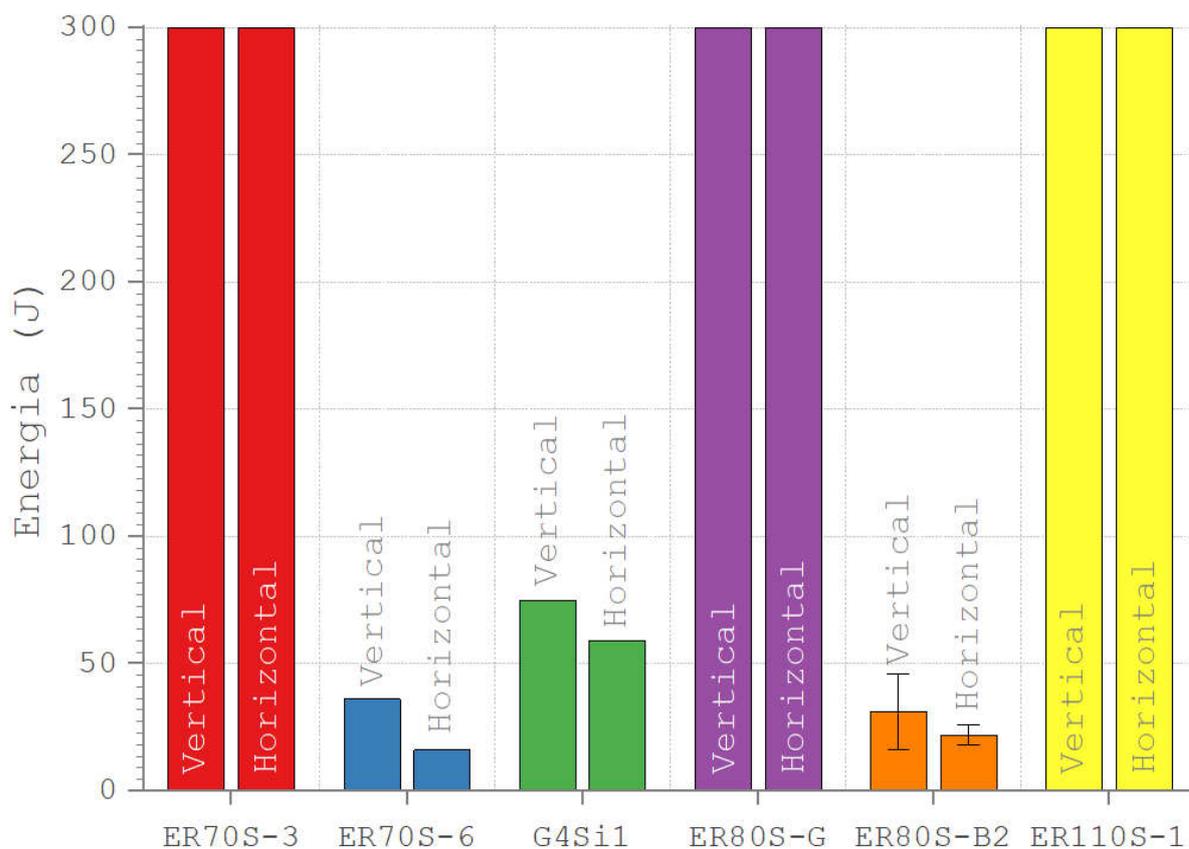


Figura 4.24 – Resultados comparativos de resistência à fratura dos materiais depositados

Outra explicação possível, e tanto mais provável, posto que não considera a existência de qualquer peculiaridade como na anterior, deriva da mesma premissa, qual seja: da heterogeneidade da composição macroestrutural na direção de construção das paredes, porém, não se trataria especificamente sobre o local no qual ocorreria o impacto do pêndulo.

No caso, essa composição macroestrutural estratificada, quando solicitada pelo pêndulo e instantes antes de se iniciar a fratura, reagiria de forma que tais zonas macroscópicas concorreriam entre si, de forma que prevaleceria a resposta da região de maior capacidade de absorção de energia.

Este efeito não seria passível de ocorrer com os CP's extraídos na direção de deposição (horizontais), pois, como as camadas estariam dispostas transversalmente à direção de aplicação do impacto, não ocorreria na resposta mecânica da amostra a predominância do comportamento de qualquer uma dessas regiões macroscópicas,

uma vez que a capacidade de absorção de energia equivalente seria simplesmente a somatória das capacidades individuais de cada uma.

Pontua-se, por fim, que, para que seja possível a condução de análises de maior profundidade e higidez estatística, o entendimento após a execução deste trabalho, é de que haja, em trabalhos futuros, a concepção de uma nova diagramação que permita a extração de ainda mais amostras (pelo menos cinco amostras em cada direção, dada a alta variabilidade intrínseca deste tipo de ensaio) para serem direcionadas aos ensaios Charpy.

Os registros fotográficos dos CP's após a realização dos ensaios se encontram no Anexo V, nas Figuras de A.26 a A.32. Faz-se o destaque de que a parede 7 sofreu danos durante a operação de corte a água, tendo sido inviabilizado o aproveitamento das amostras para os ensaios de impacto Charpy.

#### **4.2.5. Ensaio de Microdureza e Micrografias**

Com o objetivo de contribuir com a caracterização mecânica dos materiais resultantes da fabricação por MADA e suas posteriores análises, foram conduzidos ensaios de microdureza Vickers com carga de 500 g em todos os testes.

Para isso foram utilizadas pequenas amostras em forma de cubos de 10 mm de lado, extraídas de diferentes regiões da pré-forma. Nessas amostras foram feitas as preparações metalográficas, requeridas para ensaios dessa natureza, em três planos distintos, quais sejam: Frontal (F), Lateral (L) e Superior (S), conforme ilustrado na Figura 4.25, permitindo avaliar o grau de isotropia dos materiais analisados.

Foram feitas sete medições de microdureza em cada um dos planos, frontal, lateral e superior, tanto na zona refundida (ZR), como na zona afetada pelo calor (ZAC), das quais foram descartados o menor e o maior valor, procedendo-se os cálculos de microdureza média e desvios padrão a partir dos cinco restantes.

Neste ponto, o leitor pode estar se perguntando o porquê da adoção da nomenclatura das regiões macroestruturais, cuja diferenciação não se fez conforme os termos usuais em soldagem, quais sejam: metal de base (MB), zona fundida (ZF) e zona afetada pelo calor (ZAC).

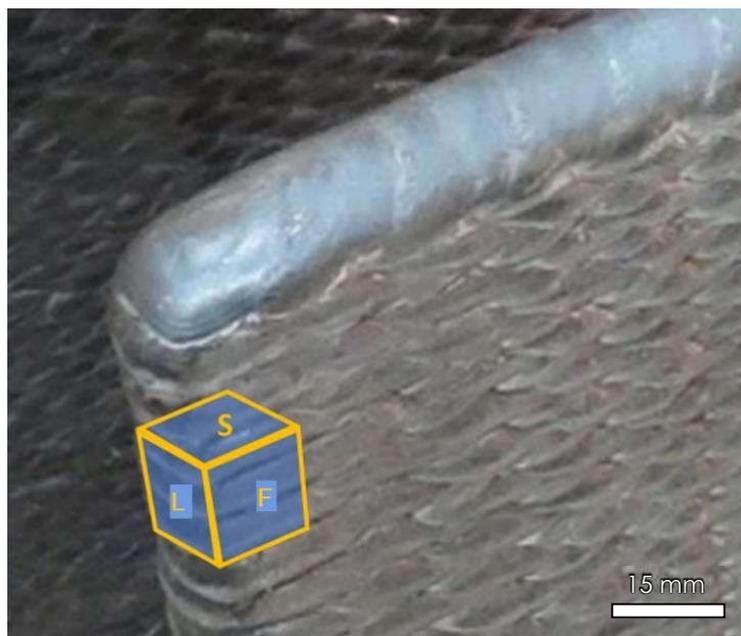


Figura 4.25 - Identificação das regiões de análises microestruturais

Em primeiro lugar, não seria coerente, por motivos óbvios, o emprego do termo metal de base, posto que, em se tratando de MA, o “metal de base” seria a camada imediatamente anterior à que está sendo depositada, possuindo composição química do metal de adição. É evidente que há sim metal de base, porém apenas na deposição da primeira camada, sendo chamada, em MA, de substrato, o qual, exceto em situações muito específicas, terá alguma importância em manufatura aditiva, posto que, ao final da deposição, será descartado, assim como é recomendável o descarte das primeiras camadas, por estarem sujeitas à efeitos de diluição, possuindo composição química e aspectos metalúrgicos distintos do metal de adição.

Em segundo lugar, optou-se por não empregar a definição ZF (zona fundida) no presente trabalho, pois esta região, em soldagem, é definida, como sendo uma região de granulação grosseira, com grãos colunares formados a partir da solidificação e crescimento epitaxial com direção bem definida, seguindo a orientação cristalina dos grãos da ZAC.

No presente trabalho, considerando as paredes depositadas por MADA com energia de deposição média de  $\approx 17$  kJ/cm, a presença desse tipo de microestrutura, embora não seja completamente ausente, é restrita a regiões muito específicas como no topo da peça (última camada), como mostra a Figura 4.26.

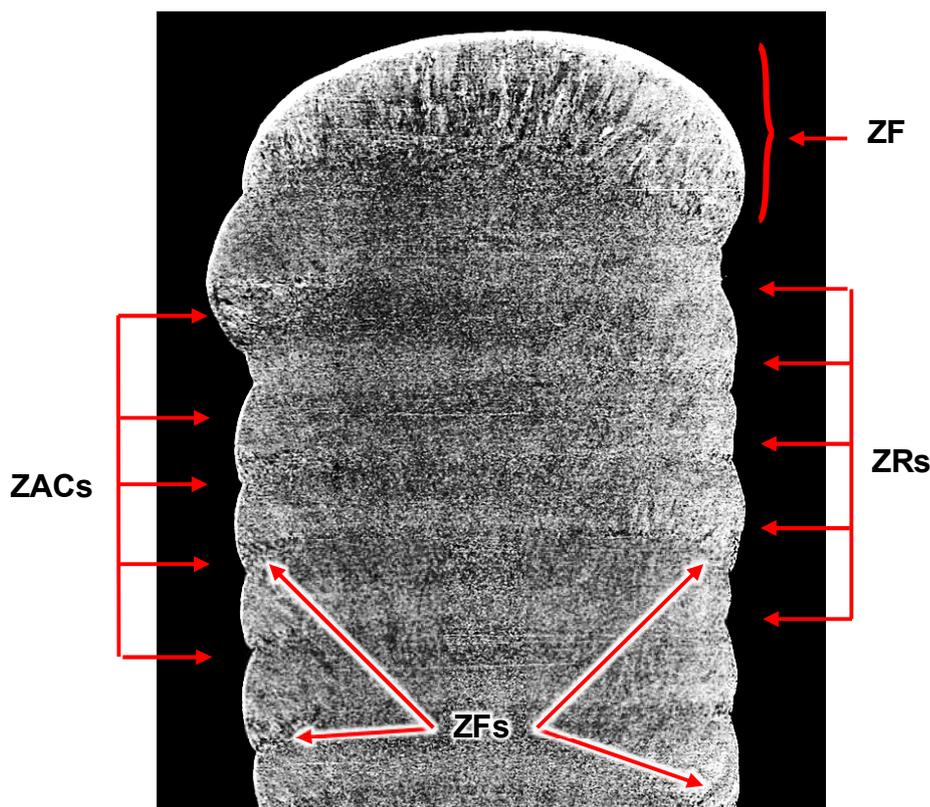


Figura 4.26 – Macrografia do topo da parede 3, depositada com arame-eletrodo ER70S-6, onde são indicadas as regiões das ZAC's (mais escuras), ZR's (mais claras) e ZF (topo da pré-forma)

Isso pois, nas camadas anteriores, parte da ZF é refundida pelo efeito de penetração da camada subsequente, gerando microestrutura mais refinada, enquanto, a porção não atingida pela penetração do arco, é afetada pelo calor da poça de fusão, sofrendo recristalização, se configurando como ZAC (de granulação fina, essencialmente, como se verá à frente).

Outra região possível de se identificar a presença de microestruturas semelhantes à de zonas fundidas são as superfícies laterais e frontais da peça, onde esse tipo metalúrgico pode ser localizado, preferencialmente, próximo às ondulações superficiais características da deposição a arco, regiões estas que, em sendo a MADA um processo que produz, essencialmente, peças em formatos quase-finais (ou *near-net-shape*, do inglês), não farão parte da peça final, uma vez que, via de regra, serão removidas pelas operações de acabamento subsequentes.

Assim sendo, para efeitos do presente trabalho, serão adotadas apenas as nomenclaturas ZR e ZAC, posto que, na região de interesse, compreendida pela

largura efetiva das paredes ( $L_E$ ), não se percebe aspectos metalúrgicos que justifiquem o emprego do termo ZF.

A Tabela 4.6 traz os resultados obtidos nessa etapa experimental, nos quais pode-se constatar baixa dispersão dos resultados obtidos para cada material testado.

Tabela 4.6 - Resultados das medições de microdureza

Parede (Classe)	Plano/Região	Valores Microdureza (HV 0,5)*							Média (HV)	Desvio (HV)
3 (ER70S-6)	F/ZR	212	213	204	209	207	206	204	207	2
	F/ZAC	213	223	215	211	214	215	214	214	1
	L/ZR	173	170	175	182	172	176	172	174	2
	L/ZAC	178	179	184	185	174	177	187	181	3
	S	239	223	236	237	230	240	237	236	2
4 (G4Si1)	F/ZR	201	198	203	213	201	213	205	205	3
	F/ZAC	206	208	206	201	218	205	200	205	2
	L/ZR	191	208	195	200	194	205	197	198	3
	L/ZAC	196	203	209	204	202	203	200	202	1
	S	213	215	217	216	232	214	222	217	2
5 (ER110S-1)	F/ZR	240	253	236	241	259	229	258	246	8
	F/ZAC	257	241	255	261	265	258	268	259	3
	L/ZR	203	214	210	215	211	203	206	209	3
	L/ZAC	196	201	211	205	213	210	198	205	4
	S	216	210	218	213	213	204	207	212	3
6 (ER80S-G)	F/ZR	164	156	164	164	167	177	167	165	1
	F/ZAC	170	172	164	162	170	174	167	169	2
	L/ZR	175	183	175	180	169	169	179	176	3
	L/ZAC	163	156	173	170	167	169	170	168	2
	S	163	167	160	167	160	171	161	164	3
7 (ER80S-B2)	F/ZR	257	253	249	264	257	253	261	256	3
	F/ZAC	234	258	237	258	241	242	250	245	7
	L/ZR	227	222	241	233	241	242	250	236	5
	L/ZAC	228	231	229	239	237	207	230	231	2
	S	211	212	215	235	211	218	224	217	4

\* Os valores em vermelho (máximos e mínimos) foram excluídos dos cálculos de média e desvio padrão

Faz-se o registro de que não foram submetidas a estes ensaios as amostras das pré-formas 1, 2, 8 e 9, pois as amostras das paredes 1 e 2 se perderam na operação de corte à água, enquanto que a avaliação de microdureza das paredes 8 e 9 não puderam ser conduzidas devido a um problema técnico com o microdurômetro, impossibilitando as medições.

Sobre estas últimas, o prejuízo maior ao trabalho foi não ter avaliado a parede 8, depositada com o arame-eletrodo ER70S-3, não permitindo a inserção deste material no comparativo e, posteriormente, nas análises.

Quanto à não caracterização de microdureza da parede 9, como foi depositada como redundância para avaliação do arame ER80S-B2, não houve efeito deletério para as análises, pois o mesmo pôde ser avaliado nas medições de microdureza da parede 7.

A Figura 4.27 apresenta o comparativo entre os resultados obtidos para cada material testado, diferenciando as medições realizadas no plano frontal, daquelas realizadas no plano lateral. Para efeito deste comparativo, salienta-se a não inclusão das medições realizadas no plano superior, devido ao fato de que não foi possível definir a região na qual foram feitos os cortes dos CPs, se na ZAC ou na ZR, dificultando a obtenção de conclusões assertivas.



Figura 4.27 – Resultados comparativos de microdureza dos materiais depositados

Observando-se o gráfico comparativo, nota-se que o depósito realizado com o arame-eletrodo ER80S-G apresentou os menores valores médios de microdureza dentre os materiais investigados, o que vai ao encontro dos resultados dos ensaios de tração, nos quais apresentou resultados superiores apenas ao ER70S-3, tendo tido desempenho inferior aos demais. Comenta-se em adição que os resultados em ambos os planos apresentaram pouca variação, indicando comportamento isotrópico.

Igualmente, o G4Si1 não apresentou diferenças significativas entre os resultados dos ensaios realizados no plano frontal e lateral das amostras, assim como nos ensaios de tração, tendo sido estes dois materiais os menos susceptíveis à variação das propriedades mecânicas conforme a orientação dos CP's e ensaios.

O arame ER70S-6, proporcionou depósito de microdureza similar ao G4Si1, porém com maior divergência quando se observa a orientação.

Os maiores resultados de microdureza foram encontrados nos ensaios realizados nas ligas ER80S-B2 e ER110S-1, corroborando com os resultados de limite de resistência obtidos nos ensaios de tração. Para essas duas ligas, nota-se que houve razoável diferença nos resultados das medições no plano frontal e lateral. Esses aspectos, bem como outros efeitos relativos aos demais materiais, ficam ainda mais claros nas análises estatísticas que seguem.

Como nos ensaios de tração, o conjunto de resultados de microdureza permitiu a condução de análises de variância, objetivando elucidar os efeitos observados. Conforme as análises anteriores, foi utilizado intervalo de confiança de 95%.

A primeira, apresentada pela Figura 4.28, se trata da influência do material na resposta de microdureza e, conforme se nota, embora já estivesse claro, os materiais possuem microdureza média estatisticamente distintas ( $p = 0,00001$ ).

Já os resultados da ANOVA apresentados na Figura 4.29, denotam que houve influência significativa ( $p = 0,0039$ ) do plano no qual foram realizadas as indentações na resposta de microdureza.

Este resultado encontra explicação no fato de que o plano frontal das amostras se encontra em uma região localizada próxima à superfície das pré-formas, fazendo com que estivesse submetido a taxas de resfriamento mais severas do que em regiões mais centralizadas (distantes da superfície em contato com o fluido de resfriamento).

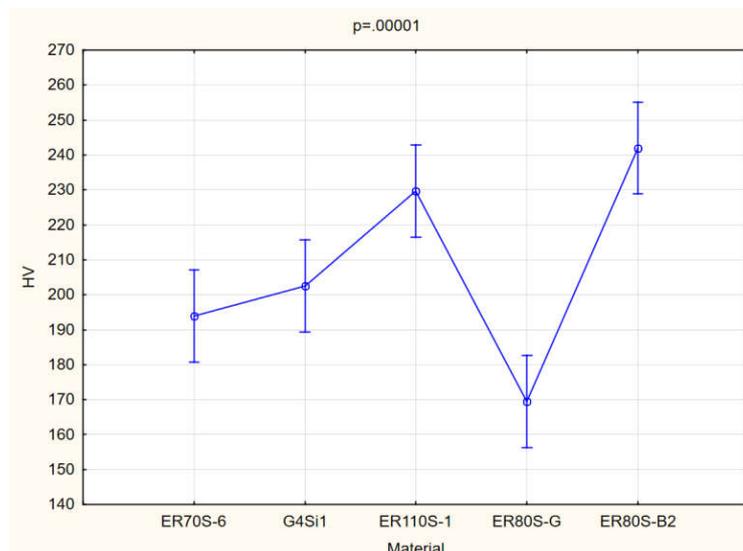


Figura 4.28 - ANOVA da influência do material de deposição nas respostas dos ensaios de microdureza

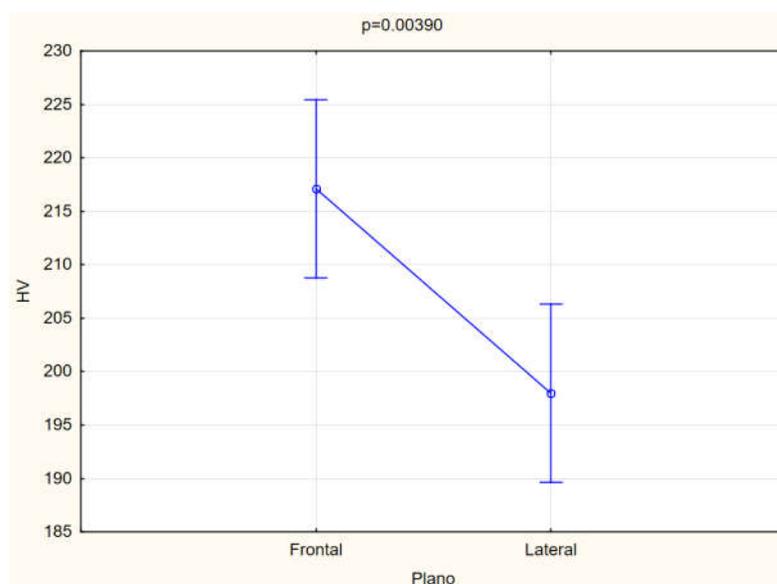


Figura 4.29 – ANOVA da influência dos planos (frontal e lateral) nas respostas dos ensaios de microdureza

Desse modo, é sabido que maiores taxas de resfriamento resultam em maior acúmulo de tensões residuais, além da formação de microestrutura com eventual precipitação de fases de menor ductilidade, provocando o aumento de dureza das porções de material ali localizadas.

Pondera-se nesta feita, que, embora tenha havido a constatação de diferenças estatisticamente significativas entre os resultados obtidos nos ensaios realizados no

plano frontal e lateral, tal diferença foi da ordem de pouco mais de 15 HV num universo de microdureza média de 205 HV, representando aproximadamente 7% de variação, a qual, a depender da aplicação destes materiais, pode não ser relevante.

Todavia, é importante considerar que os materiais estudados neste trabalho possuem baixo teor de elementos de liga, principalmente de C ( $< 0,1\%$ ), o que os torna menos susceptíveis à variações de dureza em função da intensidade dos ciclos térmicos aos quais são submetidos.

Assim, em caso de deposição de peças com arames-eletrodos contendo maiores teores de C e/ou elementos de liga que confirmam maior capacidade de endurecimento em caso de têmpera, há de se atentar para este efeito, com o fim de não se elevar demasiadamente a dureza a ponto de haver fragilização do material, o que poderia acarretar o surgimento de trincas à partir da superfície que, ao propagarem-se, possam comprometer a integridade estrutural do metal depositado, além de gerar dificuldades nas operações de acabamento e pós-processamento da peça.

E, por fim, a ANOVA da influência das regiões macroestruturais nos resultados de microdureza é apresentada na Figura 4.30, na qual se constata que não houve diferença significativa na microdureza medida nas ZACs e nas ZRs dos materiais abrangidos.

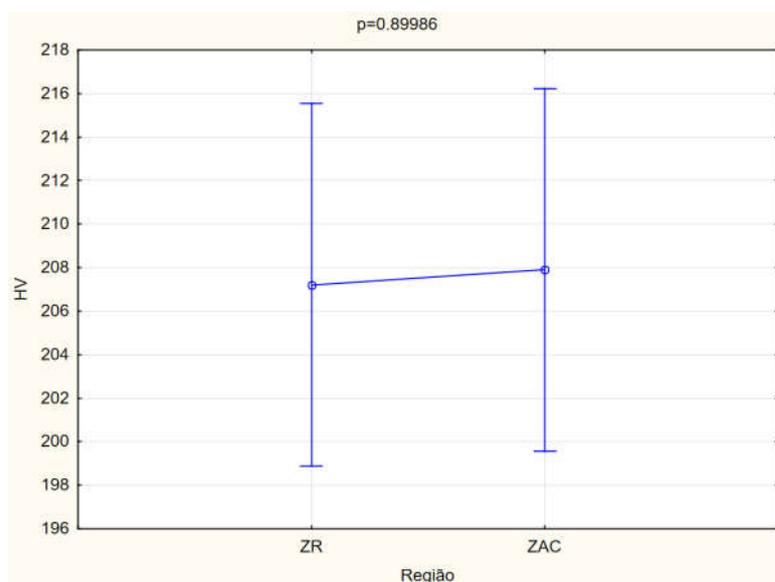


Figura 4.30 – ANOVA da influência da região (ZR e ZAC) nas respostas dos ensaios de microdureza

Adicionalmente aos ensaios de microdureza, foram feitos registros micrográficos das amostras ensaiadas, a fim de averiguar e avaliar a microestrutura resultante dos depósitos (ataque com Nital 10%). É importante mencionar que, nas micrografias realizadas no plano superior das amostras, não há classificação quanto às regiões de ZR e ZAC. A Figura 4.31 apresenta uma montagem das micrografias realizadas nos três planos da pré-forma 7, depositada com o arame-eletrodo ER80S-B2 em perspectiva isométrica.

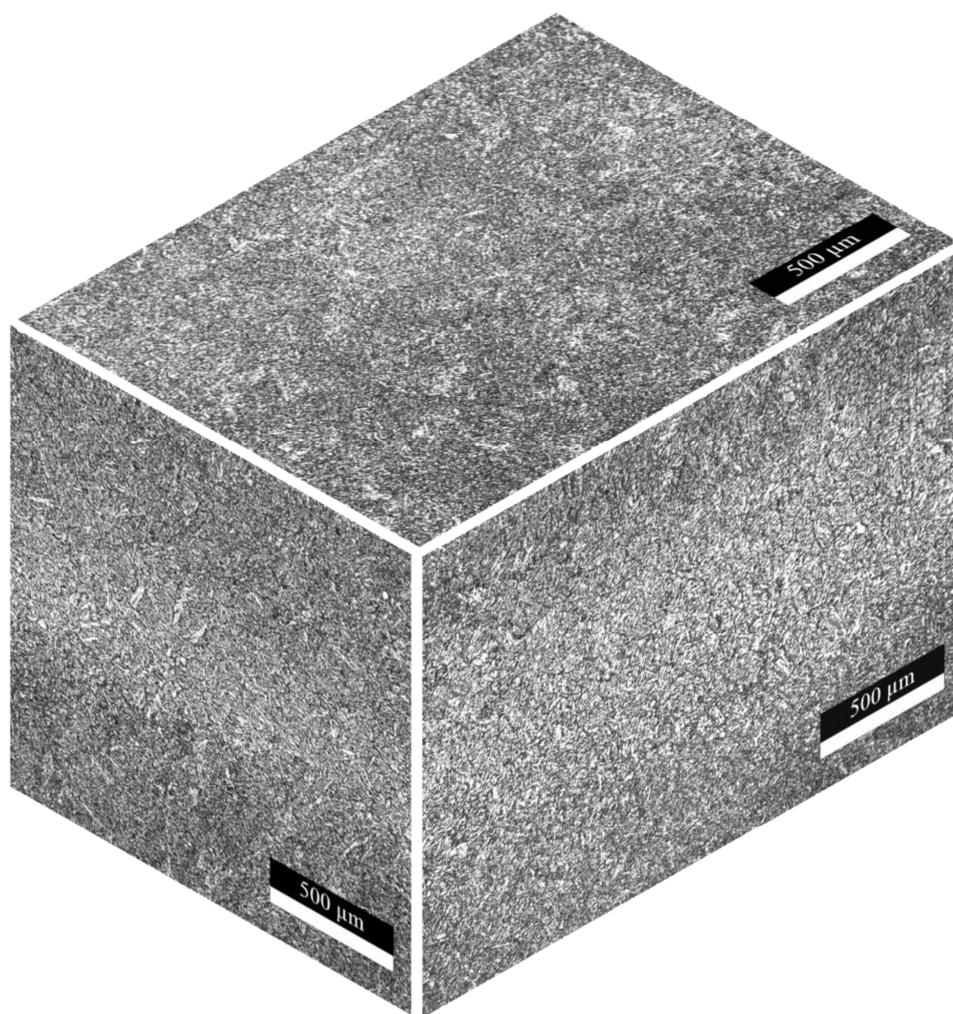


Figura 4.31 – Vista isométrica das micrografias realizadas nos planos frontal, lateral e superior da (aumento de 50x) de amostras retiradas da pré-forma 7, depositada com o arame-eletrodo ER80S-B2

A Tabela 4.7 traz as micrografias da pré-forma 3, depositada com arame-eletrodo da classe ER70S-6. Por essas micrografias é possível observar microestruturas preponderantemente ferríticas, mais refinadas lateralmente em função da maior taxa de extração de calor e direção de solidificação. No plano frontal se observa microestrutura formada predominantemente por ferrita primária, onde há maior incidência de cementita nos contornos de grão (em pequena quantidade pelos baixos teores de carbono), enquanto nas micrografias do plano superior predomina a presença grandes componentes de ferrita primária de contorno de grão circundando regiões de microestrutura mais refinada com alguma presença de ferrita acicular.

Comenta-se que o padrão das microestruturas resultantes dos demais materiais depositados se assemelha com o que se vê nas micrografias do plano lateral do ER70S-6, apresentando microestrutura refinada com presença de ferrita acicular, ilhas de ferrita primária e ferrita intergranular poligonal. Em adição, pontua-se que, de maneira geral, as microestruturas relativas às ZAC's, seja no plano frontal, seja no lateral, apresentaram maior grau de refinamento em relação às ZR's.

Nessa linha, comenta-se que o efeito de maior refino de grão nas ZAC's, em relação às ZR's, foi constatado nas micrografias do material G4Si1, apresentadas na Tabela 4.8. É encontrado nas micrografias do plano frontal do material ER80S-G (Tabela 4.9), maior incidência de cementita nos contornos de grão, devido ao maior teor de carbono presente nessa liga 0,095%. Especificamente, percebe-se a presença de ferrita com segunda fase não alinhada nos planos frontal e lateral da ZR do material ER80S-B2, microconstituente não encontrado nas demais micrografias (Tabela 4.10). Já sobre o depósito de ER110S-1, no plano frontal da zona refundida, encontra-se ferrita com segunda fase alinhada e, embora duvidosa, pois se trata do material com menor teor de carbono dentre os envolvidos (0,05%), percebe-se a presença de agregado de ferrita-carboneto, como se observa na Tabela 4.11.

Tabela 4.7 - Micrografias (aumento de 500x) das regiões submetidas aos ensaios de microdureza da pré-forma 3, depositada com arame-eletrodo ER70S-6

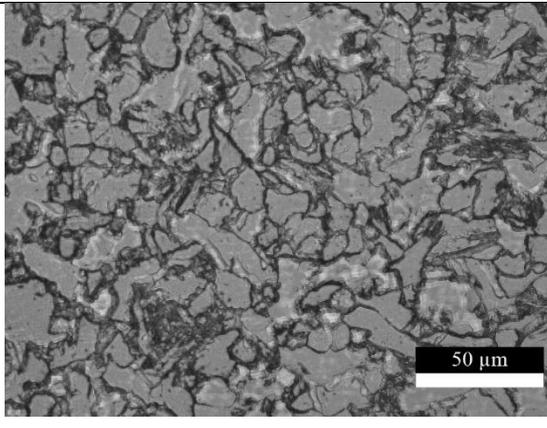
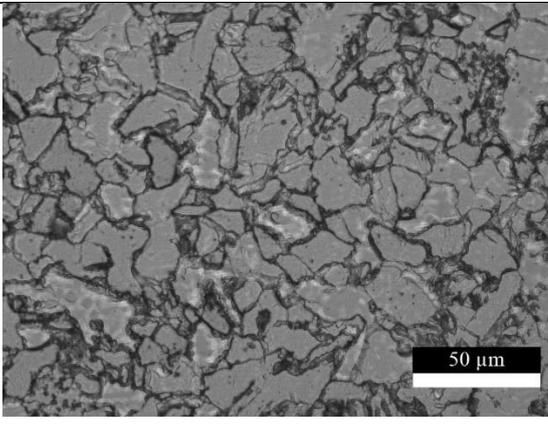
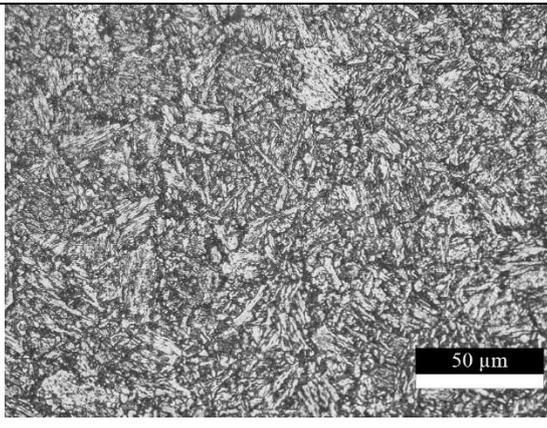
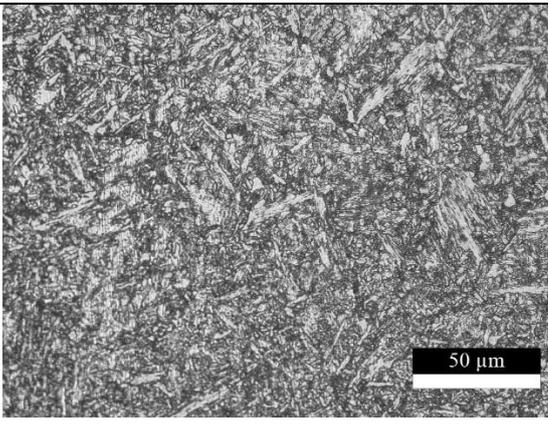
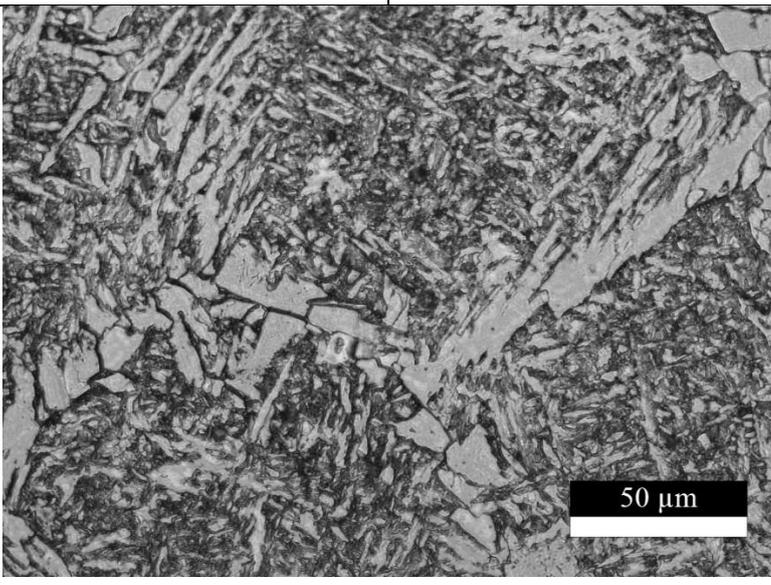
Plano	Zona Refundida	Zona Afetada pelo Calor
Frontal		
Lateral		
Superior		

Tabela 4.8 – Micrografias (aumento de 500x) das regiões submetidas aos ensaios de microdureza da pré-forma 4, depositada com o arame-eletrodo G4Si1

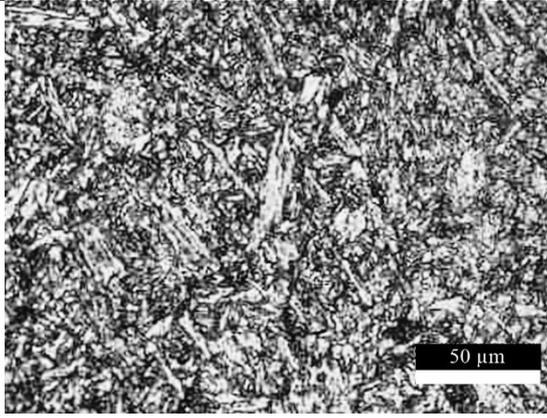
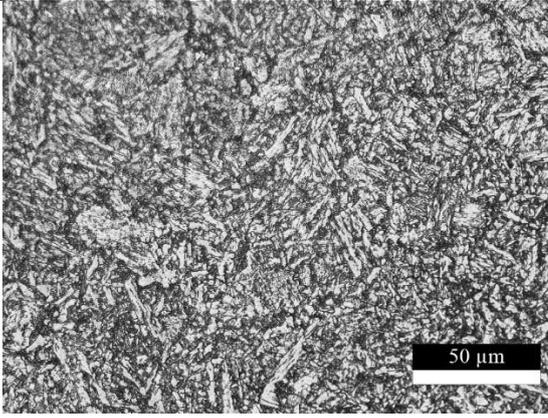
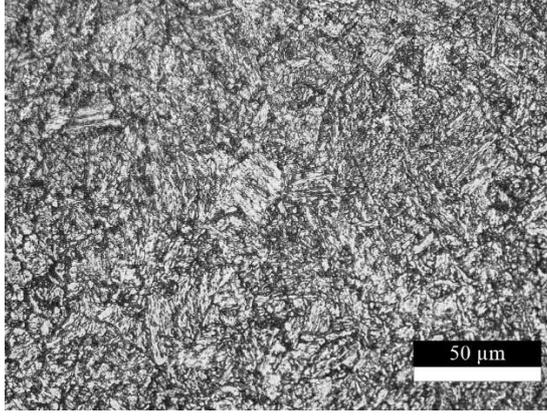
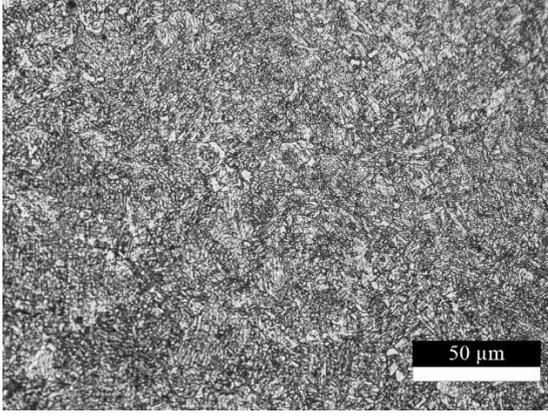
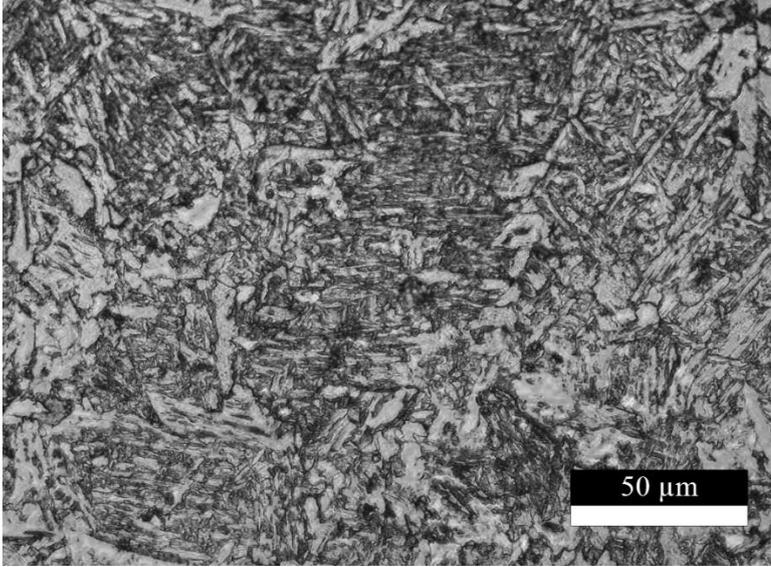
Plano	Zona Refundida	Zona Afetada pelo Calor
Frontal		
Lateral		
Superior		

Tabela 4.9 – Micrografias (aumento de 500x) das regiões submetidas aos ensaios de microdureza da pré-forma 6, depositada com o arame-eletrodo ER80S-G

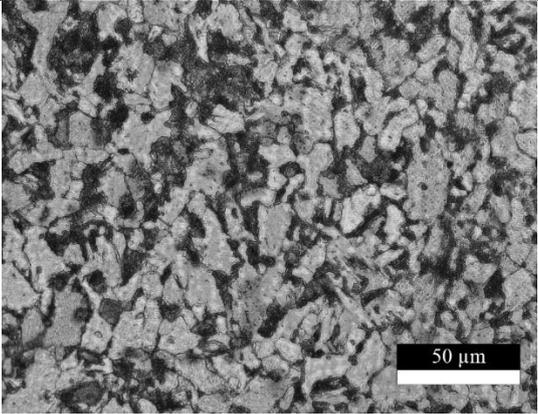
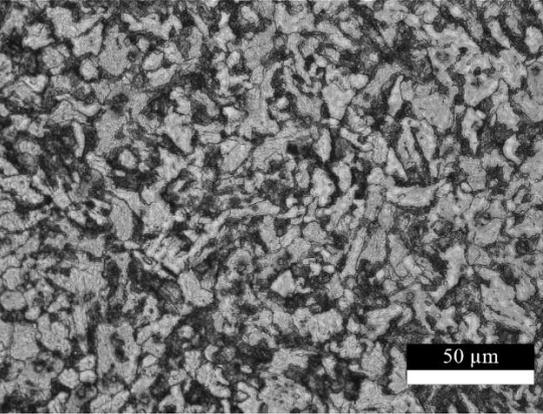
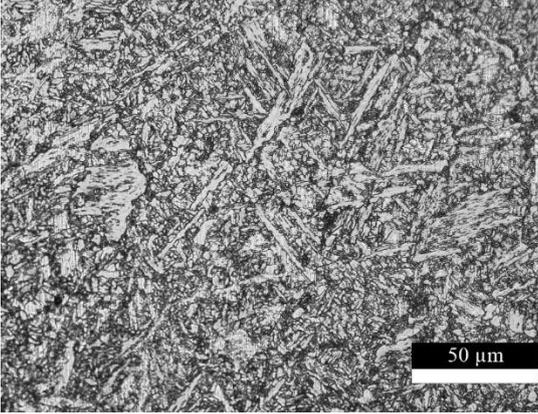
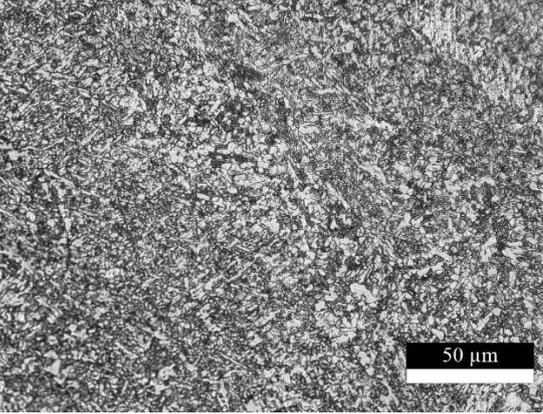
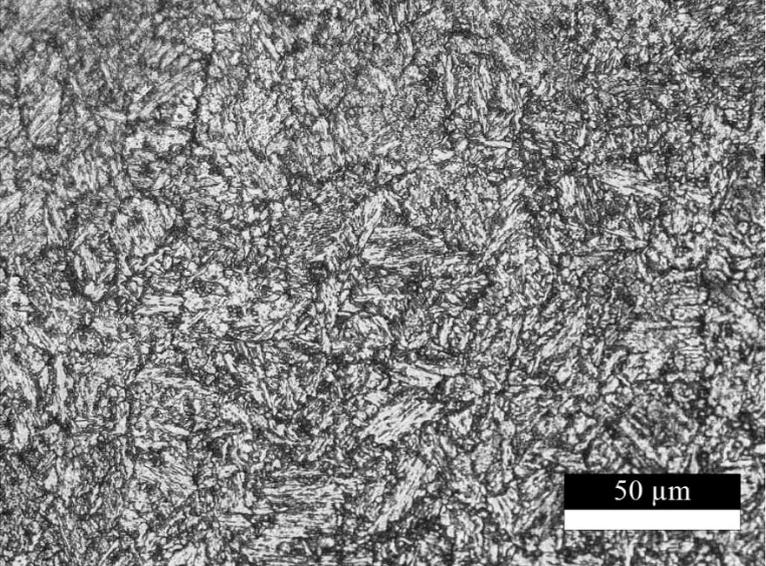
Plano	Zona Refundida	Zona Afetada pelo Calor
Frontal		
Lateral		
Superior		

Tabela 4.10 – Micrografias (aumento de 500x) das regiões submetidas aos ensaios de microdureza da pré-forma 7, depositada com o arame-eletrodo ER80S-B2

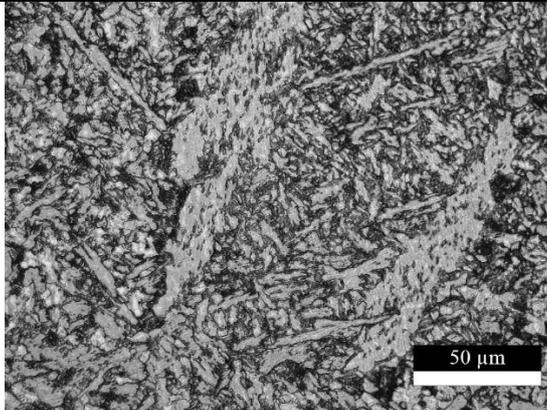
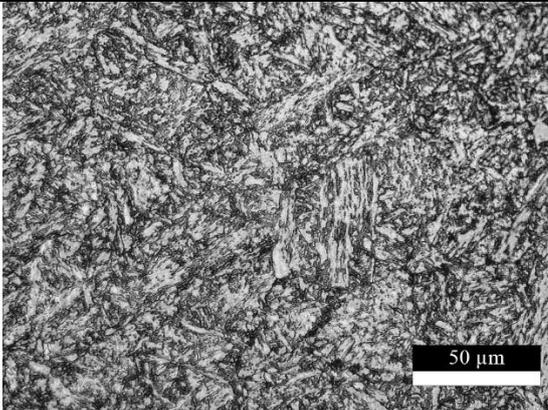
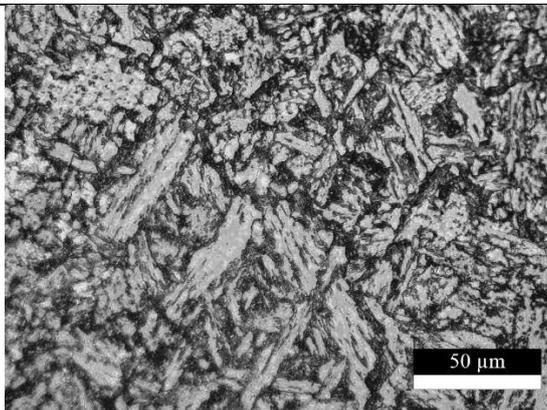
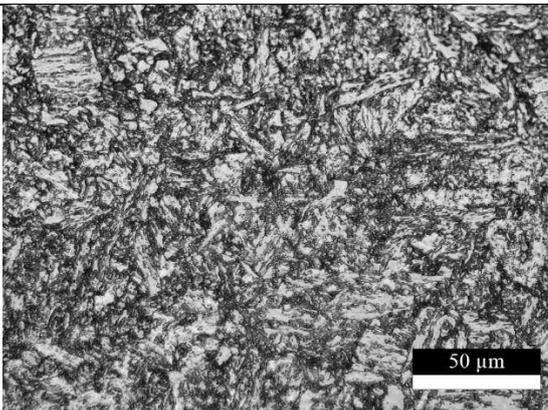
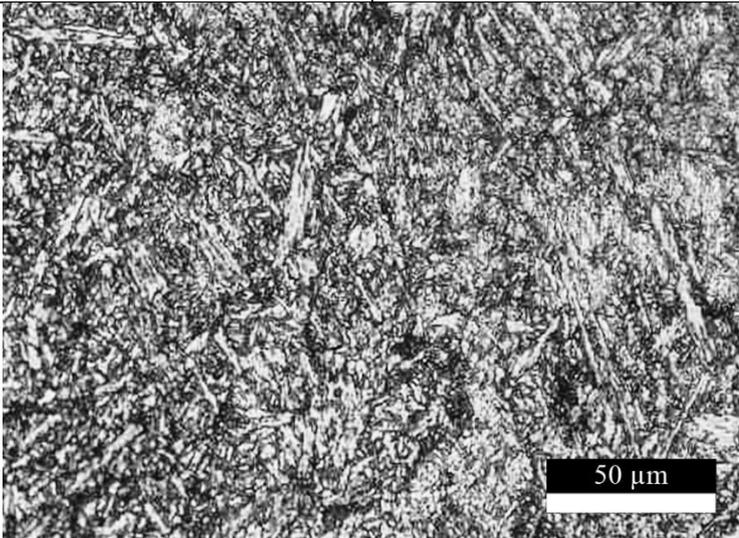
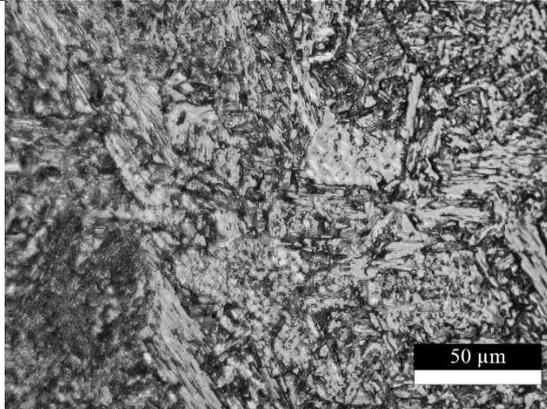
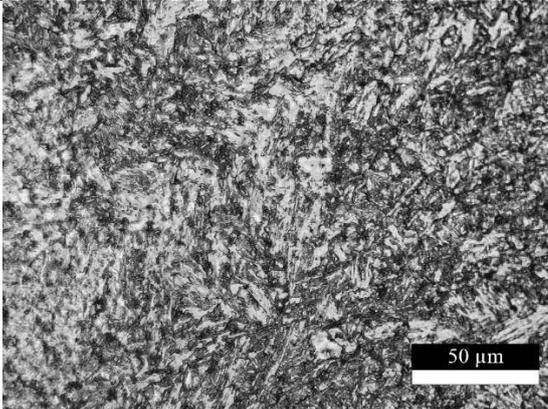
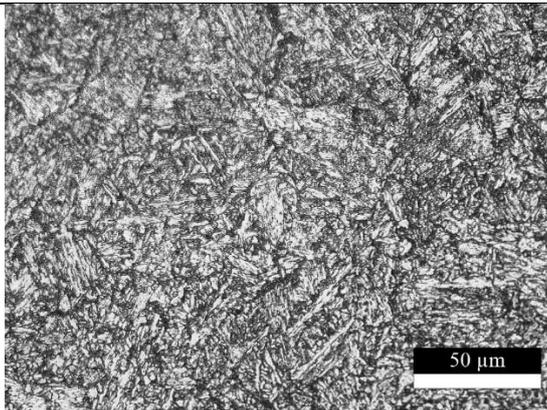
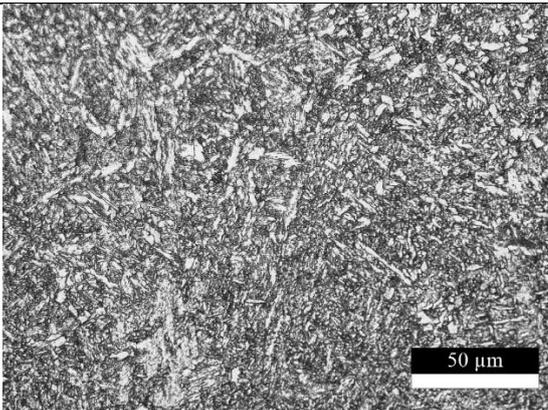
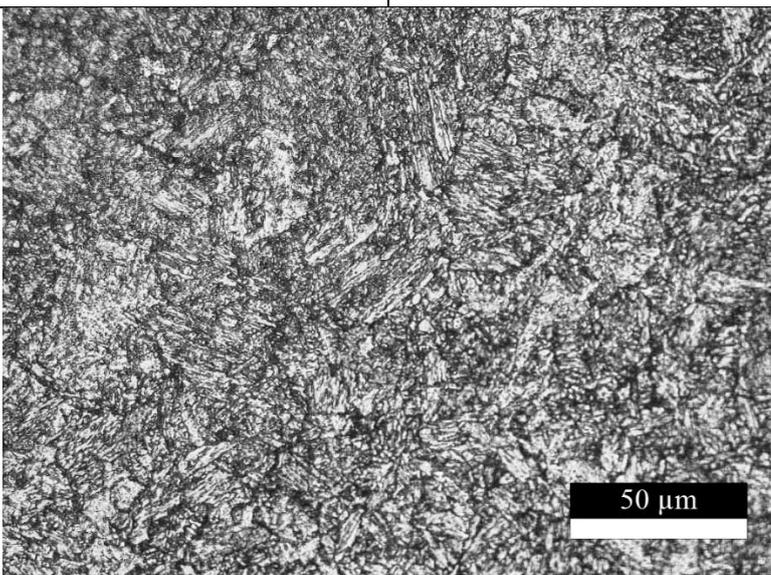
Plano	Zona Refundida	Zona Afetada pelo Calor
Frontal		
Lateral		
Superior		

Tabela 4.11 – Micrografias (aumento de 500x) das regiões submetidas aos ensaios de microdureza da pré-forma 5, depositada com o arame-eletrodo ER110S-1

Plano	Zona Refundida	Zona Afetada pelo Calor
Frontal		
Lateral		
Superior		

É importante mencionar que mesmo havendo diferenças microestruturais entre os planos observados em todos os materiais observados, as propriedades mecânicas se mostraram isotrópicas como mencionado anteriormente, ou seja, a composição química dos materiais é o fator preponderante nessa situação. Destaca-se que outras propriedades físicas, como resistência à corrosão, podem não apresentar a mesma isotropia, demandando estudos futuros.

#### **4.2.6. Ensaio de Fadiga**

Aqui é importante relatar que, nessa primeira experiência com os ensaios de fadiga em amostras fabricadas por GMA-DED, com destaque para as práticas de extração e preparação dos corpos de prova de fadiga, foi possível identificar alguns desafios de cunho operacional.

A proposta inicial foi destacar uma região da pré-forma a qual seria direcionada para operação de corte por eletroerosão a fio (EEF), objetivando o máximo aproveitamento desse volume de material (Figura 3.6), extraíndo dele o maior número de amostras possível. Isso porque, para esse tipo de ensaio, a quantidade de amostras está intimamente relacionada com a qualidade e confiabilidade dos resultados.

O processo de EEF se mostrou satisfatório, no que tange a produção de peças de excelente precisão dimensional, acabamento e aproveitamento de material, sendo capaz de produzir o maior número de amostras possível dentro das ‘apertadas’ dimensões cedidas para tal.

Contudo, a disponibilidade da máquina de eletroerosão a fio se mostrou demasiadamente limitada, devido ao excesso de demanda, impondo inevitáveis contratempos para a obtenção das amostras, permitindo a extração de apenas dois lotes de CP’s, dos materiais ER110S-1 e ER80S-B2. Em complemento, há de se destacar que a prestação desse tipo de serviço fora da universidade possui custo elevado e, por isso, faz-se importante relatar que estes fatos produziram impactos importantes na execução dos referidos ensaios.

Assim, após a preparação minuciosa dos CP’s de ambos os lotes, descrita à frente, foi enviado o primeiro lote, referente ao material ER110S-1 para a universidade

parceira, para que fosse ensaiado. Porém, embora tenham sido concluídos os ensaios, a máquina passou a apresentar dificuldades operacionais de forma que, até o presente momento, não foi possível o envio do segundo lote e, portanto, para efeito deste trabalho, serão apresentados resultados de ensaios de fadiga apenas da parede 6, depositada com arame-eletrodo ER110S-1.

Sobre a preparação dos CP's, após a extração por EEF, as amostras foram submetidas à lixamento (até 320 mesh na face e até 600 mesh nas laterais), para se evitar a presença de concentradores de tensão na superfície da peça, o que poderia interferir nos resultados, não permitindo a adequada avaliação do material em termos da presença de eventuais defeitos internos.

Posteriormente, a ataque metalográfico (Nital 10%), a fim de que fosse revelada a estrutura macrográfica das amostras (ZAC's e ZF's), como apresentado na Figura 4.32, permitindo, a posteriori, avaliar se haveria zonas preferenciais para nucleação de trincas após os ensaios de fadiga. No caso, para este lote, não há evidências de que tenha havido zonas preferenciais de nucleação de trincas, como pode ser percebido nas macrografias dos CP's rompidos após os ensaios, apresentadas pela Figuras de A.33 a A.41, no Apêndice VI.

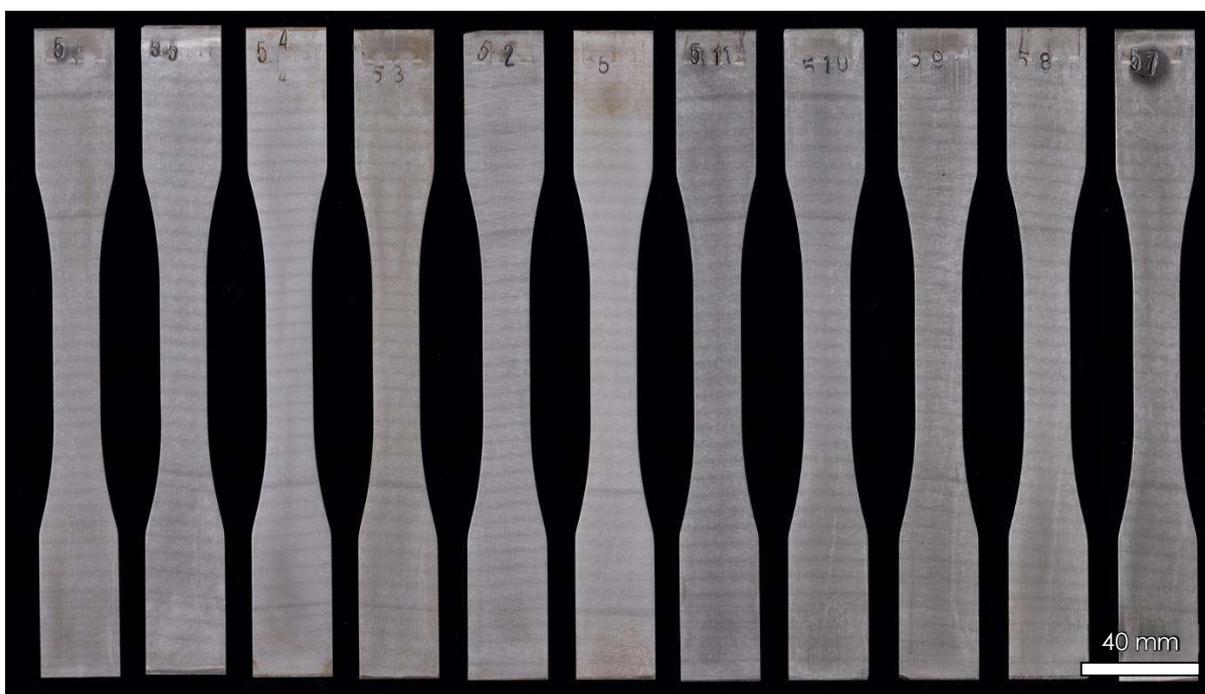


Figura 4.32 - Macrografias das amostras de fadiga extraídas da pré-forma 5, depositada com o arame-eletrodo ER110S-1

Importante mencionar que todas as amostras foram submetidas a ensaios de ultrassom (US) Phased Array antes de que fossem enviadas para execução dos ensaios, para permitir a identificação possíveis defeitos e/ou descontinuidades internas nas amostras, alicerçando as análises posteriores. De fato, identificou-se que dois dos 11 CP's, apresentaram trincas preexistentes importantes, as quais foram confirmadas por meio de microscopia óptica (MO), como mostram as Figuras Figura 4.33 e Figura 4.34 e, por isso, não foram ensaiados.

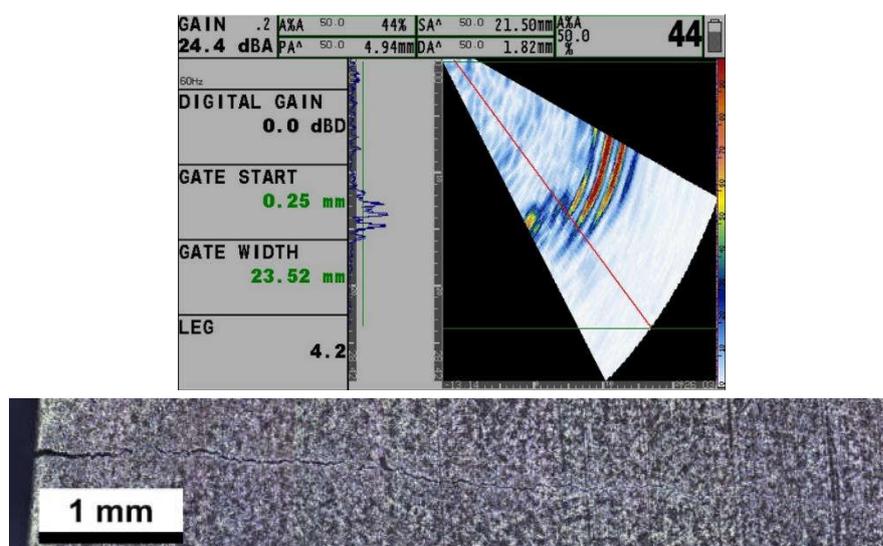


Figura 4.33 - Identificação da trinca via US Phased Array (acima) e sua medição via MO (abaixo) do CP 5.5, extraído da pré-forma 5, depositada com ER110S-1

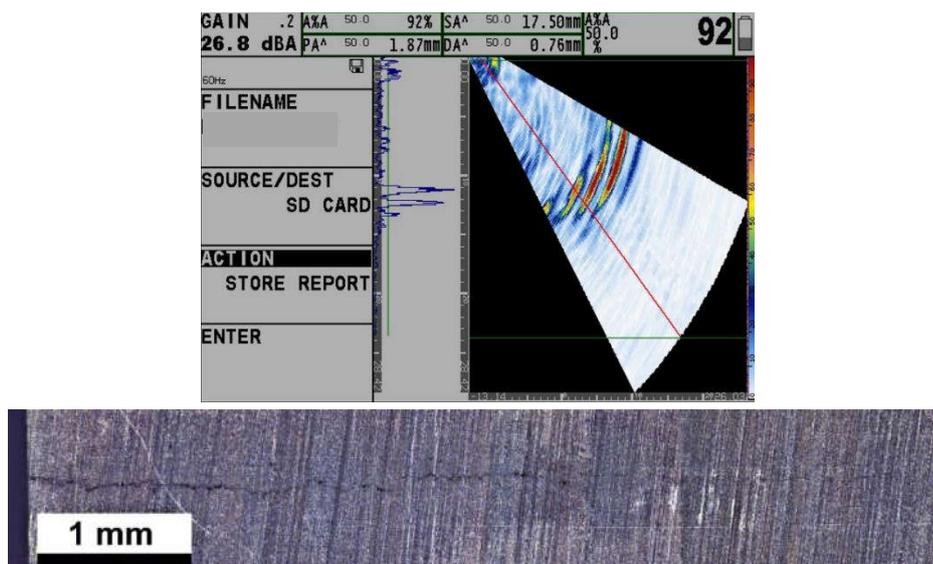


Figura 4.34 - Identificação da trinca via US Phased Array (acima) e sua medição via MO (abaixo) do CP 5.8, extraído da pré-forma 5, depositada com ER110S-1

Para os ensaios, as cargas mínima e máxima foram definidas com base nos resultados obtidos por este material nos ensaios de tração, quais sejam:  $S_y = 497 \pm 17$  e  $S_u = 619 \pm 13$  MPa. Os ensaios, em sendo do tipo tração-tração, foram conduzidos com uma razão (R) de carga e tensão descritas na  $R = \frac{F_{min}}{F_{max}} =$

$$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0,1$$

Equação 4.1.

$$R = \frac{F_{min}}{F_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0,1$$

Equação 4.1

As cargas adotadas para condução dos ensaios, estabelecidas de forma a distribuir os corpos de prova entre três faixas de tensão, foram:

- Região de baixo número de ciclos:  $\Delta\sigma_1 \cong 585$  MPa ( $\sigma_{max} \cong 650$  MPa  $\cong 1,05S_u$ )
- Região de número de ciclos intermediária:  $\Delta\sigma_2 \cong 530$  MPa ( $\sigma_{max} \cong 588$  MPa  $\cong 0,95S_u$ )
- Região de alto número de ciclos:  $\Delta\sigma_3 \cong 420$  MPa ( $\sigma_{max} \cong 467$  MPa  $\cong 0,75\sigma_u$ )

Assim, procedeu-se os ensaios. A Figura 4.35 mostra imagens em série do CP 5.3 desde a nucleação da trinca até seu rompimento. Comenta-se que, embora haja impressão de que a trinca se nucleia na lateral da amostra, houve a nucleação na face posterior na amostra.

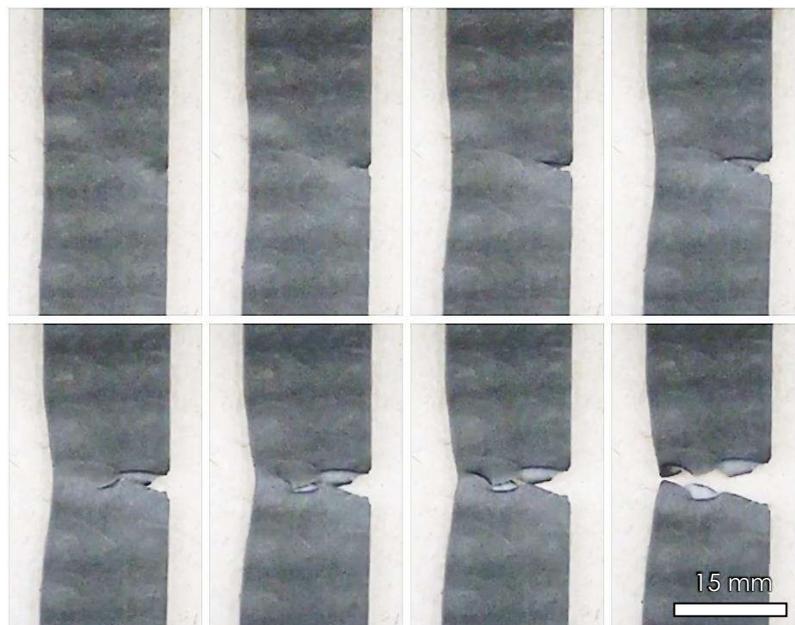


Figura 4.35 – Registros em série do instante no qual nucleia-se a trinca (noroeste) até o rompimento total (sudeste) do CP 5.3

Comenta-se que, assim como o CP 5.3, as trincas de fadiga, nos demais corpos de prova, nuclearam-se essencialmente nas faces das amostras. É sabido que, em corpos de prova de seção retangular, as trincas tenham início em algum dos cantos da seção, onde há um efeito de borda (concentração de tensão).

Contudo, há indícios de que, nos ensaios conduzidos nesse lote, os sítios mais propensos à nucleação da trinca estejam associados ao material em si, mostrando que a eventual presença de defeitos ou descontinuidades internas do material, ainda que pequenos, se mostrou mais crítica do que os efeitos de borda.

Sobre este aspecto, comenta-se que a detecção dos pontos específicos nos quais houve a nucleação das trincas (se no interior dos cordões ou na interface entre eles), mesmo em se tendo atacado as amostras, não foi possível, uma vez que a grande deformação plástica ocorrida instantes antes da ruptura apagava as regiões reveladas pelo ataque, dificultando qualquer visualização.

A Figura 4.36 mostra a superfície de ruptura de um corpo de prova sujeito a uma faixa de tensões de teste relativamente baixa. É notável que a área correspondente à região da trinca, que assume uma forma semi-elíptica, representa uma parcela significativa da área total da seção resistente. A presença de reentrâncias, picos e vales na região de ruptura final é atribuída à considerável deformação plástica manifestada pelo material na fase final do processo de falha.



Figura 4.36 – Face da fratura de do CP 5.2 submetido a baixo nível de tensão de teste

Já a Figura 4.37 mostra a superfície de fratura de um corpo de prova testado numa faixa de tensões elevada. A área correspondente à propagação da trinca, em forma de semicírculo, é marcadamente menor que aquela mostrada no caso anterior.



Figura 4.37 – Face da fratura do CP 5.3 submetido a alto nível de tensão de teste

As demais macrografias das superfícies de fratura encontram-se no Apêndice VI, apresentadas na Tabela A.9, enquanto que as características dimensionais das amostras e os dados obtidos após os ensaios encontram-se na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Informações acerca dos ensaios de fadiga (pré-forma 5; ER110S-1)

Id. CP	Espessura [mm]	Largura pescoço [mm]	Força Máxima [kN]	$\Delta\sigma$ [MPa]	Nº ciclos
5.1 <sup>(a)</sup>	2,86	14,85	25,00	529,8	181.588
5.2 <sup>(b)</sup>	2,21	14,82	12,80	351,7	771.395
5.3	2,70	14,70	25,80	585,0	80.797
5.4	2,75	14,70	3,75	528,8	207.013
5.5 <sup>(c)</sup>					
5.6	2,30	14,83	20,00	527,7	242.087
5.7	2,90	14,78	20,00	419,9	777.377
5.8 <sup>(c)</sup>					
5.9 <sup>(a)</sup>	3,00	14,87	20,80	419,6	1.110.538
5.10 <sup>(a)</sup>	2,54	14,84	17,60	420,2	1.100.136
5.11	2,95	14,85	28,50	585,5	78.664

a- Indício de nucleação da trinca por *fretting*

b- Dado descartado por falha técnica na instalação do corpo de prova

c- Corpo de prova com trinca preexistente

Observa-se nessa tabela que, conforme mencionado anteriormente, os CP's 5.5 e 5.8 não foram ensaiados devido à ocorrência de trincas preexistentes, enquanto que

os dados do ensaio do CP 5.2, elegido para ser ensaiado em uma faixa de tensão mais baixa ( $\Delta\sigma_4 = 352 \text{ MPa} \cong 0,57\text{Su}$ ), com a intensão de atingir-se vida infinita, teve de ser descartado devido à ocorrência de falha técnica na instalação do corpo de prova, provocando seu rompimento prematuro.

Considerando que a dispersão dos dados é comumente elevada em testes de fadiga, principalmente na região de alto ciclo (baixo  $\Delta\sigma$ ), os dados obtidos, de maneira geral, apresentaram baixa dispersão e, devido a isso, decidiu-se por aproveitar os resultados dos ensaios dos CP's fraturados com sinal de *fretting* (sinal de nucleação da trinca próxima à região de agarre), uma vez que maiores números de dados conferem maior confiabilidade na descrição da curva SxN.

De fato, atestou-se, com base no diagrama SxN apresentado na Figura 4.38, que todos os resultados ficaram compreendidos entre as linhas de sobrevivência de 5 e 95%, demonstrando a aceitabilidade dos dados incluídos.

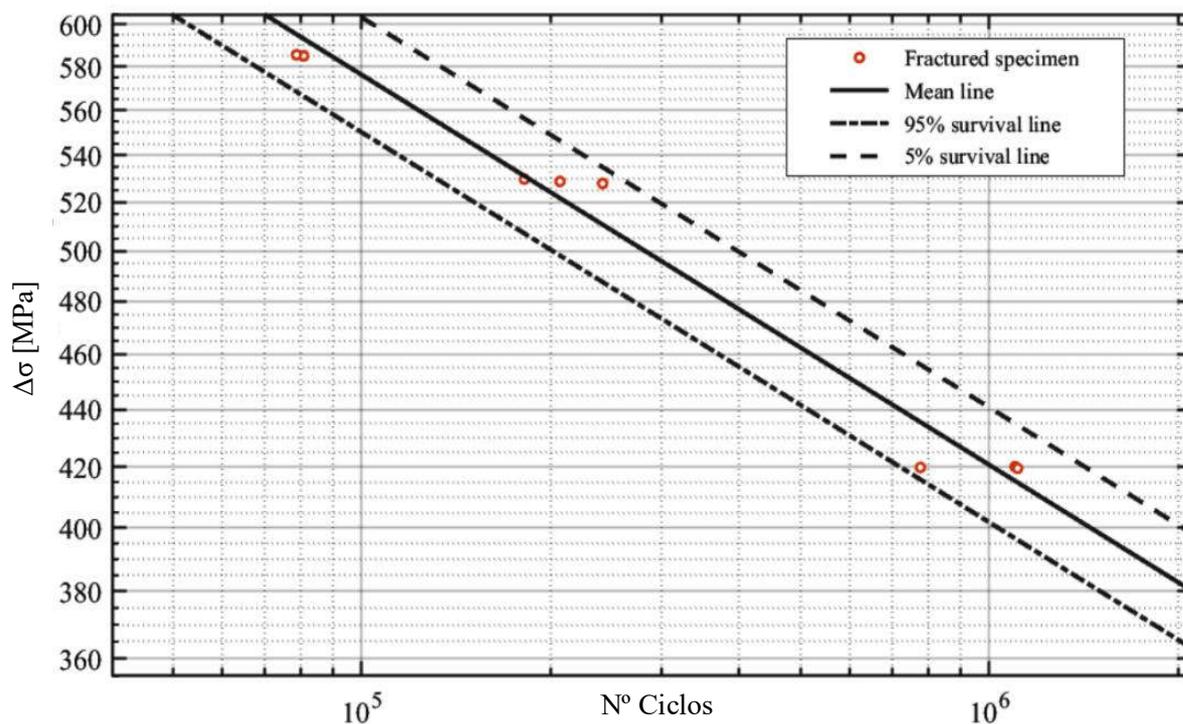


Figura 4.38 – Diagrama SxN obtido após ensaios (pré-forma 5; ER110S-1)

Com base nisso, pôde-se realizar o levantamento dos parâmetros representativos da curva SxN, os quais seguem nas Equações 4.2, 4.3 e 4.4:

- Inclinação da curva:  $m = 7,3322$ ;
- Faixa de tensão correspondente à vida de 2 milhões de ciclos na linha de 95% de sobrevivência:  $\Delta\sigma_{2e6} \cong 365,6$  MPa;
- Equações associadas à linha de 95% de sobrevivência:

Partindo-se de  $\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{2e6}}\right)^m = \frac{2(10^6)}{N}$  e substituindo-se pelos valores levantados, tem-se:

$$\Delta\sigma \cong 2644,6N^{(-0,1364)} \quad \text{Equação 4.2}$$

e

$$N \cong 1,24(10^{25})\Delta\sigma^{-7,3322} \quad \text{Equação 4.3}$$

Assim, pelo Eurocode 3, Part 1.9 (BSI, 2005), tem-se que:

$$\Delta\sigma_{100e6} \cong 2644,6(100(10^6))^{(-0,1364)} = 214 \text{ MPa} \quad \text{Equação 4.4}$$

Desta maneira, a liga avaliada, tendo obtido como  $\Delta\sigma_{100e6}$  (vida infinita) o valor de 214 MPa, superou as ligas pertencentes à maior classe posta pelo Eurocode, a qual seria 160 MPa para 2 milhões de ciclos, ou ainda, 64 MPa para 100 milhões de ciclos, revelando surpreendente desempenho desse material quando exposto a esforços cíclicos, tendo se equiparado a materiais de alta ductibilidade como aços de matriz austenítica.

De fato, tal comportamento dúctil é corroborado pelos ensaios conduzidos até aqui, porém, faz-se a ressalva que a geometria adotada para os CP's de fadiga (espessura de  $3,0 \pm 0,5$  mm) pode ter contribuído para este efeito, uma vez que é sabido que, neste tipo de ensaio, amostras de baixas espessuras tendem a apresentar maior ductibilidade.

Por fim, os resultados obtidos nos ensaios, somados às análises das macrografias, revelam que o material ensaiado apresenta considerável resistência ao processo de crescimento de trincas de fadiga. A grande deformação plástica ocorrida

instantes antes da fratura final evidencia a elevada ductilidade e capacidade de encruamento do material. Tais propriedades são de grande importância no sentido de mitigar os processos de dano associados à presença de trincas em peças estruturais, uma vez que conferem ao material considerável nível de tolerância à presença de defeitos internos e/ou de superfície.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados apresentados, é possível estabelecer as seguintes conclusões:

1. A metodologia de deposição se mostrou adequada, possibilitando a obtenção de paredes com geometria regular de baixo desvio dimensional e boa integridade estrutural em tempo relativamente reduzido em função da aplicação do gerenciamento térmico por RAQI;
2. Quanto à "printabilidade" pode-se afirmar que as amostras das classes ER80S-G e ER80S-B2 apresentaram características mais desafiadoras que as demais, tendo-se atestado maior susceptibilidade a escorrimentos e desestabilizações ao longo da deposição. Isso evidenciou-se pela forma que, com a mesma metodologia de deposição, essas amostras proporcionaram cordões de maior convexidade (menor molhabilidade), favorecendo o colapso da poça nas regiões das extremidades das paredes, regiões onde há maior acúmulo de calor devido à menor capacidade de extração. Em adição, constatou-se maior instabilidade nas aberturas de arco, o que contribuiu com maior incidência de escorrimentos, dificuldades essas menos presentes quando a deposição dos demais materiais;
3. De forma geral, os materiais resultantes da deposição dos arames-eletrodos incluídos no escopo do presente trabalho, nos moldes da metodologia proposta, demonstraram razoável isotropia quanto às propriedades mecânicas de limite de escoamento, limite de resistência, alongamento, tenacidade ao impacto (Charpy) e micro dureza;

4. Em termos de limite de escoamento e resistência à tração, comenta-se que, de maneira geral, houve perda de resistência e ganho de ductilidade dos materiais depositados quando comparados com os requisitos dispostos nas normas de fabricação. Há de se destacar, porém, o desempenho obtido nos ensaios de tração das paredes depositadas com as amostras da classe ER80S-B2, superando os resultados obtidos nos ensaios do ER110S-1, material de classe de maior resistência nominal entre os incluídos no escopo do trabalho. Este fato evidencia que, diferentemente do comportamento geral observado, o material resultante do depósito do arame ER80S-B2 não esteja tão susceptível aos efeitos de perda de resistência associados à imposição de sucessivos ciclos térmicos, levando à conclusão de que, eventualmente, arames de composição Cr+Mo tenham especial lugar quando na aplicação da tecnologia de fabricação por MADA em termos de utilização na condição *as printed*, ou seja, sem que sejam demandados tratamentos posteriores;
5. Quanto aos ensaios de dobramento, de maneira geral, os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, atestando boa higidez estrutural e baixa incidência de descontinuidades relevantes em todos os materiais testados, com exceção àqueles nos quais foram constatadas trincas pré-existentes localizadas nas extremidades das paredes, que levaram as amostras CP4, da pré-forma 04 e CP4 da pré-forma 05 a serem reprovadas, segundo critério disposto na AWS D1.1. Em sendo assim, demonstra-se neste trabalho o potencial de aplicação da tecnologia de MADA, revelando a alta capacidade que possui este processo de produzir peças e componentes com baixa ou nenhuma presença de defeitos. Contudo, há de se atentar para as regiões nas quais há ignições do arco pois, como se notou, todos os defeitos apresentados nas paredes envolvidas neste trabalho, inclusive dos CP's reprovados nos ensaios de dobramento, nuclearam, essencialmente, a partir dessas regiões;
6. Em se tratando dos ensaios Charpy, de forma geral, os materiais testados apresentaram considerável resistência à fratura, mesmo tendo sido ensaiados, em sua maioria, abaixo da temperatura recomendada pelas normas de fabricação. Faz-se o devido destaque para o excelente desempenho nos ensaios Charpy das

amostras das classes ER80S-G, ER110S-1 e ER70S-3, para os quais não foi possível avaliar a exata energia absorvida no impacto devido ao fato de terem superado a capacidade de avaliação do equipamento utilizado;

7. Nas avaliações de microdureza foi possível constatar bom nível de isotropia em todas as amostras testadas, corroborando os resultados obtidos nos ensaios de tração. Por outro lado, as microestruturas observadas em três planos ortogonais se mostraram diferentes entre si, mas com comportamentos similares (plano a plano) entre os diferentes consumíveis estudados. Chama atenção o fato de os materiais testados terem apresentado resultados de dureza superiores aos aços estruturais de matriz ferrítica com teores de carbono similares, porém, apresentando elevada ductilidade e resistência à fratura, como demonstrado nos demais ensaios. Comenta-se ainda da importância em se avaliar a dureza dos materiais depositados por MADA, pois, por meio desses ensaios foi possível avaliar regiões e planos de maior susceptibilidade ao ganho de dureza em função das condições de extração de calor as quais as peças são submetidas, possibilitando o direcionamento na utilização de técnicas de gerenciamento térmico, conferindo maior confiabilidade no emprego da MADA;
8. Por fim, os resultados dos ensaios de fadiga conduzidos nas amostras extraídas da pré-forma 5 (ER110S-1) revelaram surpreendente desempenho quando expostos a esforços cíclicos, tendo se equiparado a materiais de alta ductibilidade como aços de matriz austenítica. Essa constatação é de suma importância, uma vez que alça o processo de fabricação por MADA a patamares ainda mais promissores, permitindo ampliar o nicho de aplicação dessa tecnologia.

## CAPÍTULO VI

### PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Buscando dar continuidade à pesquisa apresentada neste trabalho, feito o destaque para sua relevância, bem como considerando o impacto do tema proposto para trabalhos que venham a usufruir das discussões aqui colocadas, além de propor a continuidade sobre a investigação das hipóteses por ele apresentados, as quais não tiveram a oportunidade de serem abordadas, propõe-se para um futuro que, espera-se, não tão distante:

1. Proposição de metodologia para investigação experimental acerca da provável existência do fenômeno de “autorregulação do incremento vertical” em deposições de ligas de aço utilizando processo pulsado sinérgico;
2. Dadas as dificuldades para fosse estabelecido o comparativo entre a composição química dos arames-eletrodos, registradas nos certificados de composição química fornecidos pelo fabricante, e os resultados obtidos das análises químicas dos materiais depositados, importante para que se tenha possibilidade de esclarecer eventuais divergências entre elas e suas consequências em termos de metalurgia e comportamento mecânico, sugere-se que, em trabalhos futuros, sejam procedidas as medições de composição química por métodos de maior acurácia e confiabilidade, como por exemplo análises via Espectroscopia de Emissão Ótica por Descarga Luminescente (GDOES) ou, ainda, que sejam realizadas medições de composição química utilizando-se o mesmo método/equipamento para avaliar tanto o metal de adição, quanto o metal depositado, possibilitando maior comparabilidade entre os resultados e, conseqüentemente, maior verossimilhança nas análises posteriores;

3. Investigação e análise experimental sobre a influência da variação energia de deposição sobre os aspectos metalúrgicos e propriedades mecânicas de ligas transformáveis depositadas por GMA-DED e verificação da possibilidade de modulação de propriedades mecânicas por meio do controle das taxas de resfriamento;
4. Postas as diferentes respostas das amostras verticais em relação às horizontais identificadas nos resultados de ensaios de impacto Charpy, levando-se em consideração o reduzido número de CP's ensaiados para cada material, ponderando-se que tal fato pode, eventualmente, ter produzido erros sistemáticos, faz-se de suma importância, para que haja adequada constatação e consequente elucidação do fenômeno, que seja proposto e executado um planejamento experimental específico, objetivando identificar as relações de causa e efeito acerca desta suposta tendência no comportamento mecânico de materiais produzidos por MADA;
5. Para trabalhos futuros seria de grande conveniência incluir no escopo da pesquisa a avaliação de outras propriedades físicas, como resistência à corrosão, buscando avaliar a existência e o grau de isotropia destes materiais quanto à essas propriedades; e
6. Faz-se relevante pontuar a necessidade de se incluir em futuras oportunidades uma avaliação do acabamento final das peças depositadas, na qual poderiam ser avaliadas e mensuradas as ondulações superficiais (*waveness*) características de deposições por MADA, a fim de que sejam fornecidos dados que permitam o aprimoramento do processo de deposição de forma que seja possível traçar estratégias, especificamente no que concerne o planejamento de trajetória e parâmetros de deposição, que possibilitem a obtenção de pré-formas de melhor acabamento, contribuindo com o melhor aproveitamento de material, evitando eventuais desperdícios que possam comprometer o potencial da MADA como processo de fabricação ambiental e operacionalmente sustentável.

7. Dar continuidade aos ensaios de fadiga dos materiais que, inoportunamente, não puderam ser avaliados no contexto presente, uma vez que, pelo que se viu, há evidências de que a MADA tenha potencial para produção de materiais de elevada tenacidade e tolerância com a presença de defeitos internos, podendo encontrar nichos de aplicação antes não considerados.

## CAPÍTULO VII

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTI, E. A.; SILVA, L. J. DA; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, n. 2, p. 190–198, 2014.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D1.1: **Structural Welding Code - Steel**. 2020. 540 p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS A5.18: **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**. 2005. 38 p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS A5.28: **Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**. 2005. 34p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 20S:2021 **Additively Manufactured Metallic Components for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries**. p. 1-39, 2021.

AMERICAN SOCIETY OF TENCING AND MATERIALS INTERNATIONAL. ASTM E8/E8M-22 **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials** . ASTM Standard, p. 1–12, 2022.

AMERICAN SOCIETY OF TENCING AND MATERIALS INTERNATIONAL. ASTM F3187 **Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals**. ASTM Standard, p. 1–22, 2016.

AMERICAN WELDING SOCIETY . AWS. D20.1/D20.1M:2019 **Specification for Fabrication of Metal Components using Additive Manufacturing**. p. 1–106, 2019.

CUNNINGHAM, C. R. et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 22, n. June, p. 672–686, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>.

DAHAT, S. et al. A Methodology to Parameterize Wire + Arc Additive Manufacturing: A Case Study for Wall Quality Analysis. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 4, n. 1, p. 14, 2020.

DESPEISSE, M. et al. Sustainable Value Roadmapping Framework for **Additive Manufacturing**. *Procedia CIRP*, v. 61, p. 594–599, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.186>.

DING, D. et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 1–4, p. 465–481, 2015.

ERMAKOVA, A. et al. Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 109, n. June, p. 102685, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102685>.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **BS EN ISO 14341: Welding Consumables – Wire Electrodes and Weld Deposits for Gas Shielded Metal Arc Welding of Non Alloy and Fine Grain Steels** – Classification. 2011. 12p.

GENG, H. et al. Formation and improvement of surface waviness for additive manufacturing 5A06 aluminium alloy component with GTAW system. **Rapid Prototyping Journal**, v. 24, n. 2, p. 342–350, 2018.

HADEN, C. V. et al. Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties. **Additive Manufacturing**, v. 16, n. 2010, p. 115–123, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.010>.

HÖNNIGE, J. R.; WILLIAMS, S.; ROY, M. J. Residual Stress Characterization and Control in the Additive Manufacture of Large Scale Metal Structures. **Residual Stresses** 2016, v. 2, n. July, p. 455–460, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION AND AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. ISO/ASTM 52900 [ASTM

F2792]: **Additive manufacturing – General principles – Terminology**. 2015. 19 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 52900:2015, A. **Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology**. ASTM International, v. i, p. 1–9, 2015. Disponível em: [http://compass.astm.org/EDIT/html\\_annot.cgi?ISOASTM52900+15](http://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?ISOASTM52900+15).

Jl, L. et al. Microstructure and mechanical properties of 304L steel fabricated by arc additive manufacturing. **MATEC Web of Conferences**, v. 128, 2017.

J. GE, J. LIN, Y. CHEN, Y. LEI, H. FU, Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: process stability, microstructural evolution, and tensile properties,]. **Alloys Compd.** 748 (2018) 911-921

KYVELOU, P. et al. Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material. **Materials and Design**, v. 192, p. 108675, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108675>.

LI, F. et al. Thermoelectric cooling-aided bead geometry regulation in wire and arc-based additive manufacturing of thin-walled structures. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 8, n. 2, 2018.

LUZ, A. P.; RIBEIRO, S.; PANDOLFELLI, V. C. Review article: Use of the wettability in the investigation of the corrosion behaviour of the refractory materials. **Ceramica**, v. 54, n. 330, p. 174–183, 2008.

MACHADO, C. G.; WINROTH, M. P.; RIBEIRO DA SILVA, E. H. D. Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 5, p. 1462–1484, 2020. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777>.

MARTINA, F. et al. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 6, p. 1377–1386, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002>.

RIBEIRO, I. et al. Framework for life cycle sustainability assessment of additive manufacturing. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 3, 2020.

SCOTTI, F. M. Manufatura aditiva por deposição a arco de paredes finas de aço inoxidável super duplex com resfriamento ativo por quase-imersão. 2021. 125 p. **Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, Brasil.

SILVA, L. J. Near-Immersion Active Cooling for Wire + Arc Additive Manufacturing: From Concept to Application. 2019. 116 p. **Tese, Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, Brasil.

SILVA, L. J. et al. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 5–6, p. 2513–2523, 2020.

SINGH, P.; DUTTA, D. Multi-Direction Layered Deposition – An Overview of Process Planning Methodologies. **Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium**, p. 279–288, 2003. <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/5563>

VIEIRA, L. K. Avaliação Microestrutural de Aços da Classe API5LX80 Submetidos a Diferentes Ciclos Térmicos. 2007. 106p. **Dissertação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, Brasil,]

WU, B. et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 250, n. December 2016, p. 304–312, 2017.

YEHOROV, Y.; DA SILVA, L. J.; SCOTTI, A. Balancing WAAM Production Costs and Wall Surface Quality through Parameter Selection: A Case Study of an Al-Mg5 Alloy Multilayer-Non-Oscillated Single Pass Wall. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 3, n. 2, p. 32, 2019.

## APÊNDICES

### APÊNDICE I - REGISTROS FOTOGRÁFICOS DAS PRÉ-FORMAS DEPOSITADAS

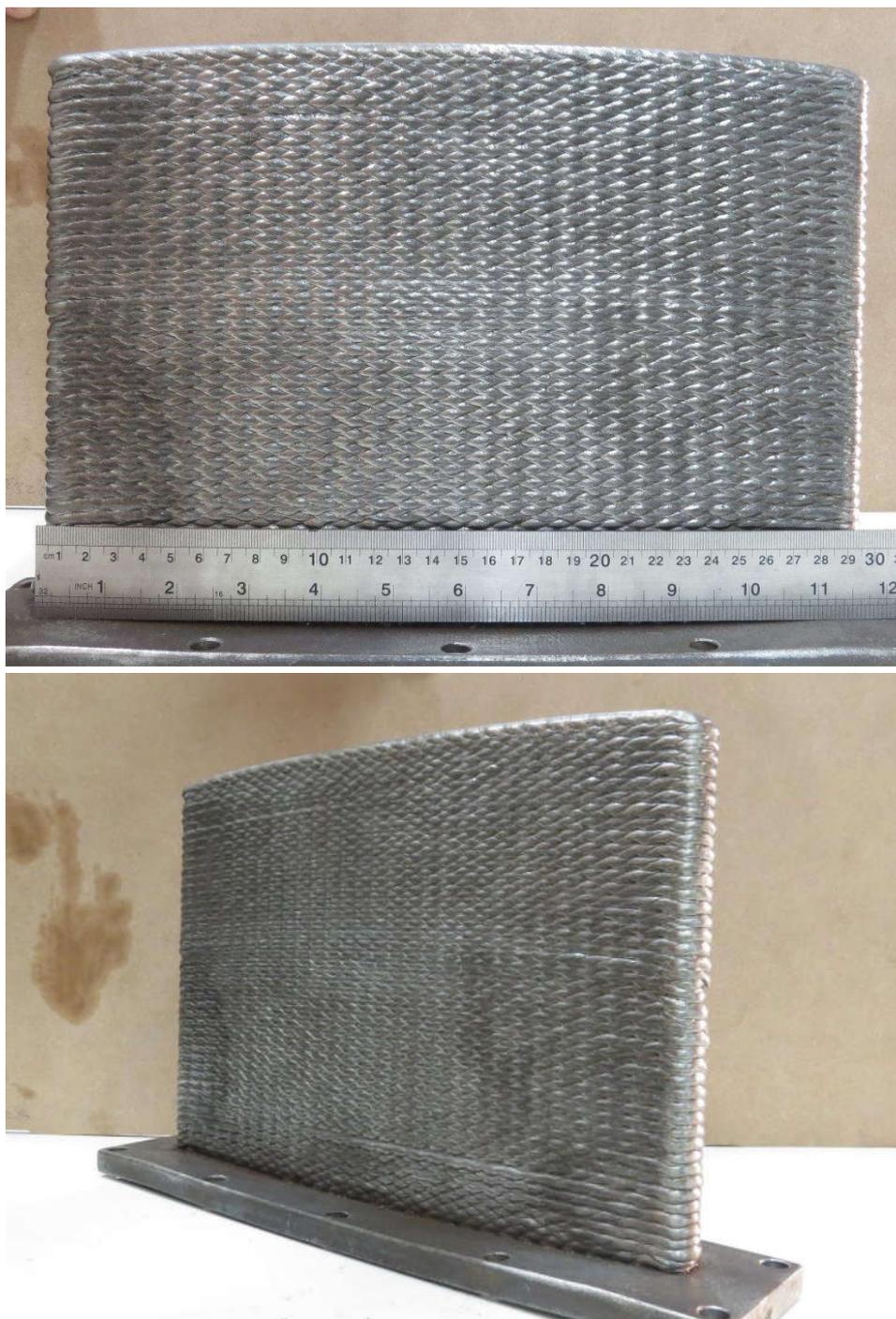


Figura A.1 – Vista frontal (acima) e vista em perspectiva (abaixo) da pré-forma 3, depositada com o arame eletrodo 2 (ER70S-6)

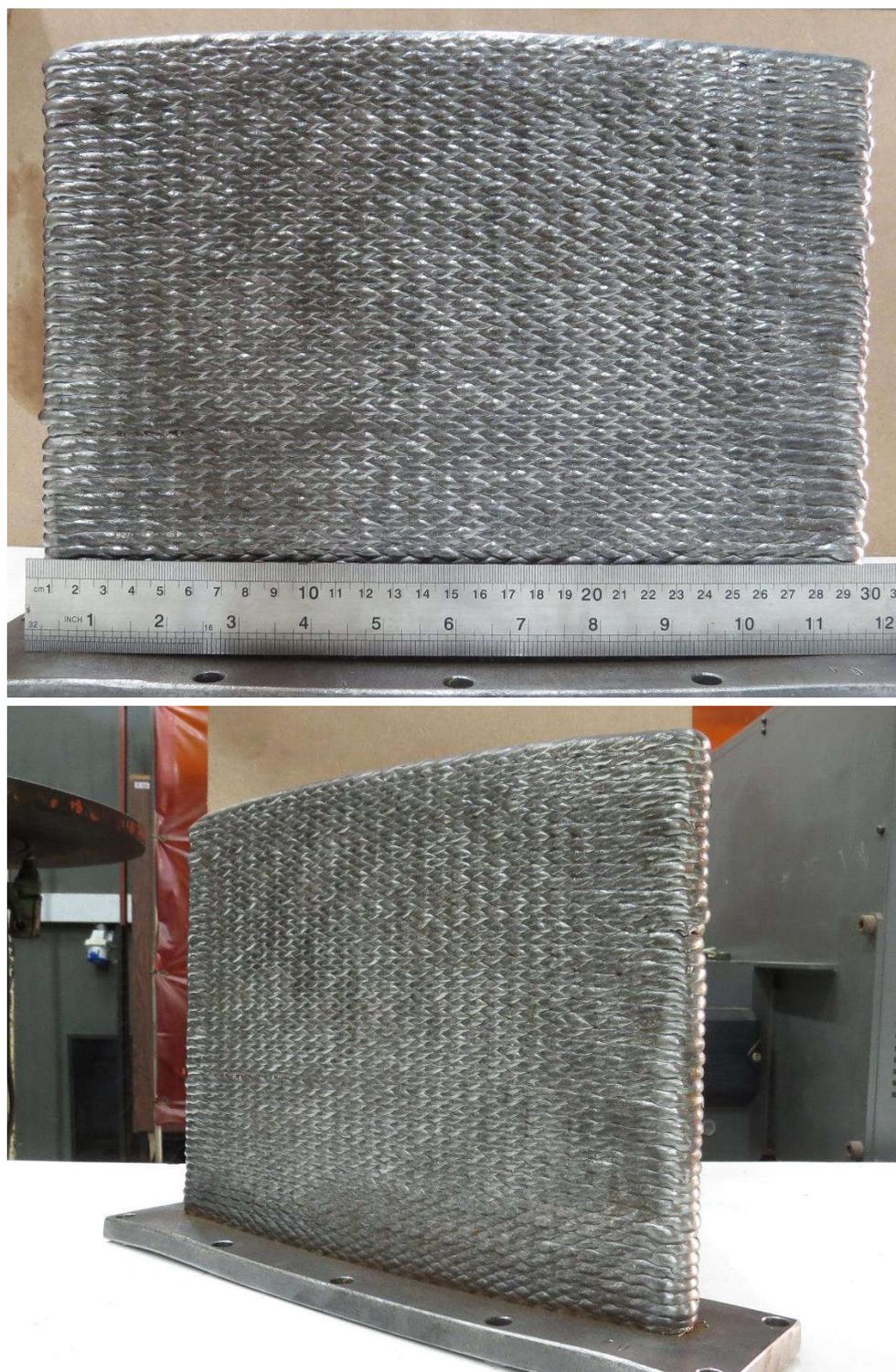


Figura A.2 – Vista frontal (acima) e vista em perspectiva (abaixo) da pré-forma 4, depositada com o arame eletrodo 3 (G4Si1)

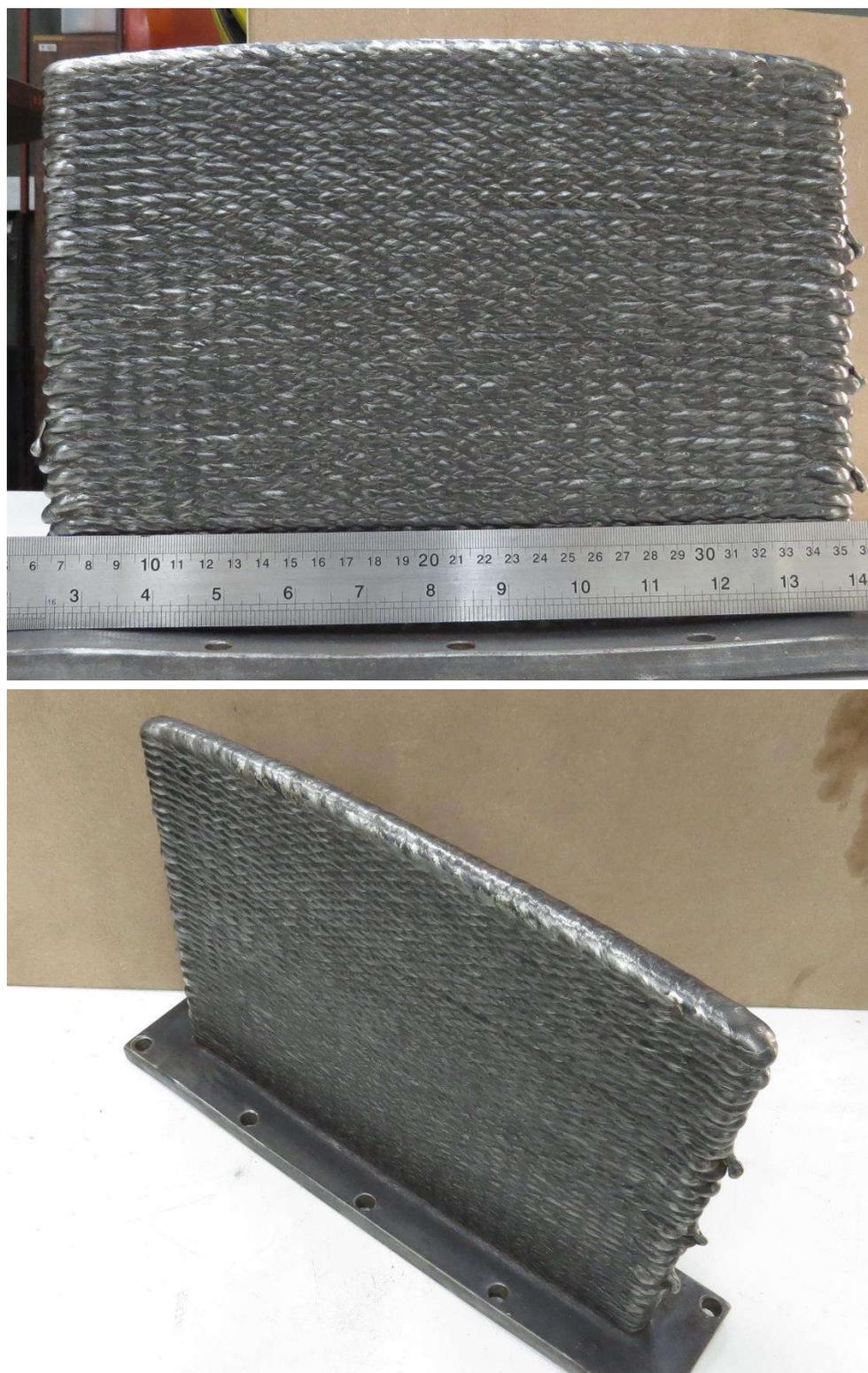


Figura A.3 – Vista frontal (acima) e vista em perspectiva (abaixo) da pré-forma 5, depositada com o arame eletrodo 6 (ER110S-1)

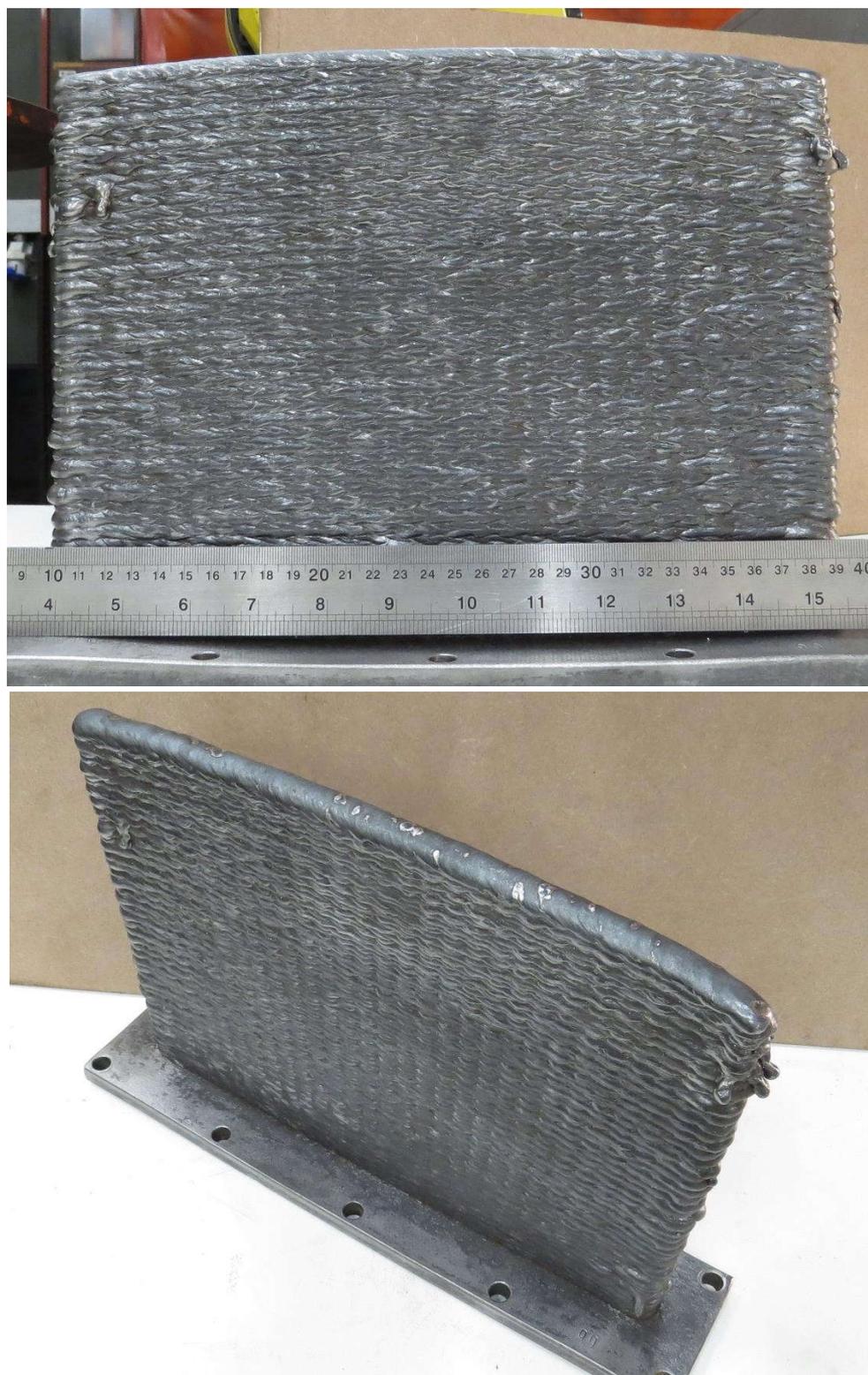


Figura A.4 – Vista frontal (acima) e vista em perspectiva (abaixo) da pré-forma 6, depositada com o arame eletrodo 4 (ER80S-G)



Figura A.5 – Único registro feito da pré-forma 7, depositada com o arame eletrodo 5 (ER80S-B2) após a ocorrência de sucessivas intercorrências durante sua deposição

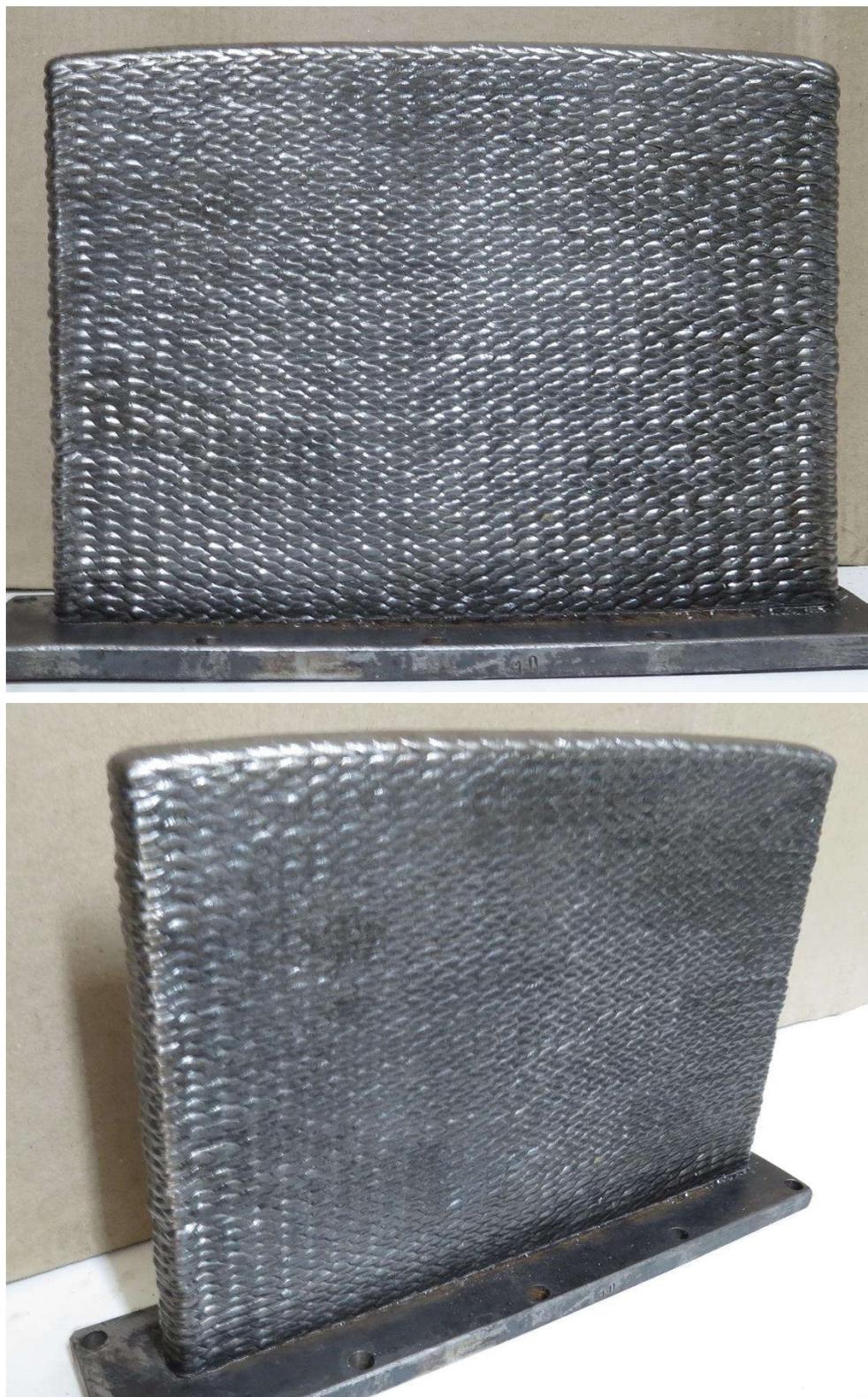


Figura A.6 – Vista frontal (acima) e vista em perspectiva (abaixo) da pré-forma 8, depositada com o arame eletrodo 1 (ER70S-3)

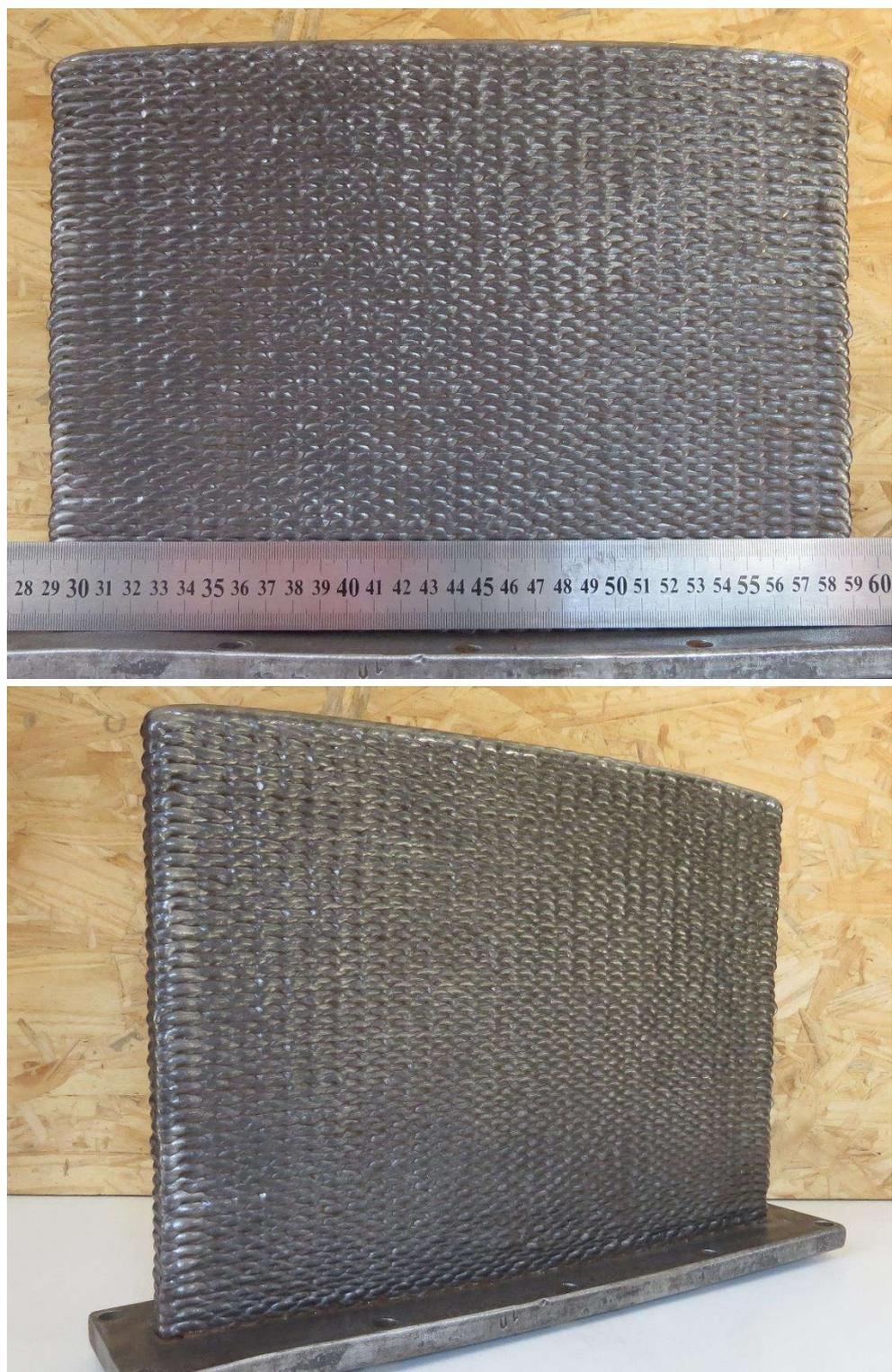


Figura A.7 – Vista frontal (acima) e vista em perspectiva (abaixo) da pré-forma 9, depositada com o arame eletrodo 5 (ER80S-B2)

## APÊNDICE II – OSCILOGRAMAS E GRÁFICOS DE ACOMPANHAMENTO DOS SINAIS ELÉTRICOS DAS DEPOSIÇÕES

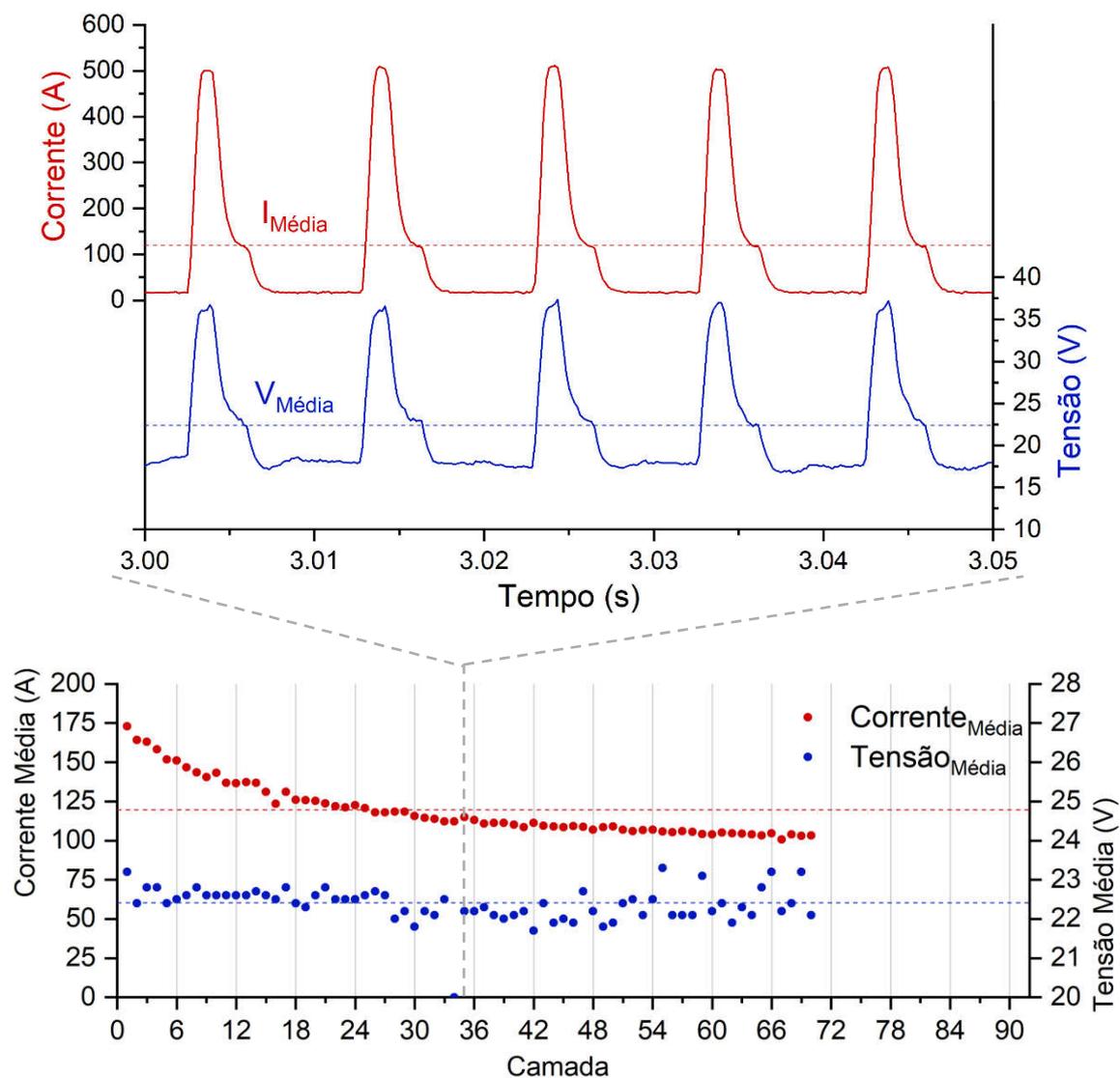


Figura A.8 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 35ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 1 com o arame-eletrodo 4 (ER80S-G)

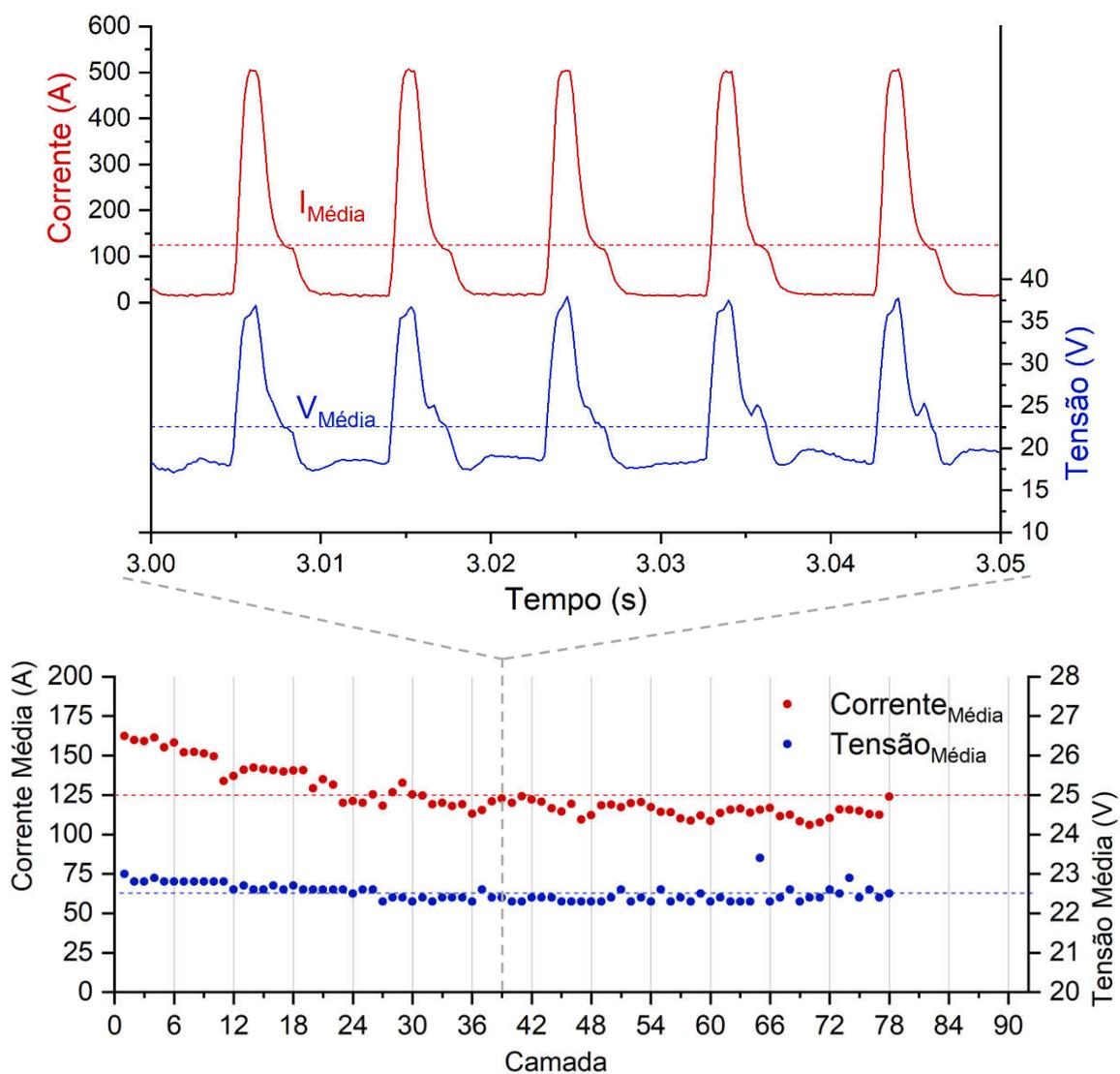


Figura A.9 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 39<sup>a</sup> camada referentes à deposição da pré-forma 2 com o arame-eletródo 5 (ER80S-B2)

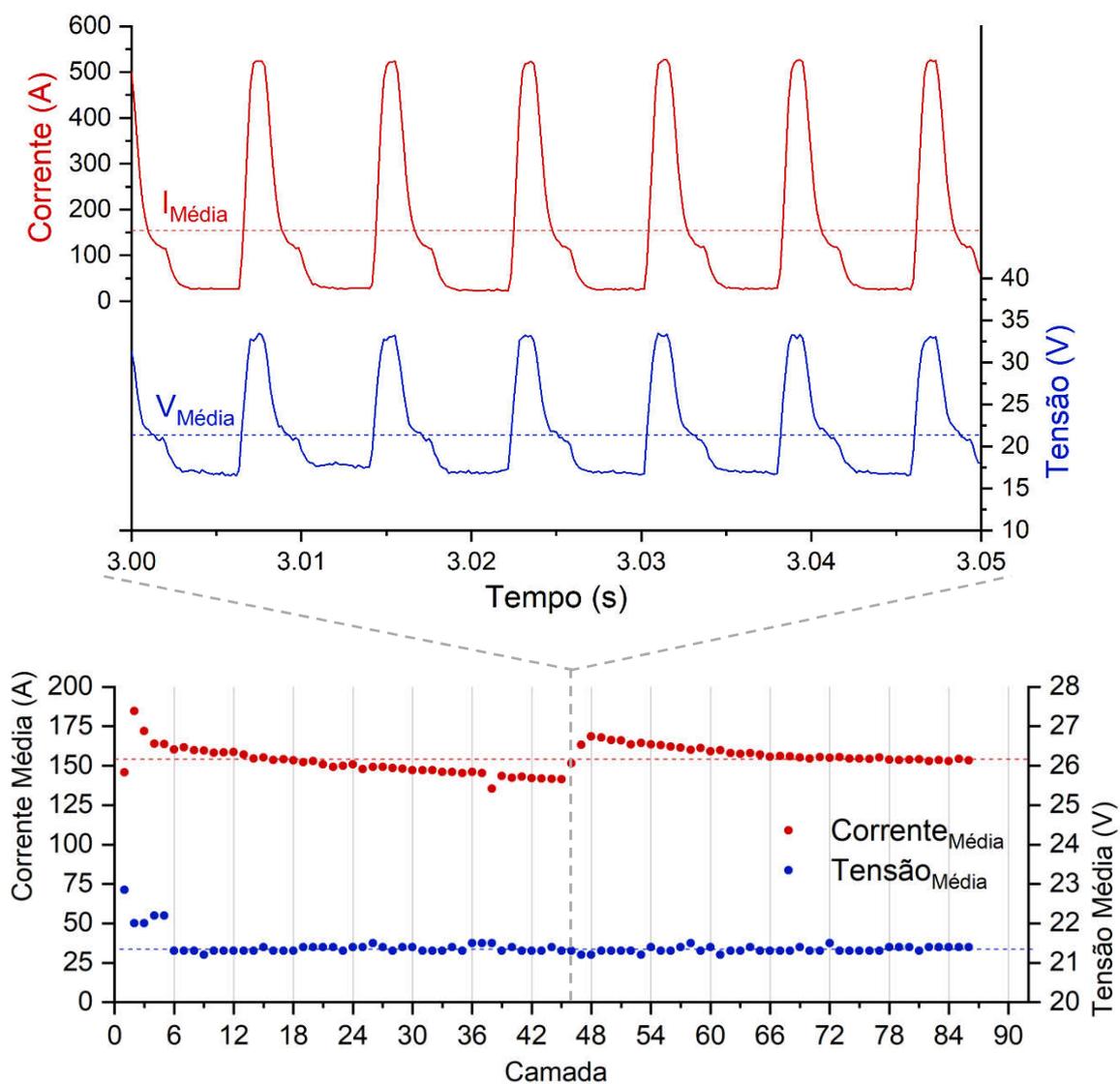


Figura A.10 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 46<sup>a</sup> camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 3 com o arame-eletrodo 2 (ER70S-6)

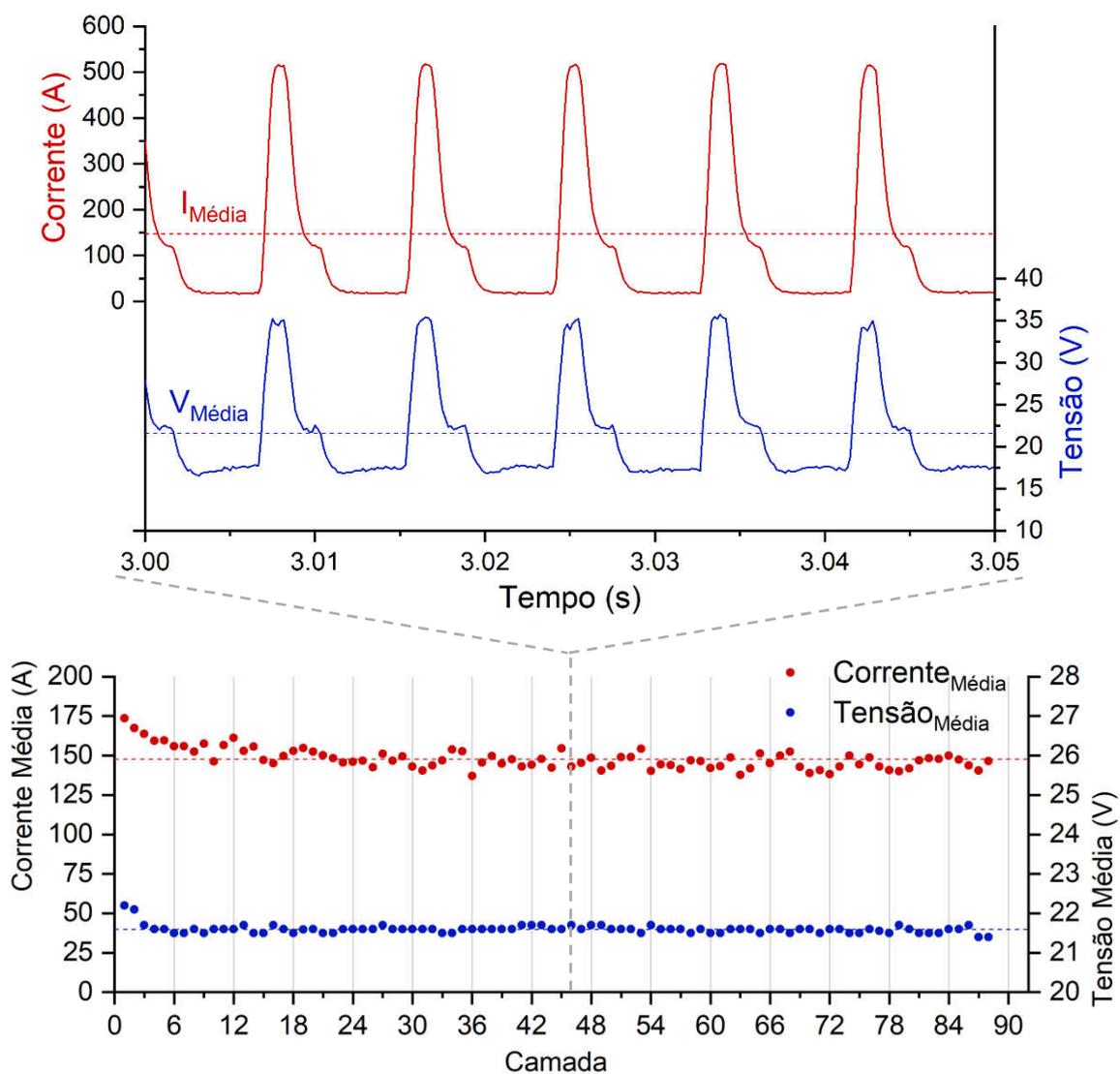


Figura A.11 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 44ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 4 com o arame-eletrodo 3 (G4Si1)

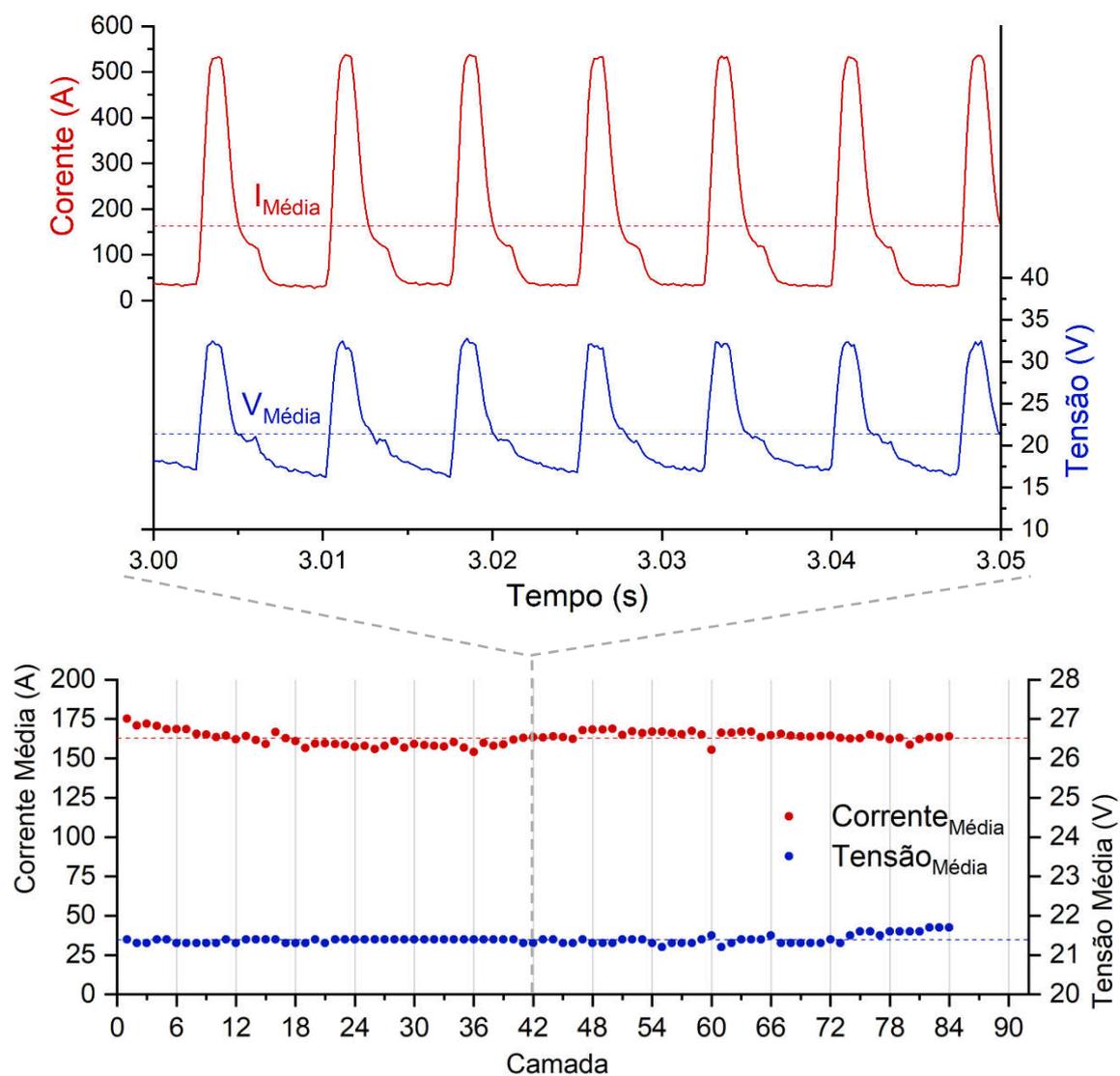


Figura A.12 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 42<sup>a</sup> camada referentes à deposição da pré-forma 5 com o arame-eletrodo 6 (ER110S-1)

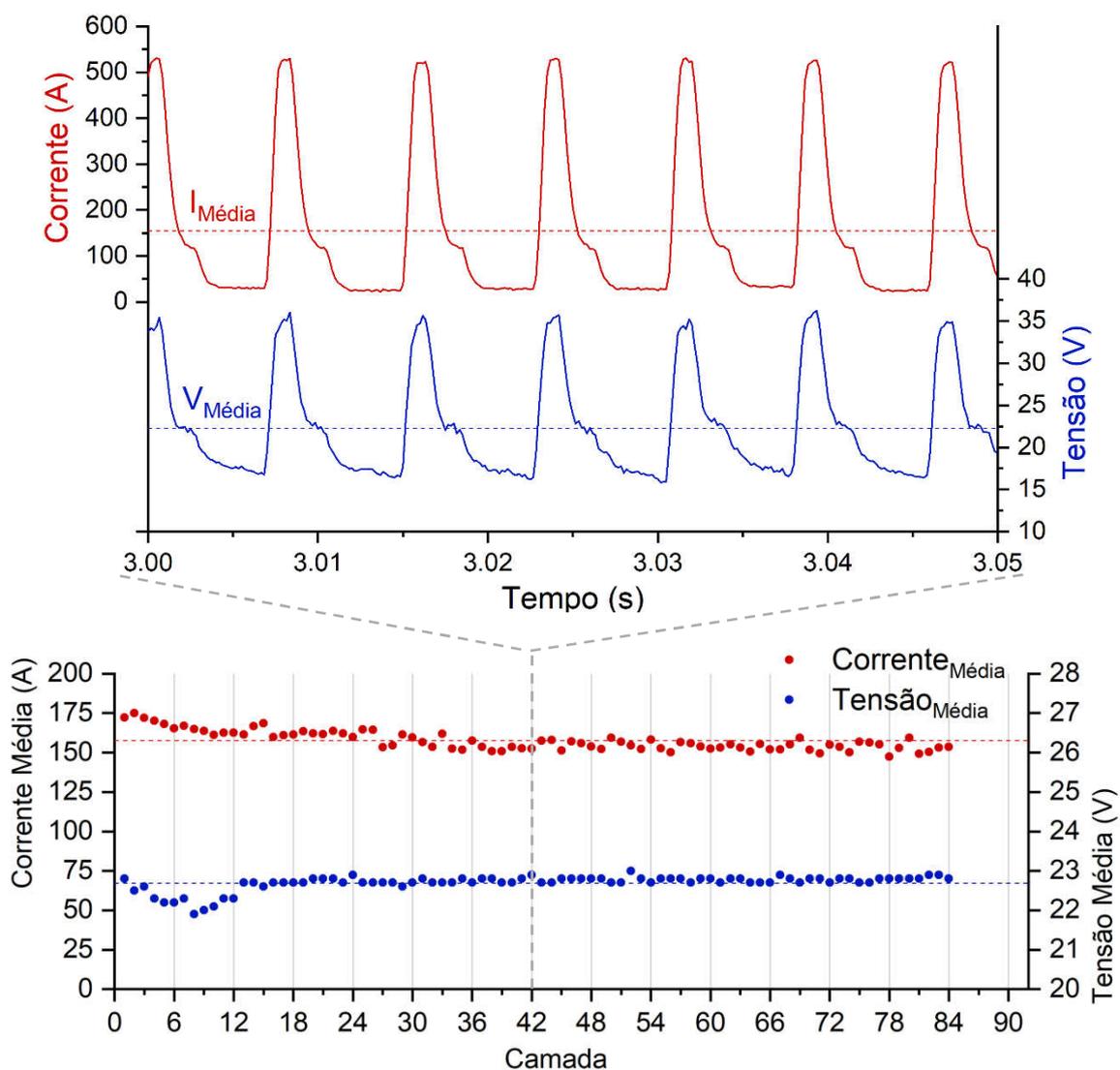


Figura A.13 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 42ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 6 com o arame-eletrodo 4 (ER80S-G)

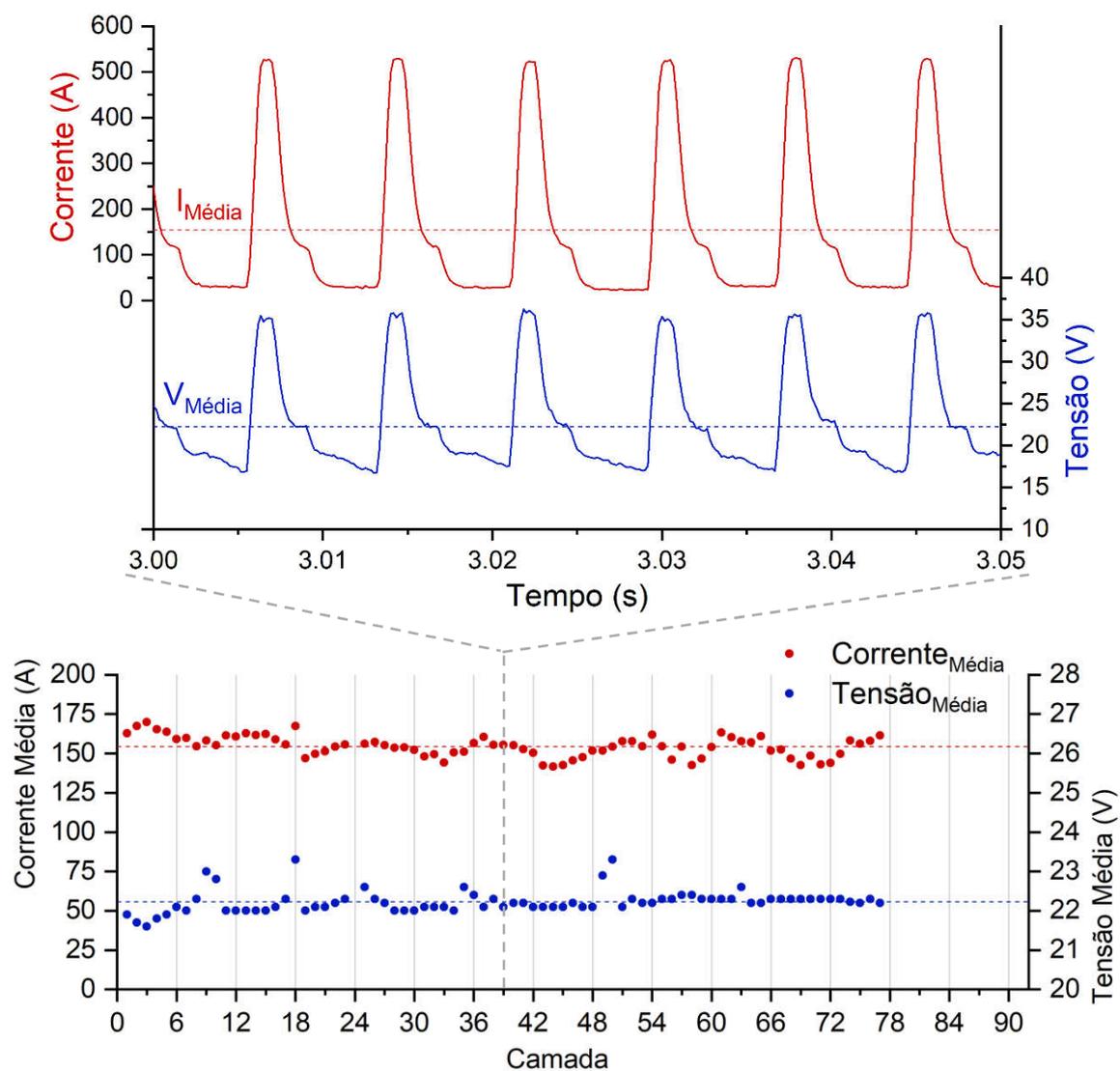


Figura A.14 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 39ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 7 com o arame-eletrodo 5 (ER80S-B2)

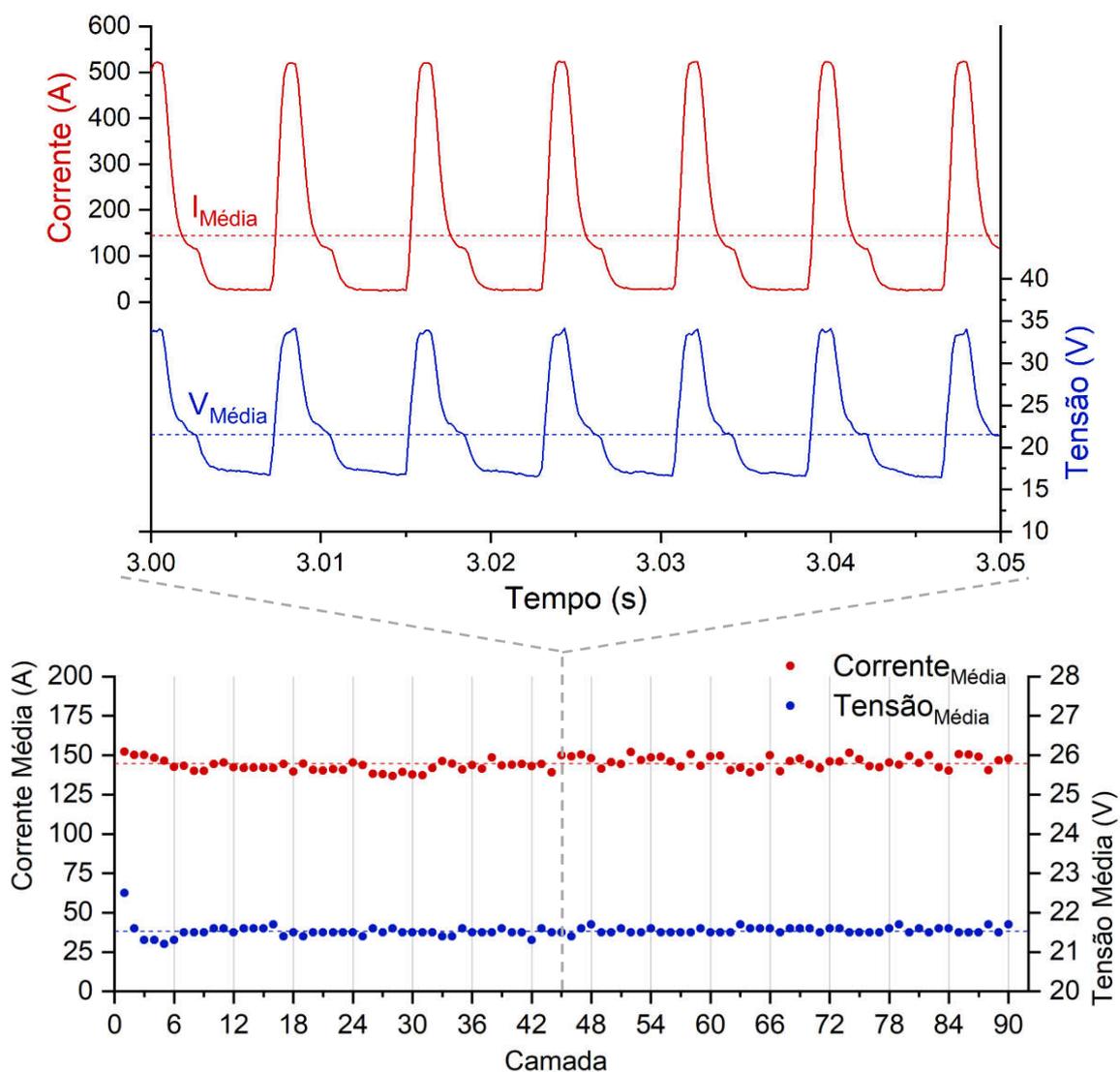


Figura A.15 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 45ª camada (acima) referentes à deposição da pré-forma 8 com o arame-eletródo 1 (ER70S-3)

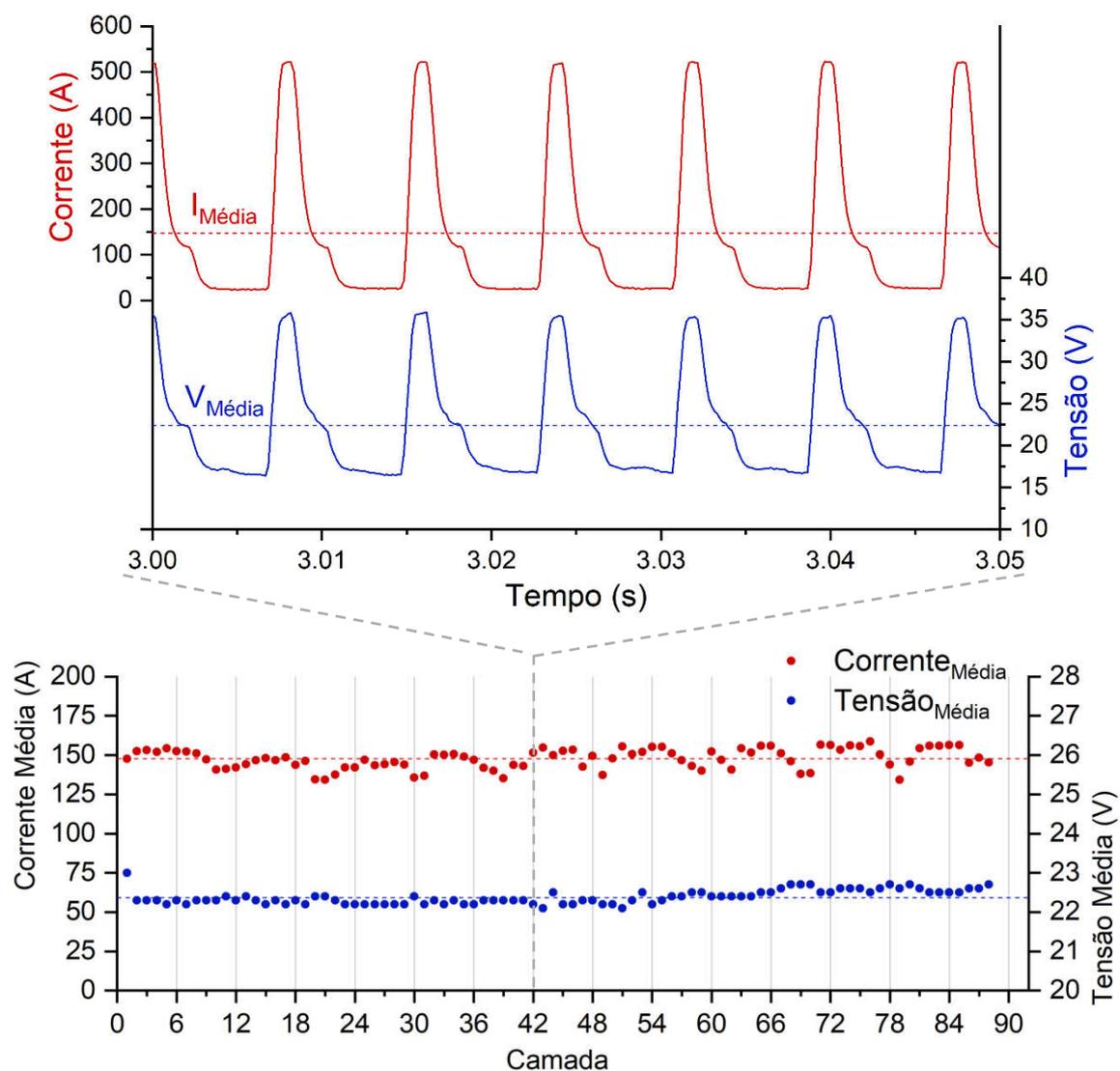


Figura A.16 – Gráfico de acompanhamento e registro dos sinais elétricos por camada depositada (abaixo) e oscilograma de corrente e tensão da 42ª camada referentes à deposição da pré-forma 9 com o arame-eletrodo 5 (ER80S-B2)

**APÊNDICE III – CURVAS DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO OBTIDAS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS EXTRAÍDAS DAS PRÉ-FORMAS**

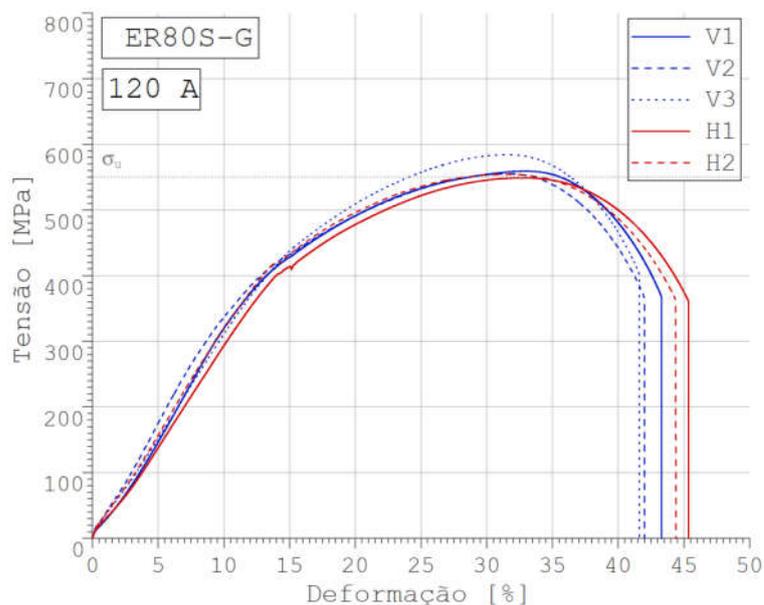


Figura A.17 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 1, depositada com o arame-eletrodo 2 (ER80S-G)

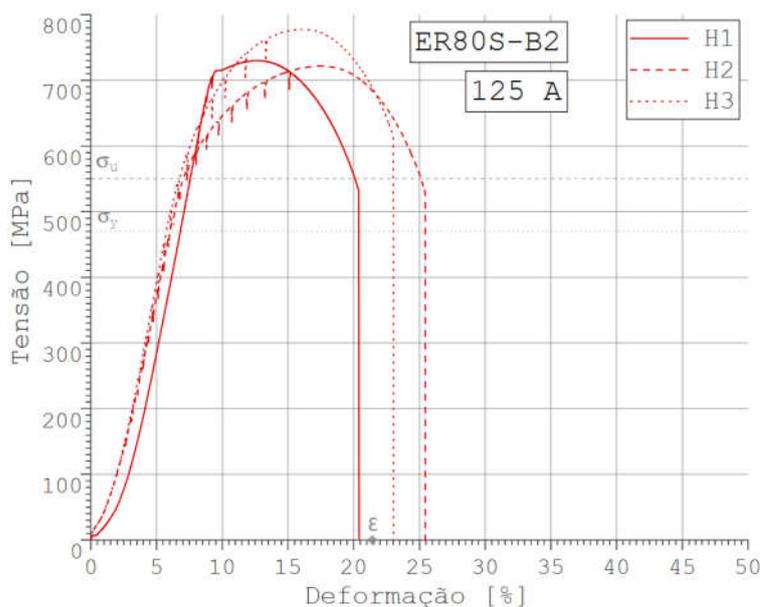


Figura A.18 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 2, depositada com o arame-eletrodo 3 (ER80S-B2)

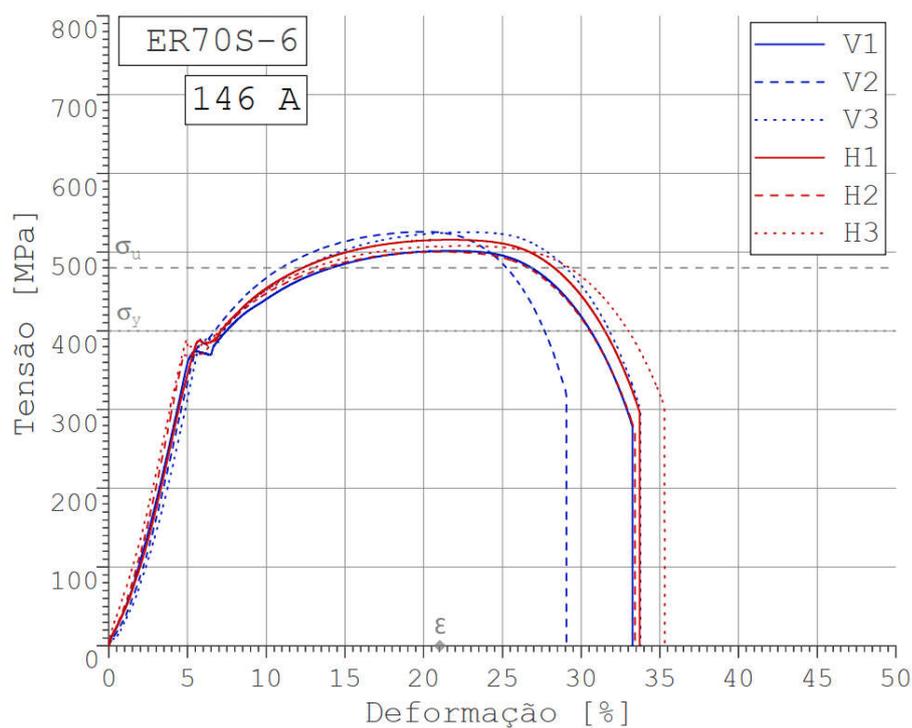


Figura A.19 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 3, depositada com o arame-eletrodo 1 (ER70S-6)

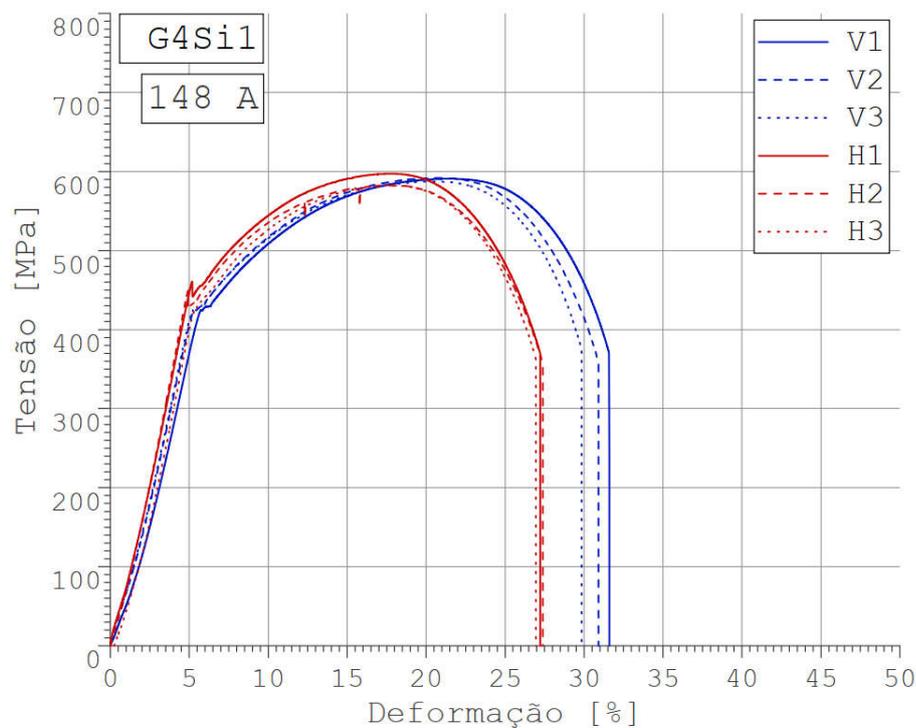


Figura A.20 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 4, depositada com o arame-eletrodo 1 (G4Si1)

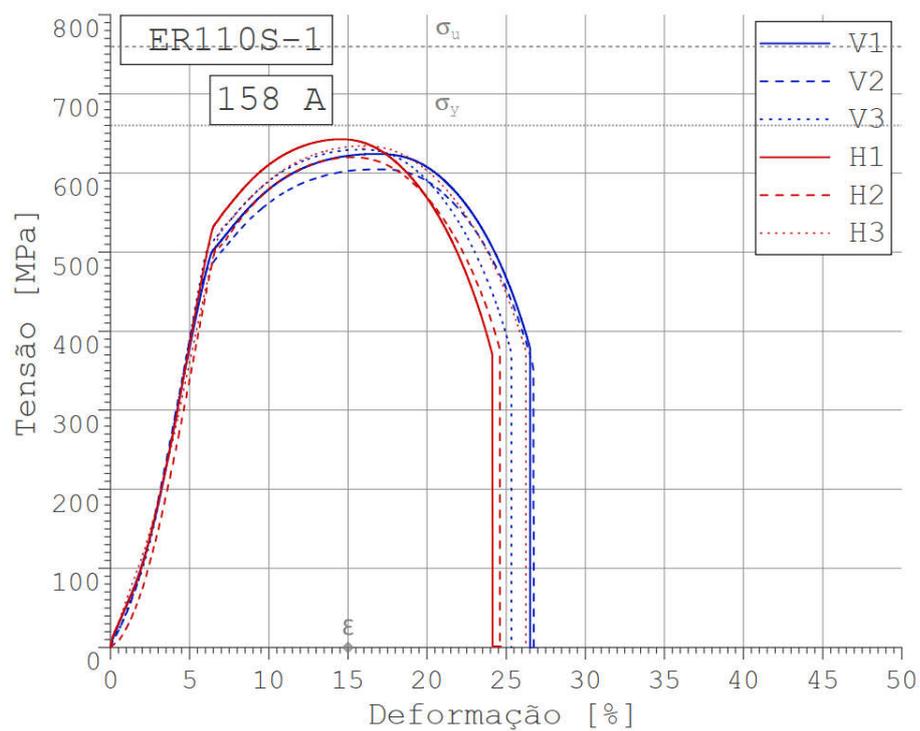


Figura A.21 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 5, depositada com o arame-eletrodo 4 (ER110S-1)

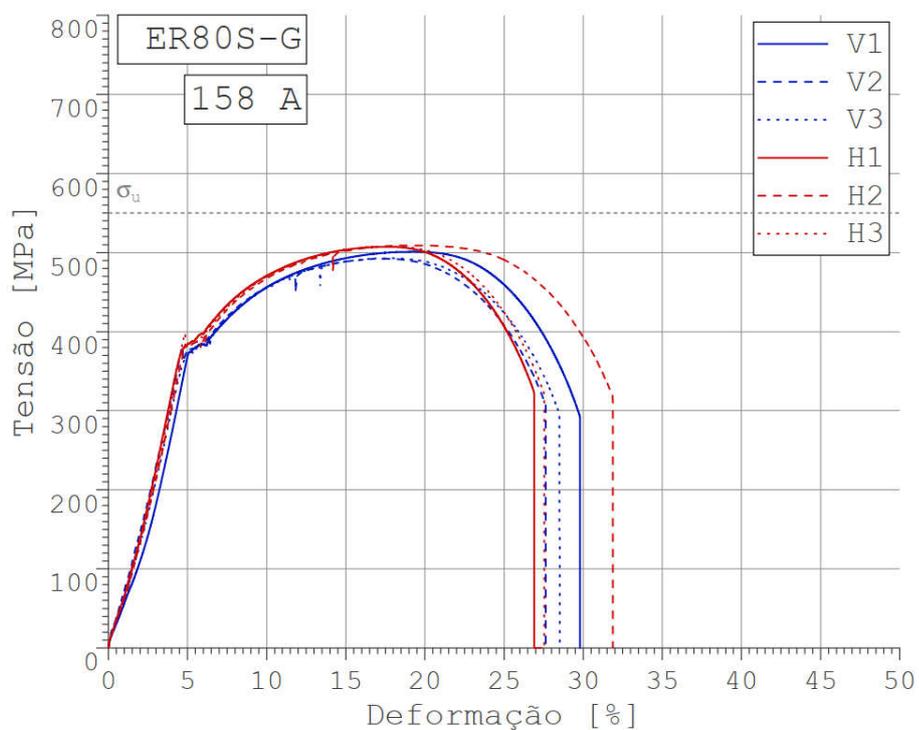


Figura A.22 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 6, depositada com o arame-eletrodo 2 (ER80S-G)

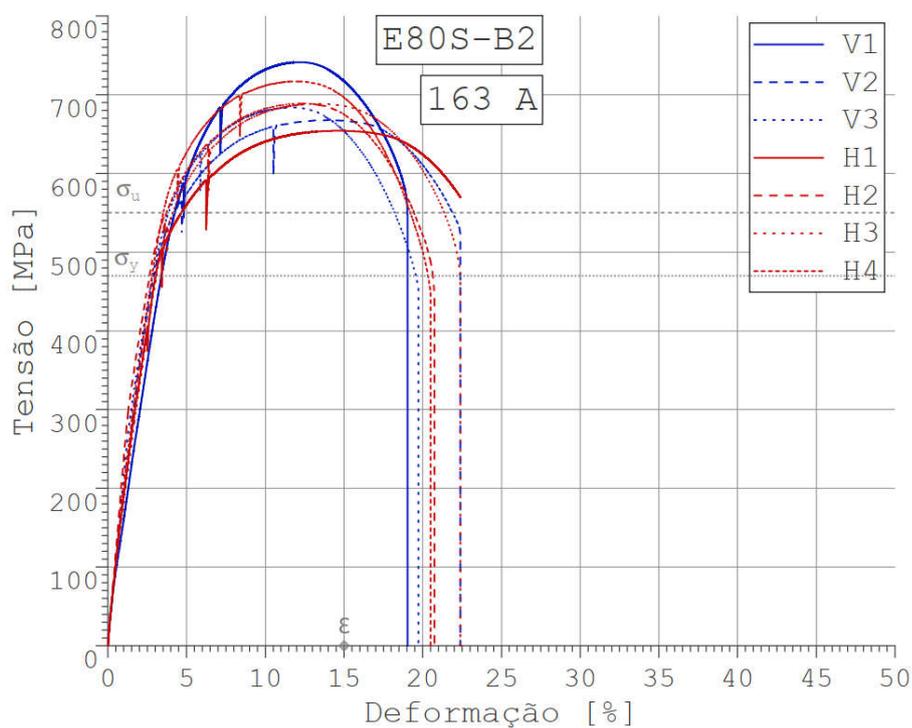


Figura A.23 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 7, depositada com o arame-eletrodo 3 (ER80S-B2)

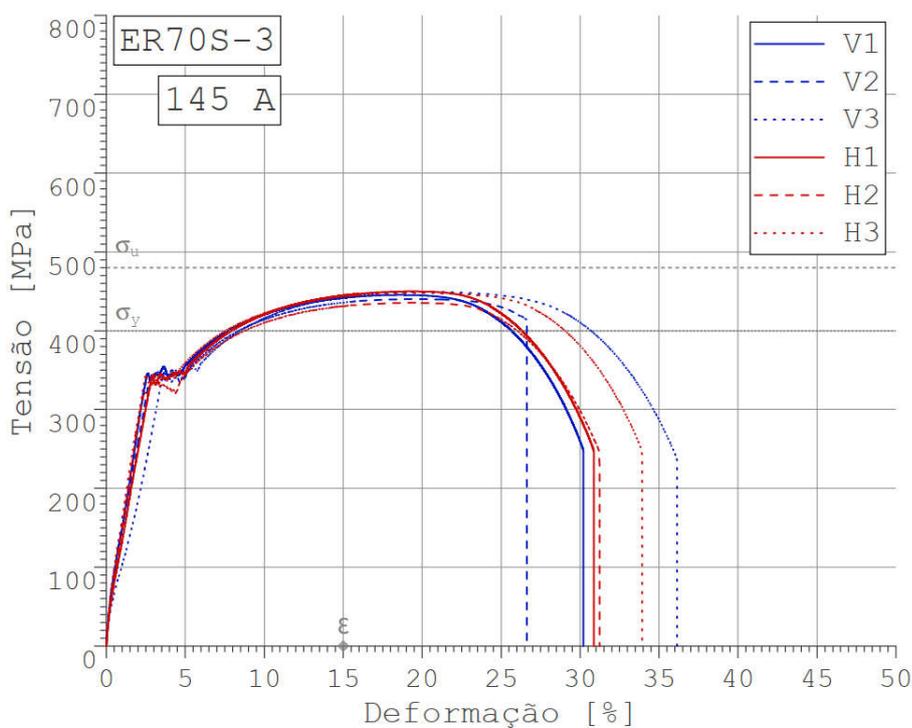


Figura A.24 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 8, depositada com o arame-eletrodo 6 (ER70S-3)

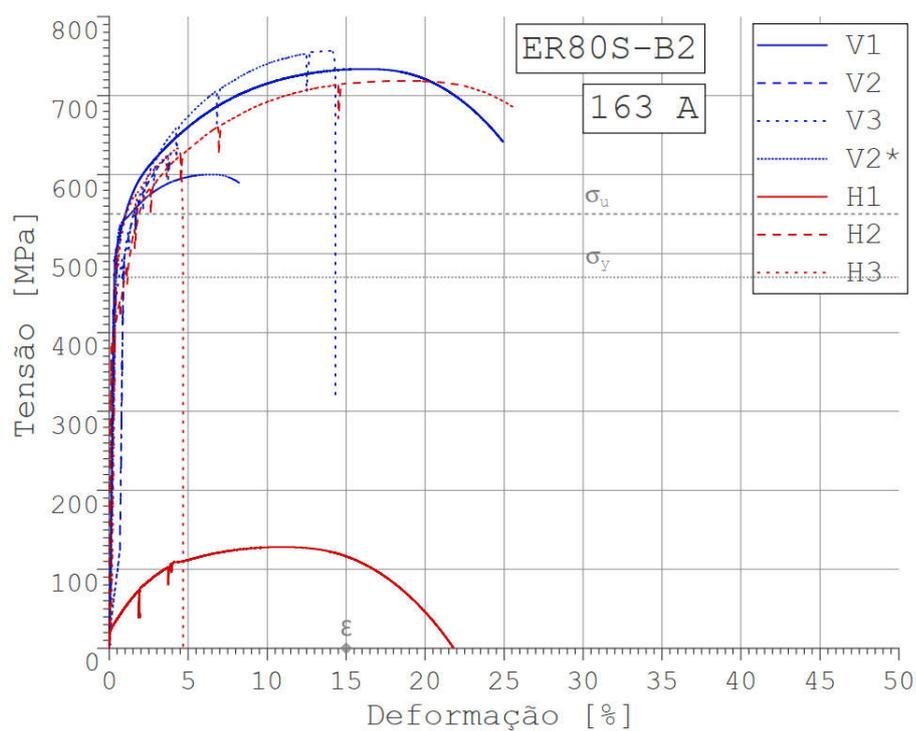


Figura A.25 – Curvas de tensão x deformação referentes aos ensaios de tração das amostras retiradas da pré-forma 9, depositada com o arame-eletrodo 3 (ER80S-B2)

## APÊNDICE IV - REGISTROS FOTOGRÁFICOS E PARECERES DAS AMOSTRAS ENSAIADAS

Tabela A.1 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 1, depositada com o arame-eletrodo 4 (ER80S-G)

Pré-forma	Eletrodo	CP	Orientação	Parecer	Registro
01	ER80S-G	1	Horizontal	Aprovado	
		2		Aprovado	
		3	Vertical	Aprovado	
		4		Aprovado	

Tabela A.2 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 2, depositada com o arame-eletrodo 5 (ER80S-B2)

Pré-forma	Eletrodo	CP	Orientação	Parecer	Registro
02	ER80S-B2	1	Horizontal	Aprovado	
		2		Aprovado	
		3	Vertical	Aprovado	

Tabela A.3 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 3, depositada com o arame-eletrodo 2 (ER70S-6)

Pré-forma	Eletrodo	CP	Orientação	Parecer	Registro
03	ER70S-6	1	Horizontal	Aprovado	
		2		Aprovado	
		3	Vertical	Aprovado	
		4		Aprovado	

Tabela A.4 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 4, depositada com o arame-eletrodo 3 (G4Si1)

Pré-forma	Eletrodo	CP	Orientação	Parecer	Registro
04	G4Si1	1	Horizontal	Aprovado	
		2		Aprovado	
		3	Vertical	Aprovado	
		4	Vertical	Reprovado	

Tabela A.5 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 5, depositada com o arame-eletrodo 6 (ER110S-1)

Pré-forma	Eletrodo	CP	Orientação	Parecer	Registro
05	ER110S-1	1	Horizontal	Aprovado	
		2	Vertical	Aprovado	
		3		Reprovado	

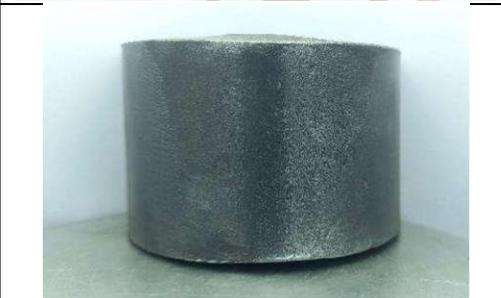
Tabela A.6 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 6, depositada com o arame-eletrodo 4 (ER80S-G)

Pré-forma	Eletrodo	CP	Orientação	Parecer	Registro
06	ER80S-G	1	Horizontal	Aprovado	
		2	Vertical	Aprovado	
		3		Aprovado	

Tabela A.7 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 8, depositada com o arame-eletrodo 1 (ER70S-3)

Pré-forma	Eletrodo	CP	Orientação	Parecer	Registro
08	ER70S-3	1	Horizontal	Aprovado	
		2		Aprovado	
		3	Vertical	Aprovado	
		4		Aprovado	

Tabela A.8 – Resultados dos testes de dobramento da pré-forma 9, depositada com o arame-eletrodo 5 (ER80S-B2)

Pré-forma	Eletrodo	CP	Orientação	Parecer	Registro
09	ER80S-B2	1	Horizontal	Aprovado	
		2	Horizontal	Aprovado	
		3	Vertical	Aprovado	

**APÊNDICE V - REGISTROS FOTOGRÁFICOS DAS AMOSTRAS APÓS A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE IMPACTO CHARPY**



Figura A.26 – Amostras Charpy da pré-forma 1, depositada com arame-eletrodo ER80S-G (horizontal à esquerda e vertical à direita)

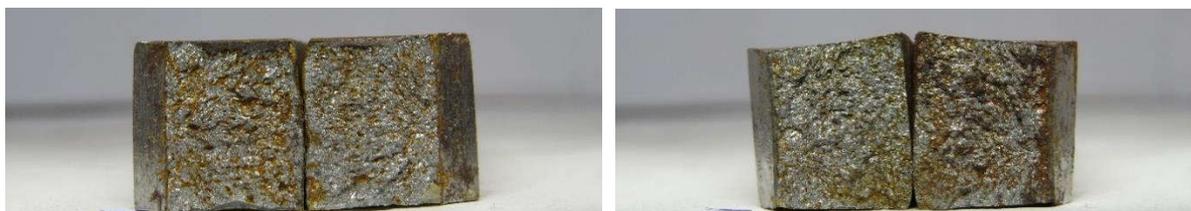


Figura A.27 – Amostras Charpy da pré-forma 2, depositada com arame-eletrodo ER80S-B2 (horizontal à esquerda e vertical à direita)

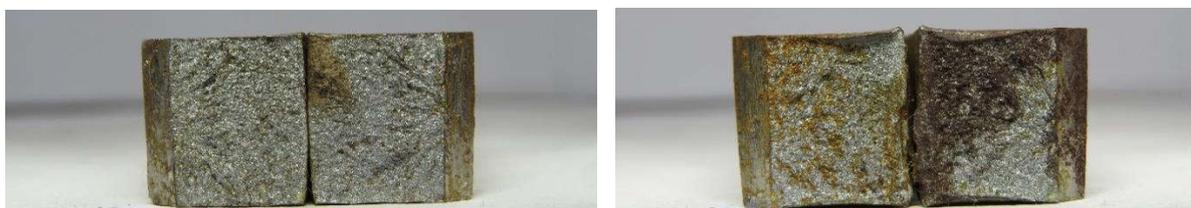


Figura A.28 – Amostras Charpy da pré-forma 3, depositada com arame-eletrodo ER70S-6 (horizontal à esquerda e vertical à direita)

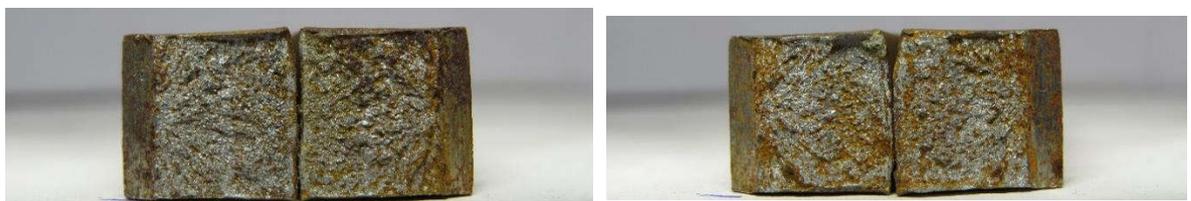


Figura A.29 – Amostras Charpy da pré-forma 4, depositada com arame-eletrodo G4Si1 (horizontal à esquerda e vertical à direita)

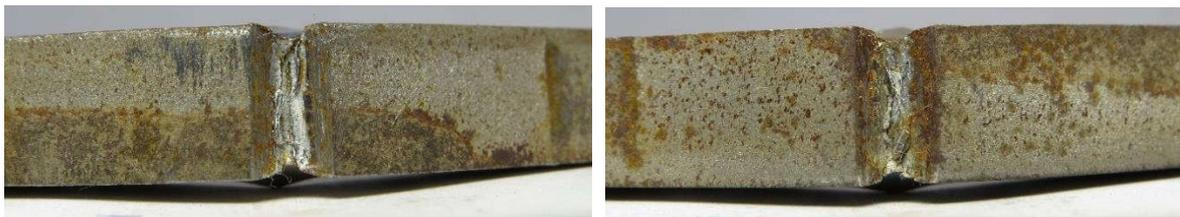


Figura A.30 – Amostras Charpy da pré-forma 5, depositada com arame-eletrodo ER110S-1 (horizontal à esquerda e vertical à direita)

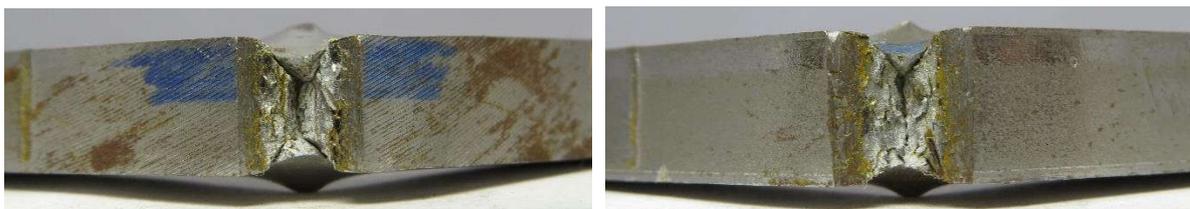


Figura A.31 – Amostras Charpy da pré-forma 6, depositada com arame-eletrodo ER80S-G (horizontal à esquerda e vertical à direita)

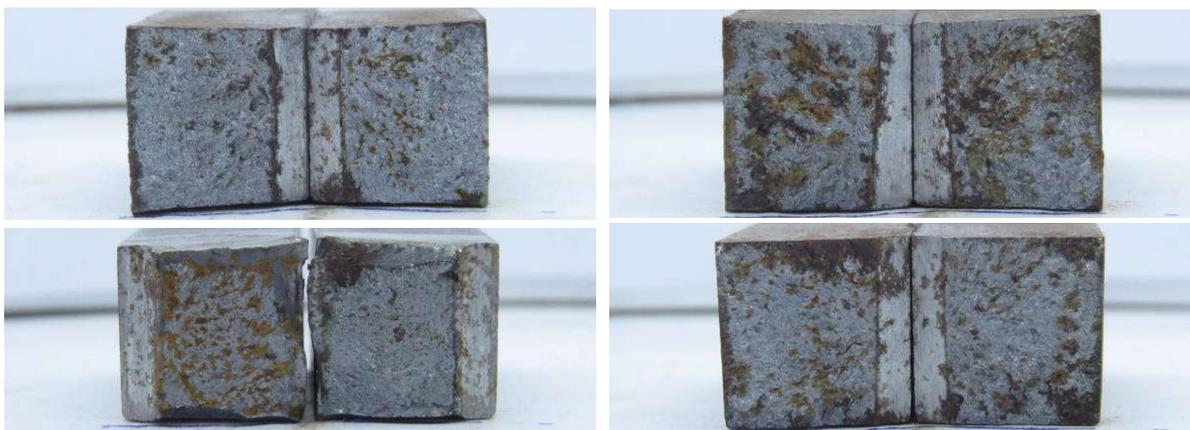


Figura A.32 – Amostras Charpy da pré-forma 9, depositada com arame-eletrodo ER80S-B2 (horizontais à esquerda e verticais à direita)

**APÊNDICE VI – REGISTROS FOTOGRÁFICOS DOS CORPOS DE PROVA  
SUBMETIDOS AOS ENSAIOS DE FADIGA (ER110S-1)**



Figura A.33 – CP 5.1 rompido (médio ciclo:  $\Delta\sigma = 529,8$  MPa  $\rightarrow$  181.588 ciclos)



Figura A.34 – CP 5.2 rompido (tentativa de *run out*):  $\Delta\sigma = 351,7$  MPa  $\rightarrow$  771.395  
ciclos)



Figura A.35 – CP 5.3 rompido (baixo ciclo:  $\Delta\sigma = 585,0$  MPa  $\rightarrow$  80.797 ciclos)



Figura A.36 – CP 5.4 rompido (médio ciclo:  $\Delta\sigma = 528,8$  MPa  $\rightarrow$  207.013 ciclos)



Figura A.37 – CP 5.6 rompido (médio ciclo:  $\Delta\sigma = 527,7$  MPa  $\rightarrow$  242.087 ciclos)



Figura A.38 – CP 5.7 rompido (alto ciclo:  $\Delta\sigma = 419,9$  MPa  $\rightarrow$  777.377 ciclos)



Figura A.39 – CP 5.9 rompido (alto ciclo:  $\Delta\sigma = 419,6$  MPa  $\rightarrow$  1.110.538 ciclos)



Figura A.40 – CP 5.10 rompido (alto ciclo:  $\Delta\sigma = 420,2$  MPa  $\rightarrow$  1.100.136 ciclos)



Figura A.41 – CP 5.11 rompido (baixo ciclo:  $\Delta\sigma = 585,5$  MPa  $\rightarrow$  78.664 ciclos)

Tabela A.9 – Superfícies de fratura das amostras retiradas da parede 5 (ER110S-1)



CP 5.1



CP 5.2



CP 5.3



CP 5.4



CP 5.6



CP 5.7



CP 5.9



CP 5.10



CP 5.11